

WOJSKOWA AKADEMIA TECHNICZNA
im. Jarosława Dąbrowskiego

ROZPRAWA DOKTORSKA



mgr inż. Artur KURNYTA

***MONITOROWANIE PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH
ELEMENTÓW STRUKTURY STATKU POWIETRZNEGO
ZA POMOCĄ ZINTEGROWANEJ SIECI REZYSTANCYJNYCH
CZUJNIKÓW DRABINKOWYCH***

Promotor

dr hab. inż. Andrzej LESKI, prof. WAT

Promotor pomocniczy

ppłk dr inż. Maciej HENZEL

Warszawa – 2022 r.

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW PRZYJĘTYCH W ROZPRAWIE	- 7 -
WPROWADZENIE.....	- 13 -
1. SPOSOBY MONITOROWANIA STANU TECHNICZNEGO STATKÓW POWIETRZNYCH	- 17 -
1.1. Metody stosowane w trakcie okresowych inspekcji	- 17 -
1.2. Systemy SHM przeznaczone do bieżącego monitorowania stanu technicznego struktury	- 24 -
1.2.1. Rozwinięte techniki SHM.....	- 28 -
1.2.1.1. Metody bazujące na ultradźwiękach i emisji akustycznej	- 28 -
1.2.1.2. Metody bazujące na pomiarze odkształceń.....	- 34 -
1.2.1.3. Metoda CVM.....	- 37 -
1.2.2. Nowe metody SHM na wczesnym etapie rozwoju	- 39 -
1.3. Zintegrowany system monitorowania stanu technicznego IVHM.....	- 48 -
1.4. Podsumowanie	- 51 -
2. TEZA NAUKOWA, CEL ORAZ ZAKRES ROZPRAWY.....	- 57 -
2.1. Teza naukowa oraz cel pracy	- 58 -
2.2. Program badań zrealizowanych w ramach rozprawy	- 59 -

3.	CHARAKTERYSTYKA CZUJNIKÓW DRABINKOWYCH.....	- 61 -
3.1.	Budowa i zasada działania czujników drabinkowych.....	- 61 -
3.2.	Badania eksperymentalne czujników drabinkowych	- 62 -
3.2.1.	Laboratoryjne badania zmęczeniowe próbek płaskich.....	- 66 -
3.2.2.	Laboratoryjne badania zmęczeniowe elementów konstrukcyjnych-	71 -
3.2.3.	Badania długotrwałe w trakcie pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu szkolnego PZL-130 TCII Orlik	- 76 -
3.3.	Wnioski i spostrzeżenia z badań weryfikacyjnych czujników drabinkowych	- 81 -
4.	KONCEPCJA I REALIZACJA BADAŃ WSTĘPNYCH NOWYCH CZUJNIKÓW DRABINKOWYCH	- 85 -
4.1.	Wstępne badania eksperymentalne nowych czujników w celu potwierdzenia założeń koncepcji.....	- 88 -
4.1.1.	Laboratoryjne badania zmęczeniowe elementu konstrukcyjnego z nowym czujnikiem drabinkowym	- 89 -
4.1.2.	Badania wstępne nowego czujnika w trakcie pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu szkolnego PZL-130 TCII Orlik.....	- 92 -
4.1.3.	Badania nowego czujnika drabinkowego przeprowadzone w trakcie próby zmęczeniowej belki ogonowej śmigłowca transportowego Mi-8	- 96 -
4.2.	Wnioski i spostrzeżenia ze wstępnych badań weryfikacyjnych nowych czujników drabinkowych	- 99 -
5.	BADANIA MATERIAŁOWE I EKSPLOATACYJNE NOWYCH CZUJNIKÓW DRABINKOWYCH	- 103 -
5.1.	Badania materiałów wykorzystanych do wytworzenia nowych czujników drabinkowych	- 103 -
5.1.1.	Badania własności mechanicznych materiałów izolacyjnych	- 104 -

5.1.2.	Badania wpływu grubości warstwy izolacyjnej na odkształcenia powierzchni zewnętrznej	111 -
5.1.3.	Badania własności elektrycznych farby elektroprowadzącej	120 -
5.1.4.	Badania własności elektromechanicznych farby elektroprowadzącej	128 -
5.1.5.	Badania adhezji zastosowanych materiałów	130 -
5.1.6.	Badania własności cieplnofizycznych zastosowanych materiałów	134 -
5.1.7.	Badania morfologii powierzchni farby elektroprowadzącej	140 -
5.2.	Badania autorskich czujników drabinkowych	142 -
5.2.1.	Modyfikacje metody względem badań wstępnych	142 -
5.2.2.	Badania na próbce CT	146 -
5.2.3.	Badania przy rzeczywistym widmie obciążeń eksploatacyjnych	150 -
5.2.4.	Badania stabilności działania nowych czujników drabinkowych	154 -
5.3.	Wnioski i spostrzeżenia z przeprowadzonych badań.....	157 -
WNIOSKI KOŃCOWE		161 -
BIBLIOGRAFIA		165 -

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW PRZYJĘTYCH W ROZPRAWIE

Stosowane oznaczenia

A	mm^2	pole przekroju próbki
$B1, B2$	mm	szerokość wąskiej / szerokiej części próbki wiosełkowej
b_{sr}	mm	szerokość odcinka pomiarowego próbki, wartość średnia
$E_{t,VE}$	MPa	moduł sprężystości przy rozciąganiu
F	N	siła rozciągająca próbkę
F_f	N	siła rozciągająca w chwili zerwania próbki
F_m	N	siła maksymalna rozciągająca próbkę
F_{min}	kN	Wartość siły minimalnej cyklu zmęczeniowego
f_s	Hz	Częstotliwość próbkowania sygnału
h	mm	grubość próbki wiosełkowej
h_{sr}	mm	grubość odcinka pomiarowego próbki, wartość średnia
$L1$	mm	długość fragmentu próbki wiosełkowej ograniczonej liniami równoległymi
$L2$	mm	odległość między szerokimi równoległymi usytuowanymi częściami próbki wiosełkowej
$L3$	mm	długość całkowita próbki wiosełkowej
n		Współczynnik załamania światła rdzenia światłowodu
R	Ω	rezystancja opornika w górnej części dzielnika napięcia
R_0	Ω	rezystancja w temperaturze odniesienia T_0
$R_1 \div R_4$	Ω	wartości rezystancji w kolejnych ramionach mostka Wheatstone'a
R_{sensor}	Ω	rezystancja czujnika drabinkowego w dolnej części dzielnika napięcia
R_T	Ω	rezystancja w temperaturze T
T_0	$^{\circ}\text{C}$	temperatura odniesienia

V_1	V	wartość napięcia zasilania mostka Wheatstone'a
V_{in}	V	napięcie zasilania dzielnika napięcia
V_{out}	V	napięcie wyjściowe z dzielnika napięcia
V_{PR1}	V	napięcie wyjściowe z układu mostka Wheatstone'a
x		wartość względnej zmiany rezystancji w ramieniu mostka Wheatstone'a
α	K ⁻¹	temperaturowy współczynnik rezystancji (TWR)
δ_f	mm	przesunięcie tłoka siłownika maszyny w chwili zerwania próbki
$\delta_{f,VE}$	mm	przesunięcie tłoka siłownika mierzone wideoekstensometrem w chwili zerwania próbki
$\Delta L/L_0$	mm/mm	względna zmiana odkształcenia próbki wiosełkowej
δ_m	mm	przesunięcie tłoka siłownika maszyny przy sile maksymalnej
$\delta_{m,VE}$	mm	przesunięcie tłoka siłownika mierzone wideoekstensometrem przy sile maksymalnej
ΔR	Ω	Zmiana rezystancji
$\Delta V/V_0$	mV/mV	względna zmiana napięcia mierzonego dla ścieżki elektroprzewodzącej
$\varepsilon_{f,VE}$	%	odkształcenie w chwili zerwania próbki, wyznaczone na podstawie rejestracji wideoekstensometrem
$\varepsilon_{m,VE}$	%	odkształcenie przy naprężeniu maksymalnym próbki, wyznaczone na podstawie rejestracji wideoekstensometrem
λ		periodyczność siatki Bragga
λ_B		długość fali światła odbijanego
σ	MPa	naprężenie oddziaływujące na próbkę
σ_f	MPa	naprężenie w chwili zerwania próbki
σ_m	MPa	naprężenie maksymalne próbki
ΔT	K lub °C	zmiana temperatury

Skróty

<i>RP</i>		Rzeczpospolita Polska
<i>SFH</i>	<i>Sinulated Flight Hours</i>	Symulowane godziny lotu
<i>FSFT</i>	<i>Full Scale Fatigue Test</i>	Pełnoskalowa próba zmęczeniowa
<i>DEPOT / PSS</i>		Sulfonian poli(3,4-etylenodioksytiofenu) polistyrenu
<i>PU</i>		Poliuretan
<i>EP</i>	<i>Epoxy</i>	Żywica epoksydowa
<i>NDT</i>	<i>Non Destructive testing</i>	Badania nieniszczące
<i>RTR</i>	<i>Real-Time Radiography</i>	
<i>GFRP</i>	<i>Glass Fiber Reinforce Polimer</i>	Kompozyt wzmocniony polimerowo-szkłany
<i>SHM</i>	<i>Structural Health Monitoring</i>	
<i>GW</i>	<i>Guided Waves</i>	Fale prowadzone
<i>DI</i>	<i>Damage Index</i>	Wskaźnik uszkodzenia
<i>RAPID</i>	<i>Reconstruction Algorithm for Probabilistic Inspection of Damage</i>	
<i>EMI</i>	<i>Electro Mechanical Impedance</i>	Impedancja elektromechaniczna
<i>AE</i>	<i>Acoustic Emission</i>	Emisja akustyczna
<i>BVID</i>	<i>Barely Visible Impact Damage</i>	

<i>OLM</i>	<i>Operational Load Monitoring</i>	Monitorowanie obciążeń eksploatacyjnych
<i>ITWL</i>		Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
<i>SMO</i>		System Monitorowania Obciążeń
<i>FOS</i>	<i>Fiber Optic Sensors</i>	
<i>FBG</i>	<i>Fiber Bragg Grating</i>	Siatka Bragga
<i>CVM</i>	<i>Comparative Vacuum Monitoring</i>	
<i>ICM</i>	<i>Intelligent Coating Monitoring</i>	
<i>SMCS</i>	<i>Surface Mountable Crack Sensor</i>	
<i>LED</i>	<i>Light Emitted Diode</i>	
<i>CT</i>	<i>Compact Tension</i>	
<i>SEC</i>	<i>Soft Elastomeric Capacitor</i>	
<i>SEBS</i>		Styren-Etylen-Butylen-Styren
<i>CFRP</i>	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>	Kompozyt wzmocniony polimerowo-węglowy
<i>MOGA</i>	<i>Multi Objective Generic Algorithm</i>	
<i>EIT</i>	<i>Electro Impedance Tomography</i>	Tomografia elektroimpedancyjna
<i>HUMS</i>	<i>Health and Usage Monitoring System</i>	
<i>IEPE</i>	<i>Integrated Electronics Piezo-Electric</i>	

<i>IVHM</i>	<i>Integrated Vehicle Health Management</i>	
<i>COD</i>	<i>Crack Opening Displacement</i>	
<i>COTS</i>	<i>Commercial Of The Shelf</i>	
<i>TFDBP</i>		Tensometr Foliowy Do Badania Pęknięć
<i>DC</i>	<i>Direct Current</i>	Prąd stały
<i>USB</i>	<i>Universal Serial Bus</i>	
<i>PC</i>	<i>Personal Computer</i>	Komputer osobisty
<i>PZL</i>		Polskie Zakłady Lotnicze
<i>TWR</i>		Temperaturowy współczynnik rezystancji
<i>MES</i>		Metoda elementów skończonych
<i>TGA</i>		Analiza termogravimetryczna
<i>DSC</i>		Różnicowa kalorymetria skaningowa
<i>RT</i>	<i>Room Temperature</i>	temperatura pokojowa
<i>SEM</i>		skaningowa mikroskopia elektronowa

WPROWADZENIE

Branża lotnicza, zarówno na rynku cywilnym jak i wojskowym, jest na dobrej drodze do intensyfikacji swojego globalnego wzrostu. Na koniec roku 2018 w użytku było ponad 25 tys. samolotów komercyjnych, a portfel zamówień osiągnął bardzo wysoki poziom w ilości ponad 14 000 sztuk [91]. W ciągu najbliższych 20 lat przewiduje się, że produkcja samolotów na całym świecie sięgnie około 43 500 sztuk o łącznej wartości ponad 7200 miliardów USD, a na niebie ma latać 49 tysięcy [12]. Choć rozwój branży w głównej mierze wynika z działalności w USA, w najbliższym czasie kilka innych regionów, w tym Chiny, Francja, Indie, Japonia, Bliski Wschód, Wielka Brytania oraz kraje rynków wschodzących również przyczynią się do poprawy wskaźników sektora. 24 lipca 2019 roku zarejestrowano rekord ponad 225 tys. lotów w ciągu 24h.

Jednym z zasadniczych wymagań dla tego sektora jest zapewnienie wysokiego poziomu bezpieczeństwa eksploatacji, zarówno w wymiarze ochrony zdrowia i życia ludzkiego, jak i uniknięcia strat materialnych. Uszkodzenie istotnych elementów nośnych może doprowadzić do całkowitej utraty stateczności konstrukcji. W przypadku uszkodzenia np. elementów poszycia statku powietrznego, powstaje również groźba stworzenia wtórnego i bezpośredniego zagrożenia dla osób i obiektów pozostających na ziemi. Istotą projektowania tych obiektów jest konieczność zagwarantowania przenoszenia statycznych i dynamicznych obciążeń, zgodnie z założonym widmem eksploatacyjnym. Jednak warunki operacyjne statku powietrznego mogą być zmienne w czasie, co może doprowadzić do nieprzewidzianych uszkodzeń powstałych na skutek zmęczenia materiałów [90]. Nawet po relatywnie krótkim czasie, konieczne jest przeprowadzanie okresowych inspekcji weryfikujących stan techniczny obiektów. Dodatkowo, przyrost liczby uszkodzeń w czasie ma zazwyczaj charakter wykładniczy.

Problem detekcji i monitorowania pęknięć konstrukcji lotniczych jest więc istotnym zagadnieniem. Występowanie pęknięć zmęczeniowych w poszyciu samolotu, szczególnie w miejscach połączenia jego elementów jest zjawiskiem naturalnym, z uwagi na oddziaływanie zmiennych obciążeń w trakcie lotu [88]. Dlatego tak istotny jest odpowiedni nadzór realizowany poprzez wczesną detekcję miejsca uszkodzenia oraz monitorowanie jego rozmiarów, zanim osiągnie ono rozmiar krytyczny lub kilka mniejszych pęknięć połączy się (tzw. MSD – Multi Side Damage).

Perspektywa podwojenia ilości statków powietrznych do 2040 roku, wymusi zmiany w systemie obsługi, zapewnienia zdadności do lotu i oceny stanu technicznego statków powietrznych. Konieczna jest automatyzacja niektórych czynności, pełna adaptacja systemu eksploatacji według stanu technicznego z uwagi na odmienne warunki użytkowania nawet egzemplarzy samolotu tego samego typu. Prężnie rozwija się również gałąź bezzałogowych statków powietrznych, których wykorzystanie będzie się odbywać również na terenach mocno zurbanizowanych [32] (powietrzne taksówki, dostawy zakupów i żywności). W odniesieniu do integralności konstrukcji, dla samolotów załogowych pilot pełni istotną rolę również np. przez subiektywne odczucia czy dźwięki, które mogą świadczyć o wystąpieniu uszkodzenia. W systemach bezzałogowych, operator musi polegać jedynie na wskazaniach przyrządów pokładowych.

Obecnie, eksploatacja statku powietrznego przeważnie oparta jest na resursach: godzinowym (nalot) oraz kalendarzowym, ściśle wyznaczając moment skierowania go na inspekcję lub remont, niezależnie od jego rzeczywistego zużycia. Stan konstrukcji statków powietrznych sprawdzany jest podczas okresowo realizowanych inspekcji przy użyciu technik badań nieniszczących NDT. W badaniach tych wykorzystuje się specjalistyczne przyrządy oraz mobilne urządzenia pomiarowe (nazywane defektoskopami) do okresowych inspekcji wytypowanych elementów konstrukcyjnych obiektu. Umożliwia to wykrycie uszkodzeń konstrukcji, nim ich rozmiar osiągnie wielkość krytyczną i zagrazi bezpieczeństwu dalszej eksploatacji. Wybór typu metody NDT wiąże się głównie ze spodziewanym rodzajem uszkodzenia. Techniki te wykorzystuje się również do sprawdzenia różnych obiektów technicznych, jak mosty, budynki, rurociągi, czy turbiny wiatrowe. Lecz niektóre z metod zostały opracowane i zaadoptowane konkretnie z przeznaczeniem monitorowania statków powietrznych wszelkiego typu. Inspekcje te wykonywane są przez wysoko wykwalifikowany personel, przy użyciu odpowiednich defektoskopów lub półautomatycznych urządzeń. Z uwagi na utrudniony dostęp do wielu krytycznych obszarów konstrukcji, konieczny jest choć częściowy demontaż elementów. Dodatkowo, konieczność przeprowadzenia inspekcji, czasowo wyłącza obiekt z eksploatacji, co wymusza podjęcie działań o charakterze logistycznym, w celu zapewnienia ciągłości dostarczanych usług, np. w transporcie. Obecnie szacuje się, że 1 dzień nieplanowanego przestoju samolotu pasażerskiego to koszt od 150-200 tysięcy USD dla samolotów wąskokadłubowych, do nawet 0.5 mln USD dla większych maszyn. Koszt inspekcji to nawet 600 USD na 1 godzinę lotu samolotu [61].

Dlatego w ciągu ostatnich dwóch dekad zintensyfikowane zostały prace nad opracowaniem systemów ciągłego monitorowania stanu technicznego konstrukcji, tzw. systemów SHM (z ang. Structural Health Monitoring), mających za zadanie wspomóc proces eksploatacji statków powietrznych [13]. SHM to rozproszony system złożony z czujników, członów wykonawczych, układów transmisji danych i jednostek obliczeniowo-rejestrujących zintegrowanych z monitorowanym obiektem. Celem tej trwałej integracji jest opracowanie sposobu na skuteczną detekcję, lokalizację, identyfikację oraz finalnie predykcję rozwoju uszkodzeń, które mogą doprowadzić do nieprawidłowego funkcjonowania obiektu teraz lub w przyszłości.

Zastosowanie systemu zgodnego z koncepcją SHM przyniesie wiele zalet, a do głównych należą:

- zmniejszenie bezpośrednich kosztów przeglądów - skrócenie czasu i kosztów obsługi technicznych; (detekcja i lokalizacja uszkodzenia w predefiniowanych obszarach struktury),
- zwiększenie częstotliwości inspekcji, a zatem poziomu bezpieczeństwa eksploatacji; (monitorowanie w trybie ciągłym, a nie dyskretnym – okresowo),
- zmniejszenie bezpośrednich kosztów eksploatacji - optymalne planowanie realizacji bardziej szczegółowych inspekcji i napraw; (identyfikacja i predykcja rozwoju uszkodzenia),
- w aspekcie kosztów własności - podniesienie wartości resztkowej obiektu przy jednoczesnej możliwości wydłużenia pierwotnie zakładanego ресурсu, z uwagi na ciągły system monitoringu. (np. przez obniżenie współczynnika bezpieczeństwa dla ресурсu technicznego).

Opracowanie systemu monitorowania pęknięć zmęczeniowych, pomimo ugruntowania na przestrzeni lat wiedzy o mechanizmach ich powstawania i rozwoju, stanowi problem według blisko 70% respondentów ankiety przeprowadzonej wśród głównych przedstawicieli przemysłu lotniczego [121].

Dowodem na to, że problem jest wciąż otwarty na praktyczne rozwiązania, są doniesienia dotyczące wykrytych uszkodzeń nawet nowych konstrukcji statków powietrznych. Jednym z najnowszych przykładów jest samolot Boeing 737 NG [118]. Zgodnie z raportem FAA z końca 2019, organ wezwał linię lotniczą SouthWest Airlines oraz producenta samolotu do podjęcia dodatkowych działań diagnostycznych na skutek wykrycia pęknięć w elemencie łączącym skrzydło z kadłubem. Skutkiem jest

wprowadzenie inspekcji okresowej tego miejsca co 1000 godzin lotu, i sukcesywne zwiększanie częstotliwości przeglądów do osiągnięcia nalotu równego 30000 godzin. Oszacowano, że w konsekwencji zwiększającego się nalotu samolotu, inspekcje będą musiały być przeprowadzane cotygodniowo dla wszystkich 700 samolotów przewoźnika. Wygeneruje to znaczne, nieprzewidziane koszty inspekcji oraz dodatkowy przestój maszyn. Innym bieżącym przykładem jest wykrycie pęknięć głównego dźwigara prawie nowych samolotów Cessna T210 [8].

Celem niniejszej rozprawy jest rozwój metody detekcji pęknięć zmęczeniowych, zgodnej z koncepcją SHM. W rozdziale 1 przedstawiono szereg sposobów, zarówno obecnie stosowanych i planowanych do wdrożenia, monitorowania stanu technicznego. W kolejnych rozdziałach rozprawy przedstawione zostaną wyniki badań zrealizowanych na potrzeby opracowania i weryfikacji alternatywnej metody detekcji pęknięć zmęczeniowych z wykorzystaniem tzw. czujników drabinkowych. Badania rozpoczęto od oceny użyteczności komercyjnie dostępnych czujników, na drodze badań eksperymentalnych na próbkach o nieskomplikowanym kształcie, rzeczywistych elementach konstrukcyjnych statku powietrznego oraz w trakcie pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu szkolnego. Następnie opracowano koncepcję nowego czujnika drabinkowego, który charakteryzuje się wyższą podatnością użytkową, między innymi z uwagi na możliwość dostosowania kształtu siatki pomiarowej do monitorowanej konstrukcji. Zrealizowany autorski program badań oparty o multidyscyplinarne metody badawcze pozwolił na potwierdzenie skuteczności detekcji pęknięć za pomocą zaproponowanej metody.

1. SPOSOBY MONITOROWANIA STANU TECHNICZNEGO STATKÓW POWIETRZNYCH

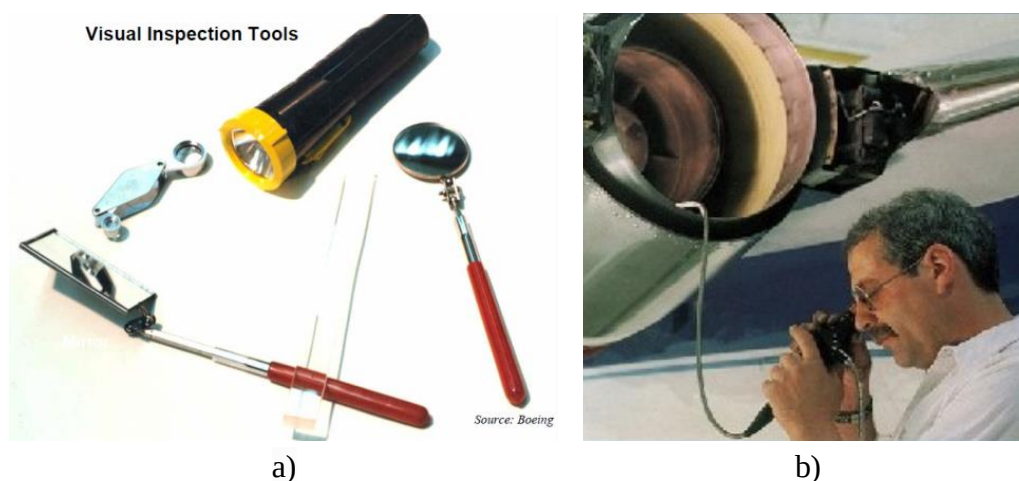
Krytycznym czynnikiem wpływającym na bezpieczeństwo eksploatacji statków powietrznych jest zachowanie integralności ich struktury. Wraz z rozwojem lotnictwa i zdobywanym na przestrzeni lat doświadczeniem, nadzorowanie stanu technicznego konstrukcji stało się nieodłącznym elementem współczesnych systemów eksploatacji [48][90][148]. W dodatku, argumentem za szerokim wykorzystaniem w lotnictwie, i dalszym rozwojem metod detekcji uszkodzeń struktury i monitorowania stanu technicznego struktury, oprócz względów bezpieczeństwa, są również aspekty natury ekonomicznej. Programy modernizacyjne oraz zastosowanie systemu eksploatacji według stanu technicznego dają możliwość wydłużenia pierwotnie zakładanego ресурсu technicznego dla wybranych statków powietrznych. Przykładem takich rozwiązań mogą być bombowce strategiczne Boeing B-52 Stratofortress, które weszły do służby w latach 50-tych XX wieku [42][155], lub samoloty transportowe C-130 Hercules z lat 70-tych. Obecnie planowana jest ich dalsza eksploatacja do roku 2040÷45 [22][105].

1.1. Metody stosowane w trakcie okresowych inspekcji

Podejście do projektowania i eksploatacji m. in. statków powietrznych zgodne z zasadą tolerowanego uszkodzenia zakłada konieczność okresowych przeglądów stanu technicznego elementów strukturalnych konstrukcji [1][35][119]. W związku z tym, metody wykorzystywane do badania konstrukcji muszą charakteryzować się tym, że w wyniku ich zastosowania stan badanej struktury nie może ulec pogorszeniu. Metody tego typu stosowane w wielu gałęziach przemysłu, zgrupowano pod nazwą NDT (z ang. Non-Destructive Testing). Zaliczają się do niej następujące metody [115]:

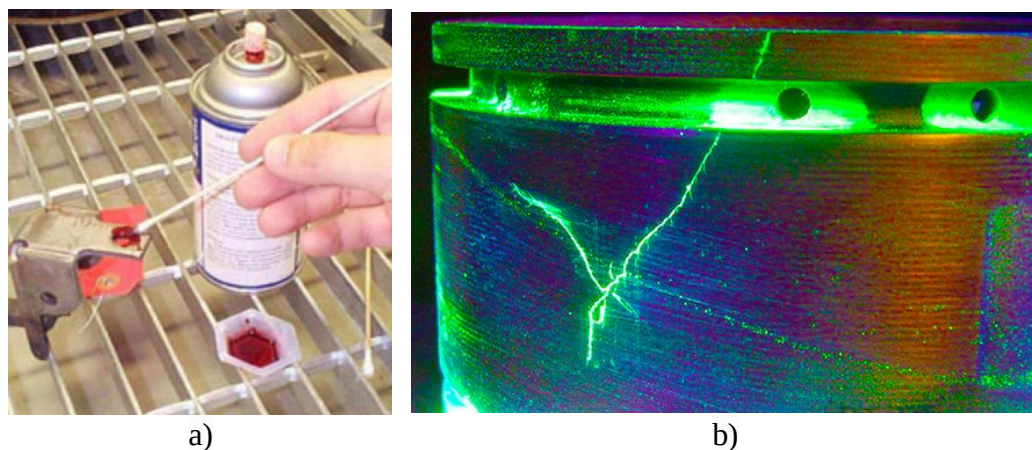
- metoda wizualna;
- metoda penetracyjna;
- metoda magnetyczno-proszkowa;
- metoda ultradźwiękowa;
- metoda prądów wirowych;
- metoda radiograficzna;
- metoda termograficzna.

Pierwsza z wymienionych, metoda wizualna jest najczęściej przeprowadzana w technice lotniczej. Wykonuje się ją zarówno „okiem nieuzbrojonym”, jak również za pomocą specjalistycznych urządzeń, umożliwiających badania powierzchni trudnodostępnych, co pokazano na rys. 1.1. Wykorzystuje się w tym celu: lupy, lusterka, boroskopy, endoskopy lub inspekcyjne kamery cyfrowe z powiększeniem. Obserwowane wady podlegają ocenie zgodnie z określonymi warunkami technicznymi, lecz najczęściej interpretowane przez kwalifikowanego specjalistę.



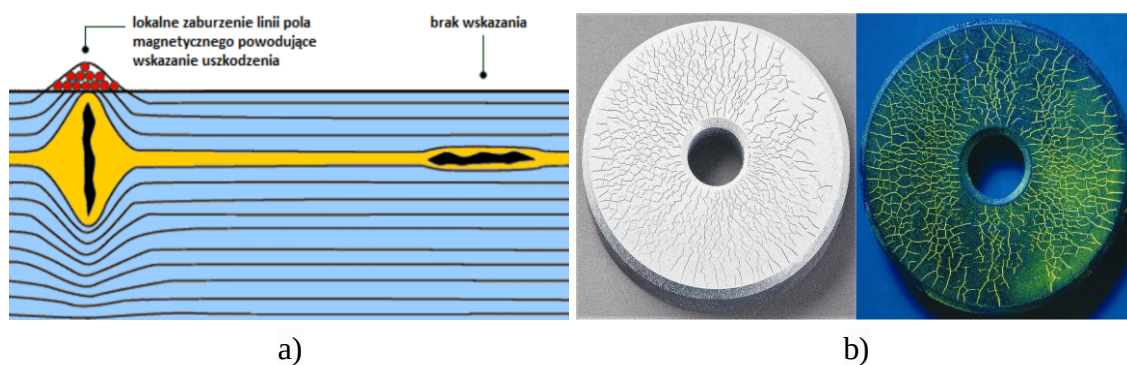
Rys. 1.1 Metoda wizualna, a) stosowane przyrządy optyczne, b) realizacja badań z użyciem boroskopu [107]

Z kolei metoda penetracyjna jest szeroko stosowana w celu wykrywania wad powierzchniowych ze względu na brak ograniczeń przy badaniu różnych typów materiałów (rys. 1.2). Najczęściej wykorzystuje się ją do sprawdzania jakości konstrukcji wykonanych ze stopów stali, stopów aluminium, miedzi lub tytanu. Metoda penetracyjna umożliwia wykrycie powierzchniowego pęknięcia poprzez ujawnienie środka penetracyjnego zgromadzonego wewnątrz wad na powierzchni diagnozowanego elementu w trakcie wykonywania badań. W tym celu wykorzystuje się płynne penetranty kolorowe lub fluorescencyjne. Technika ta opiera się na zdolności cieczy do wnikania wewnątrz powierzchniowego uszkodzenia poprzez zjawisko kapilarne. Po określonym czasie, zwanym „czasem zatrzymania”, nadmiar penetrantu powierzchniowego jest usuwany i nakładany jest wywoływacz. Działa to jak bibuła, która wyciąga penetrant z uszkodzenia, aby ujawnić jego obecność. Stosowanie technik barwnych i fluorescencyjnych zapewnia wysoką czułość badania.



Rys. 1.2 Metoda penetracyjna, a) sposób realizacji badania, b) wynik zastosowania penetrantu fluorescencyjnego [72][89]

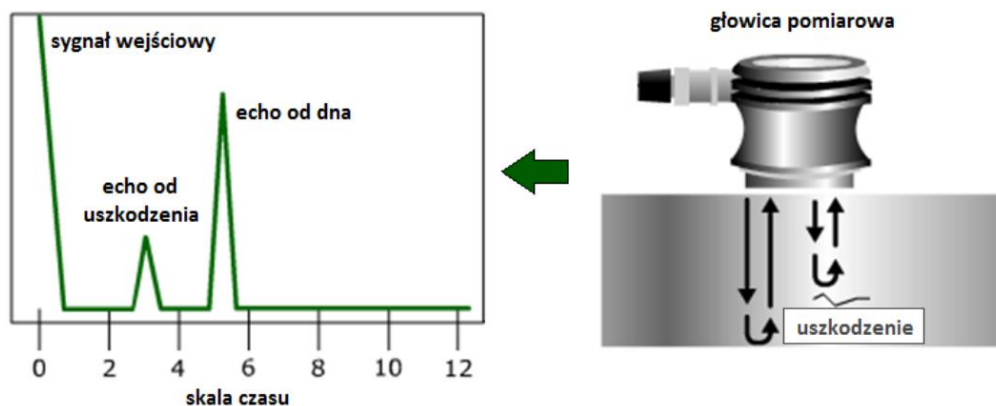
Metoda magnetyczno-proszkowa jest techniką służącą do wykrywania wad powierzchniowych konstrukcji lub uszkodzeń znajdujących się bezpośrednio pod powierzchnią badanego materiału. Przy wykorzystaniu tej metody przeprowadza się jedynie badania materiałów ferromagnetycznych takich jak stopy żelaza, niklu i kobaltu. Wykonanie badania zgodnie z tą metodą jest relatywnie łatwe i nie wymaga wysoce wyspecjalizowanego sprzętu. Polega ono na namagnesowaniu badanego obszaru z jednoczesnym naniesieniem proszku ferromagnetycznego, który gromadzi się w miejscach zdefektowania materiału (rys. 1.3). Do badań stosuje się defektoskopy jarzmowe, magnesy stałe, cewki wzbudzające oraz elektrody i pręty przeznaczone do wzbudzania prądowego. Podobnie jak w przypadku badań penetracyjnych, wykorzystuje się tutaj również techniki barwne i fluorescencyjne.



Rys. 1.3 Metoda magnetyczno-proszkowa, a) zasada działania, b) przykład detekcji uszkodzenia elementu [72][107]

Metoda ultradźwiękowa jest bardziej zaawansowaną technologicznie od wyżej wymienionych, i wymaga zastosowania specjalistycznej aparatury zwanej jako defektoskopy. Dużą przewagą tej metody jest możliwość detekcji różnego typu

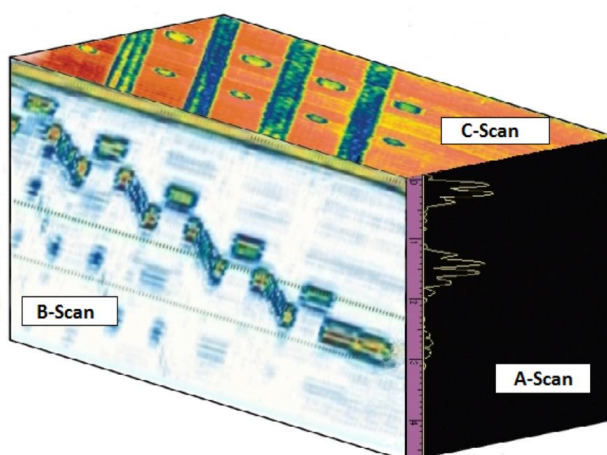
uszkodzeń, w tym pęknięć, rozwarstwień, wtrąceń, odklejeń czy innych defektów, występujących zarówno na powierzchni jak i pod powierzchnią materiału. Metoda ultradźwiękowa może być stosowana do badań wielu różnych typów materiałów, takich jak metale, tworzywa sztuczne czy struktury kompozytowe. Opiera się ona głównie na wykorzystywaniu zasady działania *pulse-echo*, która zbliżona jest do zasady działania np. w sonarów morskich. Fale dźwiękowe o wysokiej częstotliwości są wprowadzane do badanego elementu przez głowicę pomiarową wyposażoną w przetwornik piezoelektryczny. W przypadku gdy generowane fale natrafiają na przestrzeń o odmiennym impedancji akustycznej (zmiana gęstości materiału i prędkości propagacji fali objawiającej się np. pęknięciem), część sygnału odbija się i powróci do nadajnika, informując w ten sposób o uszkodzeniu (rys. 1.4). Metoda ultradźwiękowa znalazła szerokie zastosowanie nie tylko do detekcji uszkodzeń, ale również do testowania jednorodności materiałów, pomiarów grubości np. powłok lakierniczych czy odległości od obiektów. Z uwagi na jej szerokie zastosowanie w technice lotniczej, rozwinięto ją o szereg technik stosowanych do badania specyficznych obiektów [97], takich jak techniki głowic rolkowych, C-scan oraz głowice wieloprzetwornikowe typu *phased array*.



Rys. 1.4 Zasada działania metody ultradźwiękowej

W przykładzie badania z wykorzystaniem metody ultradźwiękowej pokazanym na rys. 1.4, sonda znajduje się bezpośrednio nad uszkodzeniem. Dane rejestrowane są w funkcji czasu - tzw. skanie A (z ang. A-Scan), dla których można wyróżnić położenie sygnału fali odbitej od dna elementu oraz poprzedzające go echo pochodzące od uszkodzenia. Oprócz położenia czasowego zarejestrowanego odbicia, istotne informacje można również uzyskać z wartości amplitudy oraz fazy sygnału. W defektoskopach wieloprzetwornikowych lub systemach zautomatyzowanych,

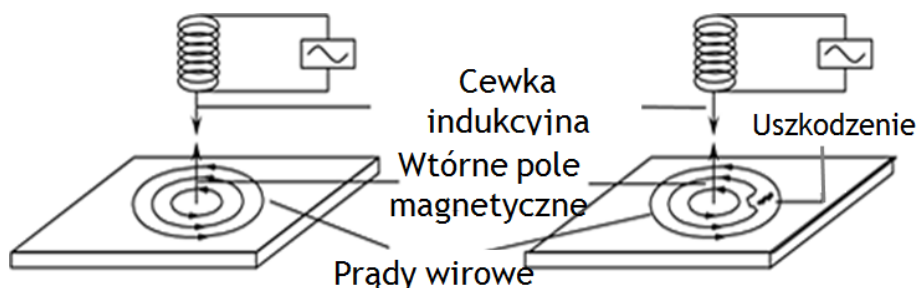
możliwe jest dodatkowo uzyskanie zbiorczej informacji o przebiegach czasowych sygnałów zarejestrowanych przez poszczególne przetworniki podczas badania powierzchni elementu lub uzyskanych w trakcie przemiatania kąowego, stosowanego często w medycynie. Informacja ta jest przedstawiana w postaci obrazu - tzw. skanu B (z ang. B-Scan), w którym intensywność kolorów zależy od amplitudy sygnału poszczególnych przebiegów czasowych - skanów A, co pokazano na rys. 1.5. Z kolei, zobrazowanie w trybie C (ang. C-Scan) dodatkowo umożliwia wizualizację przekroju uszkodzeń znajdujących się pod powierzchnią badanego elementu.



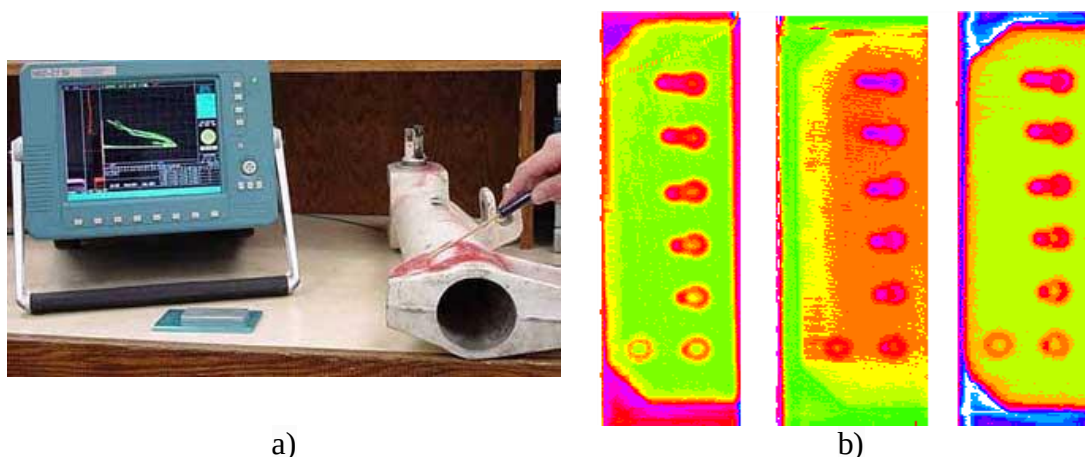
Rys. 1.5 Sposoby zobrazowania wyników badań ultradźwiękowych [85]

W kolejnej metodzie należącej do kanonu metod NDT do badania integralności struktury, wykorzystywane jest zjawisko powstawania prądów wirowych. W metodzie tej prąd elektryczny indukowany jest w materiale przewodzącym dzięki pojawieniu się zmiennego pola magnetycznego generowanego przez głowicę pomiarową wyposażoną w cewkę indukcyjną (rys. 1.6). Prąd ten nazywany jest prądem wirowym, ponieważ linie jego działania przybierają kształt kręgów rozprzeczających się na powierzchni lub na niewielkiej głębokości pod powierzchnią badanej struktury. Zaburzenie przepływu prądu spowodowane niejednorodnością, zmianami geometrycznymi struktury lub jej własności tj. przewodności elektrycznej lub przenikalności magnetycznej, może być wykryte przez odpowiednią aparaturę pomiarową. Sygnałem diagnostycznym jest w tym przypadku impedancja elektryczna. Zaletą tej metody jest możliwość detekcji uszkodzeń różnego typu, takiego jak pęknięcie, korozja czy wtrącenie. Metoda ta znalazła również zastosowanie w precyzyjnych pomiarach grubości elementów oraz powłok lakierniczych, czy kontroli jakości w procesach wytwarzania elementów. Dodatkowo, metoda ta jest podatna użytkowo, z uwagi na możliwość automatyzacji badania. Przykładem systemu

wykorzystującego metodę prądów wirowych jest MAUS V opracowany przez firmę Boeing [108][140], który wykorzystuje jedno lub wielocewkowe głowice wiroprowadowe, skanujące powierzchnię elementu (rys. 1.7). Ograniczeniem tej metody jest możliwość jej zastosowania jedynie do badań materiałów, które są przewodnikami elektryczności, takimi jak metale i stopy ferromagnetyczne oraz nieferromagnetyczne.



Rys. 1.6 Zasada działania metody prądów wirowych

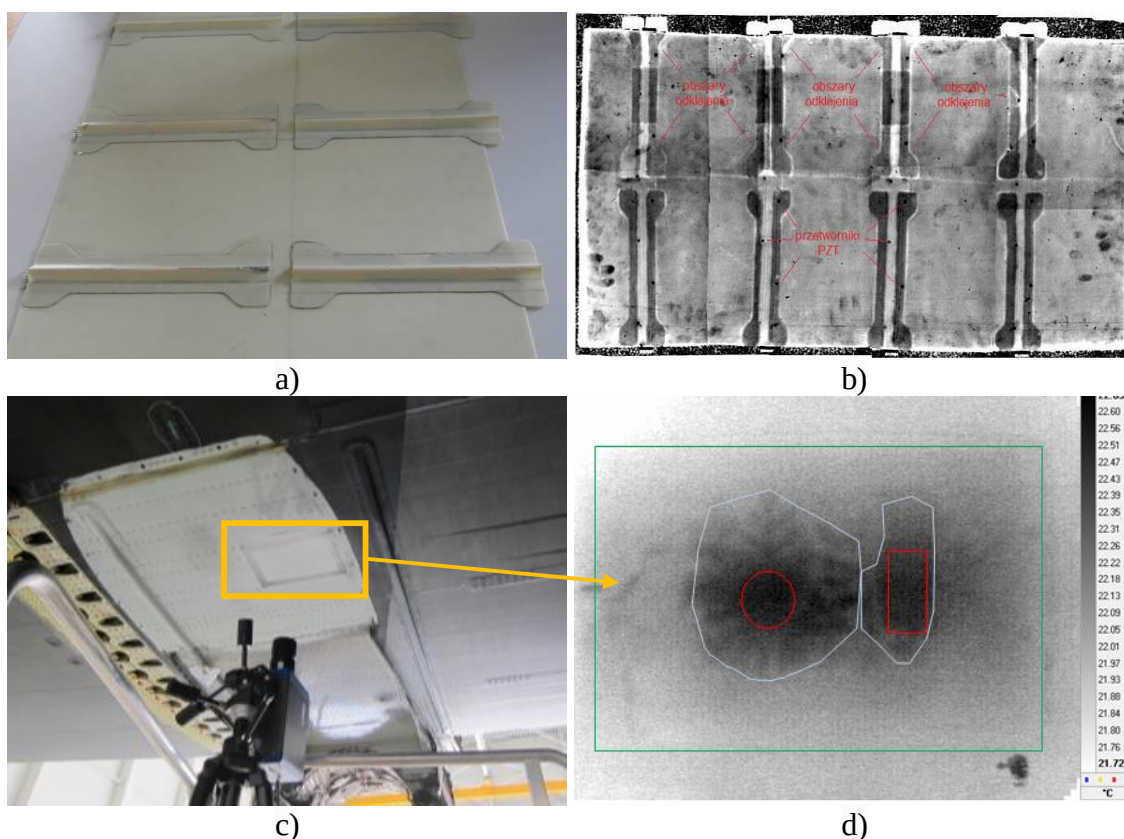


Rys. 1.7 Zastosowanie metody prądów wirowych, a) defektoskop ręczny, b) wizualizacja danych z systemu MAUS V [140]

Metoda radiograficzna polega na wykorzystaniu penetrującego promieniowania gamma lub promieniowania X do badania elementów i podzespołów pod kątem niedoskonałości struktury wewnętrznej. Jako źródło promieniowania używany jest generator promieni rentgenowskich lub izotop promieniotwórczy. Promieniowanie jest kierowane przez badany element i na kliszę lub inny nośnik obrazu. Powstały wykres cieni pokazuje cechy wymiarowe części. Ewentualne niedoskonałości w postaci uszkodzeń są wskazywane jako zmiany gęstości na obrazie (np. kliszy). Metoda radiograficzna wykazuje dużą skuteczność np. podczas wykrywania uszkodzeń powstałych w metalowych wypełniaczach ulowych w strukturach przekładkowych lub też do sprawdzania prawidłowości montażu metalowych elementów konstrukcyjnych

wewnątrz struktury kompozytowej. Obecnie w zastosowaniach badań nieniszczących, w powszechnym użytku są systemy radiograficzne typu RTR (z ang. Real-Time Radiography), gdzie obraz jest tworzony elektronicznie, a nie na kliszy. Dzięki temu między wystawieniem elementu na promieniowanie, a uzyskaniem wynikowego obrazu występuje bardzo małe opóźnienie czasowe. Obraz w postaci cyfrowej pozwala na jego dalszą obróbkę przy wykorzystaniu metod korekcji i analizy obrazu a także jest łatwiejszy w archiwizacji.

Ostatnia z wymienionych, metoda termowizyjna polega na analizie dynamiki zmiany temperatury badanego elementu po jego uprzednim ogrzaniu. Ogrzanie elementu realizuje się m. in. poprzez wykorzystanie silnego impulsu ciepła generowanego z lampy ksenonowej (tzw. termografia impulsowa), a przyrządem pomiarowym jest kamera termowizyjna rejestrująca obraz w czasie stopniowego chłodzenia struktury. Obszary zdefektowane wolniej odprowadzają ciepło, dzięki temu są obserwowane jako obszary o wyższej temperaturze.



Rys. 1.8 Wyniki sprawdzeń metodą termografii a) próbka epoksydowo szklana (GFRP), b) termogram z uwidocznionymi wadami, c) sprawdzenie naprawy kompozytowej na samolocie, d) wynik sprawdzenia z zaznaczonymi uszkodzeniami

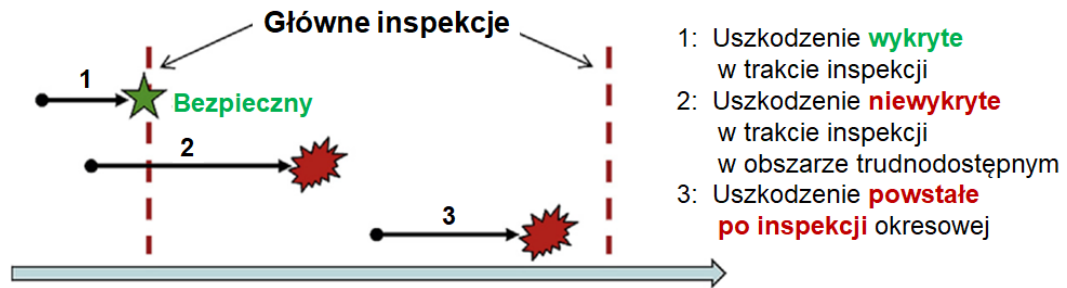
Dzięki wykonaniu badania z wykorzystaniem tej metody, można w przybliżeniu określić zarówno rozmiary poprzeczne jak też głębokość wad powierzchniowych

i podpowierzchniowych, takich jak pęknięcie, korozja czy rozwarstwienie połączeń klejonych, struktur kompozytowych oraz elementów z wypełniaczem komórkowym. Zastosowanie tej metody pozwala na ocenę stanu konstrukcji w dużym obszarze w trybie bezkontaktowym. Jednakże w przypadku detekcji uszkodzeń podpowierzchniowych, lub rozwijających się po niewidocznej stronie (np. wewnętrzna część poszycia skrzydła), badana struktura musi być względnie cienka i zbliżona do masy termicznej.

1.2. Systemy SHM przeznaczone do bieżącego monitorowania stanu technicznego struktury

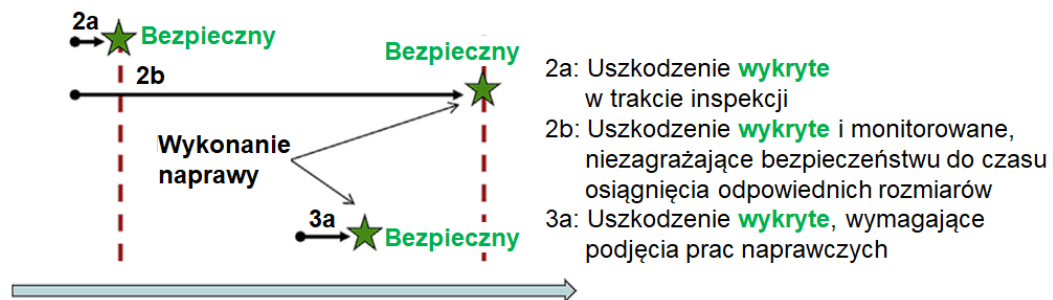
Koncepcja systemów SHM mająca na celu bieżącą detekcję oraz identyfikację uszkodzeń konstrukcji jest dedykowana do wykorzystania w wielu gałęziach przemysłu, takich jak lotnictwo i kosmonautyka, budownictwo i inżynieria lądowa (wieże, mosty), transport, energetyka (w tym wiatrowa) oraz wszędzie tam, gdzie nieprawidłowe działanie konstrukcji może spowodować zagrożenie lub doprowadzić do katastrofy [13]. Pierwotnie, techniki pomiarowe proponowane do zastosowania w systemach SHM miały głównie adaptować metody bazujące na badaniach nieniszczących NDT do ciągłego wykrywania uszkodzeń w miejscach największego ryzyka ich wystąpienia. Główną różnicą między systemami SHM i NDT jest tryb pracy – akwizycja danych w systemach SHM realizowana jest w krótkich odstępach czasu lub w czasie rzeczywistym w trakcie eksploatacji obiektu, przy pomocy czujników trwale zintegrowanych z elementami konstrukcji. Z kolei, w przypadku metod NDT weryfikacja stanu technicznego odbywa się wyłącznie w ramach przeglądów lub na żądanie użytkownika. W obu przypadkach, uszkodzenie zdefiniowane jest jako zmiana własności materiałowych lub geometrycznych elementu, która powinna być wykryta w możliwie najwcześniejszym stadium rozwoju [13][77][136].

Realizacja inspekcji jedynie w trybie okresowym, w ściśle zdefiniowanych interwałach czasowych, może współcześnie okazać się niewystarczająca ze względów bezpieczeństwa eksploatacji. W obliczu coraz częstszego wykorzystania nowoczesnych materiałów (np. struktur kompozytowych), zazwyczaj o odmiennych cechach propagacji uszkodzenia niż w przypadku klasycznych strukturach metalowych oraz dodatkowo podatnych na pewnego rodzaju uszkodzenia (np. od uderzeń), możliwe jest wystąpienie szybkiej degradacji konstrukcji. Możliwy czas wystąpienia uszkodzenia w odniesieniu do harmonogramu inspekcji zilustrowano na rys. 1.9.



Rys. 1.9 Możliwe przypadki wystąpienia uszkodzeń przy realizacji inspekcji okresowych [125]

Powszechne zastosowanie systemów SHM, ostrzegających na bieżąco o występowaniu uszkodzeń, pozwoliłoby na bardziej przewidywalne zarządzanie w zakresie obsługi floty i efektywniejsze wykorzystanie posiadanych w tym celu zasobów. Dodatkowa możliwość monitorowania propagacji uszkodzenia w czasie, pozwoli na optymalizację przeprowadzenia wymaganych napraw, zanim uszkodzenie osiągnie rozmiar krytyczny zagrażający bezpieczeństwu eksploatacji [6]. Zilustrowano to na rys. 1.10.



Rys. 1.10 Możliwe przypadki wystąpienia uszkodzeń przy wykorzystaniu SHM [125]

Opracowanie i zastosowanie systemów SHM wymaga wiedzy interdyscyplinarnej, z takich dziedzin podstawowych jak mechanika, elektronika, informatyka i materiałoznawstwo, w połączeniu z wiedzą o obiekcie i historii jego eksploatacji. Z uwagi na tę interdyscyplinarność, projektowanie systemów SHM dla konkretnego obiektu wymaga dedykowanego podejścia, uwzględniając specyfikę jego konstrukcji, znając lub szacując lokalizacje rozwoju uszkodzeń i ich spodziewany typ. Systemy SHM mogą być implementowane zarówno na nowych obiektach, jak i takich z już rozpoczętą historią eksploatacji, w celu np. przedłużenia ресурсu technicznego w przypadkach ekonomicznie uzasadnionych [61][135].

Architektura systemu SHM zależy również m.in. od przewidywanego rodzaju wykrywanych uszkodzeń oraz materiałów zastosowanych do budowy obiektu, co ma

bezpośredni wpływ na wybór metody detekcji. Złożoność budowy systemów SHM podyktowana jest lokalną naturą typowych uszkodzeń materiałowych, które w początkowym stadium rozwoju mogą co najwyżej nieznacznie wpływać na odpowiedź całego obiektu mierzoną w warunkach eksploatacyjnych. Wymaga to dokładnego doboru zarówno rodzaju jak i topologii zintegrowanej sieci sensorycznej w taki sposób, aby system spełniał swoje podstawowe zadanie. Dopiero wtedy możliwy jest wybór adekwatnego układu akwizycji, przetwarzania i archiwizacji danych pomiarowych oraz strategii eksploatacji systemu przez użytkownika w warunkach operacyjnych [133].

Technologia SHM jest opracowywana głównie w celu osiągnięcia większego bezpieczeństwa użytkowania obiektów. Lecz prezentuje również potencjał by obniżyć koszty utrzymania i eksploatacji, ponieważ pozwala na przewidywanie/prognozowanie pojawienia się awarii na długo przed jej wystąpieniem i w rezultacie pozwala obsłużyć na odpowiednie zaplanowanie remontów i napraw.

Zadania układów SHM mogą być sklasyfikowane jako proces składający się z następujących poziomów [34]:

- poziom I – detekcja uszkodzenia;
- poziom II – lokalizacja uszkodzenia;
- poziom III – identyfikacja wielkości uszkodzenia;
- poziom IV – predykcja pozostałego czasu pracy;

Typowy system SHM zawiera część sprzętową i część programową. Część sprzętowa składa się z: czujników, układu akwizycji danych i układu obliczeniowego przeznaczonego do implementacji algorytmów wnioskowania. Komponenty te są zintegrowane i pracują w sposób autonomiczny. Zastosowanie takiego rozwiązania wymusza szereg dodatkowych działań i analiz (rys. 1.11, rys. 1.12), do których między innymi należą:

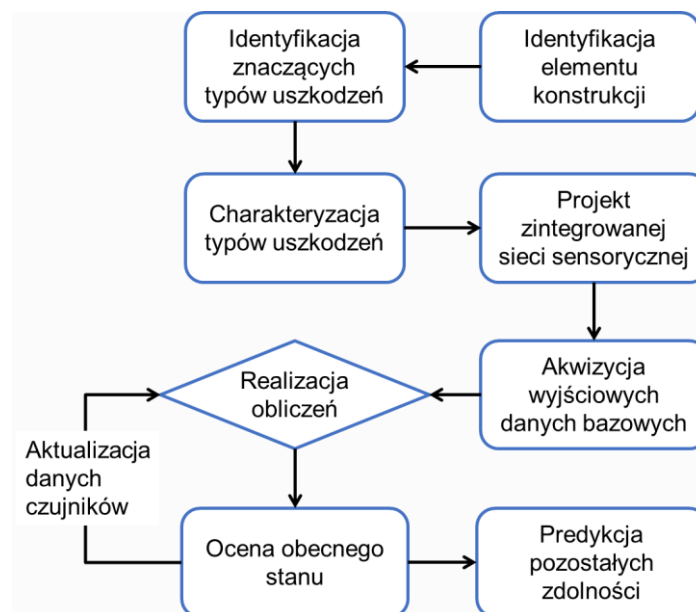
- montaż dodatkowego i często rozbudowanego okablowania;
- zapewnienie zasilania zarówno do bloku akwizycji i przetwarzania, jak i do samych czujników;
- konieczność miniaturyzacji czujników i elektroniki;
- zapewnienie trwałej integracji sensorów ze strukturą;
- przeprowadzenie badań w zakresie skuteczności i wiarygodności detekcji uszkodzeń;
- zabezpieczenie elementów systemu przed negatywnym wpływem środowiska;

- przeprowadzenie badań kwalifikacyjnych systemu przeznaczonego do pracy w warunkach operacyjnych.

Z kolei, część programowa zawiera podstawowe algorytmy przetwarzania sygnałów, sterowania pracą systemu, detekcji uszkodzeń strukturalnych i prognozy pozostałego czasu bezpiecznej pracy. W bardziej zaawansowanych układach część programowa może być również odpowiedzialna za zarządzanie stanem obiektu.



Rys. 1.11 Zestawienie kluczowych elementów systemu SHM i ich cech użytkowych [11]



Rys. 1.12 Proces wymagany do opracowania systemu SHM [13]

Jak dotąd, nie opracowano kompleksowego systemu SHM. Większość zaproponowanych rozwiązań rozstrzyga tylko część problemów, i rzadko prezentuje wyższy poziom gotowości technologicznej pozwalający na wdrożenie, zwłaszcza na statkach powietrznych. Indywidualnie podchodzi się do wyboru metody pomiarowej, akwizycji i rejestracji danych, analizy informacji oraz opracowania korelacji pomiędzy wskaźnikami opartymi na danych, a potencjalnym uszkodzeniem. Dodatkowo, trzeba zapewnić odpowiednią ochronę elementów systemu przed trudnymi warunkami otoczenia, które mogą powodować zafałszowanie końcowych wyników. Ponadto duża powierzchnia konstrukcji lotniczych, w których mogą wystąpić różne typy uszkodzeń, wymaga zastosowania rozbudowanej sieci czujników. Wpływa to na konieczność analizy znacznych ilości danych, i nawet przy obecnym poziomie technicznym ogranicza to możliwość pełnej automatyzacji tego procesu. Nie można także pominąć konieczność spełnienia wymogów formalnych, które wpływają na skomplikowany i długoterminowy proces certyfikacji wyrobów lotniczych.

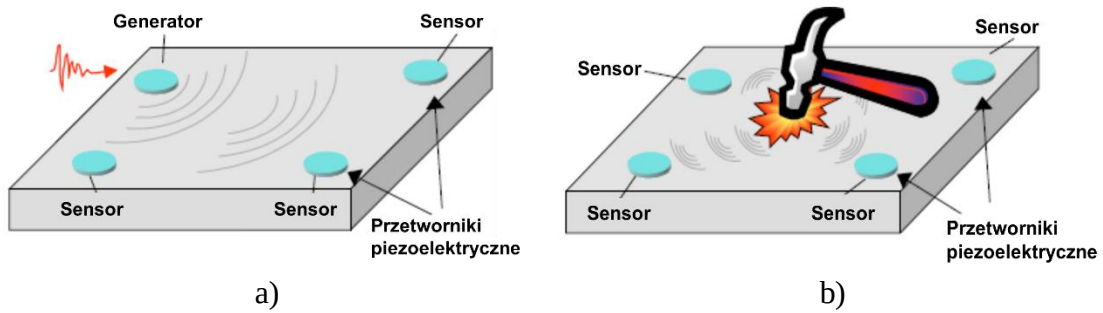
1.2.1. Rozwinięte techniki SHM

1.2.1.1. Metody bazujące na ultradźwiękach i emisji akustycznej

Monitorowanie stanu technicznego za pośrednictwem przetworników piezoelektrycznych PZT jest jedną z najbardziej obiecujących metod przeznaczonych do zastosowania na statkach powietrznych. Wykorzystuje się w niej pierwotne i wtórne zjawisko piezoelektryczne, gdzie odkształcenia mechaniczne czujnika wytwarzają różnicę potencjału elektrycznego na brzegach czujnika, lub na odwrót – przyłożone zmienne pole elektryczne prowadzi do odkształcenia czujnika i wzbudzenia fal mechanicznych w badanym elemencie [55]. Popularność zastosowania przetworników piezoelektrycznych w systemach SHM, podobnie jak w przypadku metod NDT, spowodowana jest możliwością detekcji uszkodzeń różnego typu, co doprowadziło do rozwinięcia wielu sposobów ich wykorzystania.

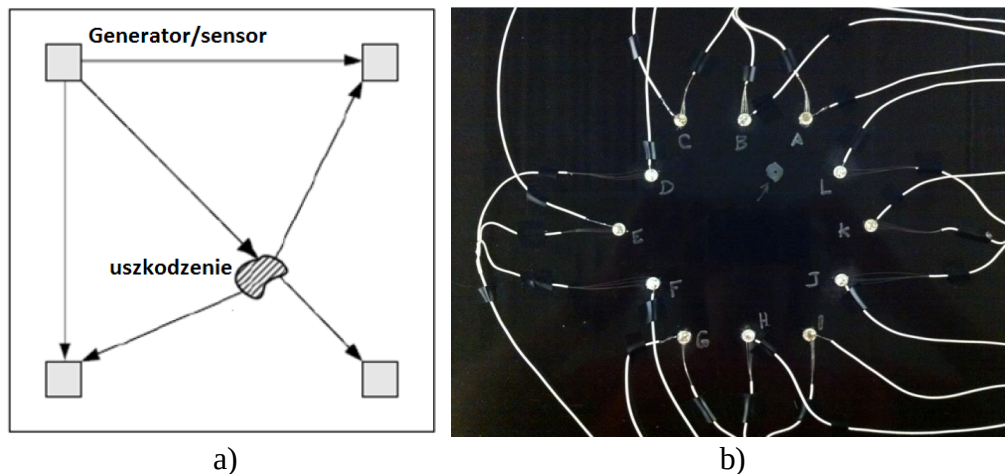
Zastosowanie przetworników piezoelektrycznych w systemach SHM dzieli się na (rys. 1.13):

- techniki aktywne, w których korzysta się z możliwości sterowania lokalnymi odkształceniami struktury, dzięki odwrotnemu efektowi piezoelektrycznemu;
- pasywne techniki monitorowania, wykorzystujące pierwotny efekt piezoelektryczny i generacyjną własność przetworników.



Rys. 1.13 Techniki pomiarowe z wykorzystaniem przetworników piezoelektrycznych, a) aktywna; b) pasywna [11]

Jednym z najpopularniejszych kierunków rozwoju systemów SHM, jest wykorzystanie aktywnych sieci piezoelektrycznych przetworników ceramicznych, pozwalających wzbudzać i rejestrować w badanej strukturze sprężyste fale prowadzone GW (z ang. Guided Waves) [41][109][133][136][137]. Metoda ta nawiązuje do metody ultradźwiękowej z grupy NDT, lecz różni się rodzajem wykorzystywanych fal, zakresem częstotliwości wzbudzenia, oraz trwałą integracją przetworników piezoelektrycznych ze strukturą, które zorganizowane są w postaci węzła pomiarowego (rys. 1.14). Węzeł pomiarowy to kilka przetworników (min. 2, zazwyczaj około 4÷8 sztuk), które są zintegrowane ze strukturą badanego elementu przy użyciu połączenia adhezyjnego, zgodnie z przyjętą topologią sieci (np. kwadratu, hekosa- lub oktogonalną, po okręgu).

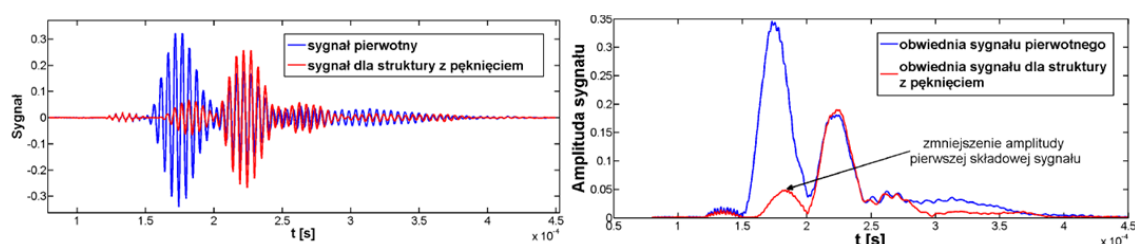


Rys. 1.14 Węzeł pomiarowy aktywnej sieci przetworników piezoelektrycznych a) schemat węzła 4 elementowego b) przykład panelu kompozytowego z zainstalowanymi przetwornikami [66]

W ramach akwizycji danych z węzła, jeden z przetworników pełni rolę generatora fal prowadzonych, które propagują w konstrukcji. Pozostałe przetworniki są sensorami, które odbierają to wymuszenie mechaniczne i przetwarzają je na sygnał pomiarowy. Z uwagi na własność przetworników piezoelektrycznych, każdy z nich może iteracyjnie

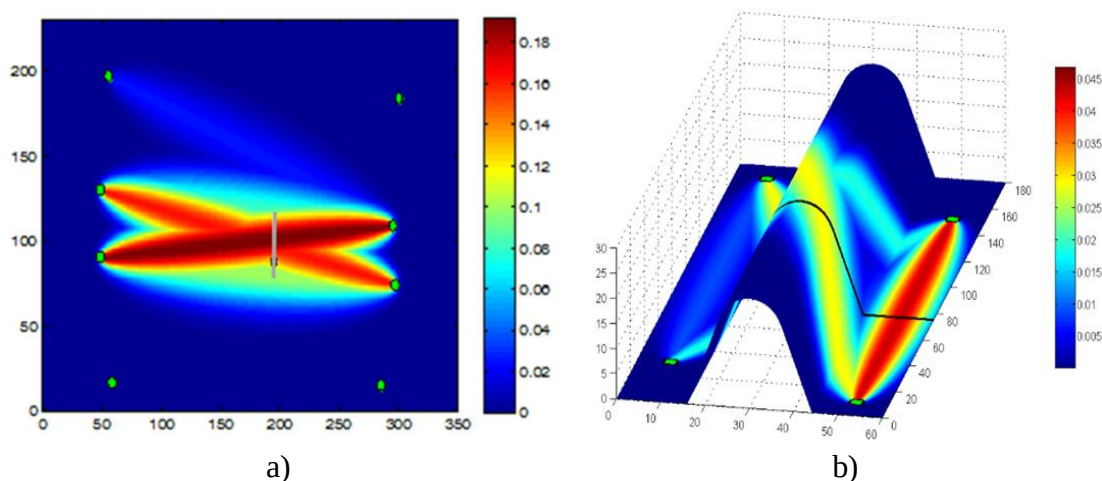
pełnić rolę zarówno generatora, jak i odbiornika wymuszenia, jeśli aparatura to umożliwia. Gdy wewnątrz węzła pomiarowego zacznie propagować uszkodzenie, fale prowadzone będą podlegać odbiciu, refrakcji, dyspersji oraz/lub tłumieniu, a charakterystyki sygnału rejestrowane przez sensory ulegną zmianie w porównaniu do stanu bez uszkodzenia.

W przypadku rzeczywistych elementów konstrukcyjnych, duża liczba naturalnych źródeł rozpraszania sygnału, jak np. połączenia nitowe, zakrzywienia geometrii monitorowanego elementu, czy występowanie krawędzi oraz otworów technologicznych, znacząco komplikuje postać rejestrowanych sygnałów. Z tego powodu, dane zmierzone przez przetworniki piezoelektryczne nie pozwalają zazwyczaj na bezpośrednią ocenę stanu struktury (rys. 1.15). Wymagane jest do tego porównanie otrzymywanego sygnału z sygnałem referencyjnym, (z ang. baseline), zarejestrowanym dla wyjściowego stanu konstrukcji, po zainstalowaniu sieci pomiarowej.



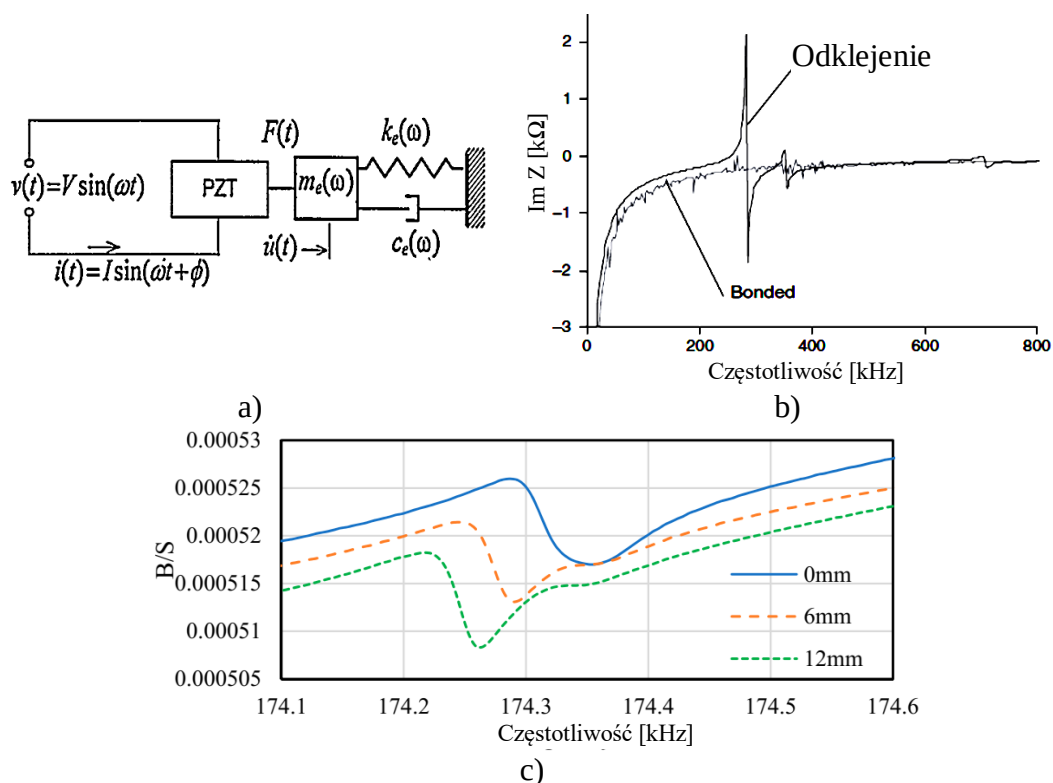
Rys. 1.15 Przykład zmiany sygnału dla pary przetworników PZT po wystąpieniu uszkodzenia w porównaniu do sygnału dla struktury nieuszkodzonej [29]

W celu automatyzacji wnioskowania o stanie konstrukcji, konieczne jest opracowanie tzw. wskaźników uszkodzeń DI (z ang. Damage Index) [16][31][137], czyli pewnych charakterystyk otrzymanych z porównania sygnału bieżącego i referencyjnego za pomocą operacji matematycznych. Wskaźniki te mogą być oparte na przykład na wyznaczeniu różnic czasowych dotarcia wymuszenia do przetwornika, energii odebranego sygnału [26][102], lub kształcie jego obwiedni [39]. Informacje o stanie technicznym obszaru monitorowanego przez dany węzeł sieci, uzyskiwane są poprzez porównanie wskaźników uszkodzeń dla wszystkich ścieżek pomiarowych sieci. Na podstawie przyjętych do analizy wskaźników, stosowane są różne sposoby wizualizacji uzyskanej informacji. Jednym z nich jest algorytm rekonstrukcyjny RAPID [30][37] (z ang. Reconstruction Algorithm for Probabilistic Inspection of Damage). Pozwala on na zilustrowanie lokalizacji uszkodzenia za pomocą tzw. map ciepła, co pokazano na rys. 1.16.



Rys. 1.16 Sposób wizualizacji danych o uszkodzeniu ze zintegrowanej sieci przetworników piezoelektrycznych a) struktura płaska b) element konstrukcyjny [30]

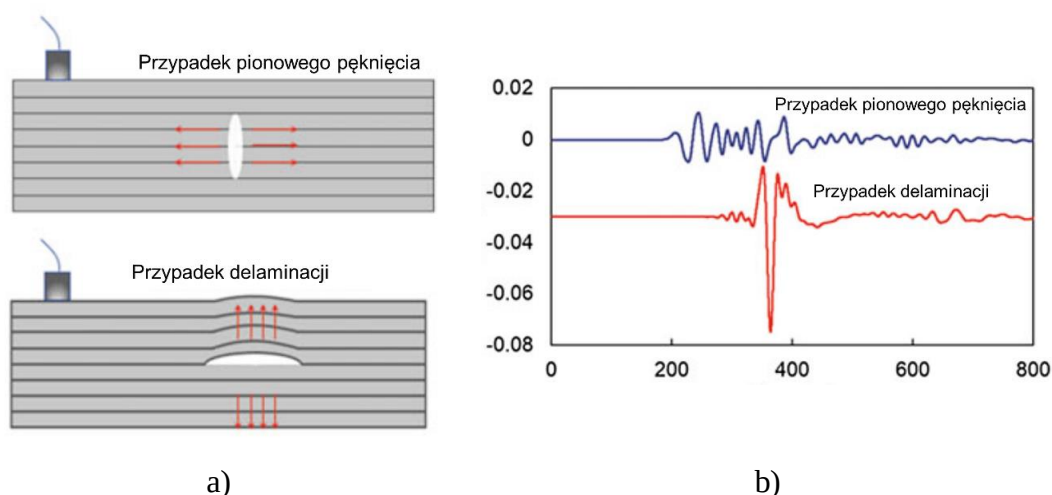
Innym przykładem aktywnej metody wykorzystania przetworników piezoelektrycznych jest metoda EMI (z ang. Electro-Mechanical Impedance). Wykorzystuje się w niej pojedynczy piezoelement zainstalowany na monitorowanej strukturze, dla którego okresowo mierzy się charakterystykę impedancji w określonym zakresie częstotliwości [39][132]. Schemat takiego układu oraz przykładowy zestaw danych przedstawiono na rys. 1.17. Zintegrowany z konstrukcją przetwornik piezoelektryczny zasilany jest przemiennym napięciem $v(t)$ o częstości ω , wywołując harmoniczne odkształcenia struktury. W zależności od lokalnych właściwości sprężystych badanego obszaru i sprzężenia elektromechanicznego elementu z przetwornikiem (rys. 1.17b), otrzymuje się informację w postaci składowych impedancji Z przetwornika sprzężonego ze strukturą. Amplituda oraz faza mierzonej charakterystyki częstotliwościowej może ulegać zmianie wraz z rozwojem uszkodzeń (rys. 1.17c). Rejestrowana odpowiedź częstotliwościowa układu jest z reguły dość skomplikowana, dlatego do wnioskowania o stanie struktury stosuje się często pewne charakterystyki porównawcze zarejestrowanych profili. Opracowuje się je na podstawie zestawienia odpowiedzi przetwornika dla bieżącego stanu konstrukcji z profilem referencyjnym, zarejestrowanym po instalacji przetwornika na strukturze. Metoda EMI umożliwia detekcję uszkodzenia w ograniczonym obszarze w otoczeniu przetwornika, lecz jest czuła nie tylko na pęknięcia, ale również na odklejenia i rozwarstwienia struktur kompozytowych [18][50]. Może również służyć do monitorowania stanu przyklejenia napraw [20], czy też do weryfikacji poprawności działania i pewności mocowania przetworników piezoelektrycznych w ramach węzła pomiarowego.



Rys. 1.17 Metoda impedancji elektromechanicznej:

- a) model połączenia przetwornika PZT z badaną strukturą;
- b) zmiana charakterystyki impedancji dla uszkodzonej warstwy adhezyjnej przetwornika
- c) zmiana fragmentu charakterystyki admittancji przy propagacji pęknięcia [152]

W ramach technik pasywnych monitorowania struktury za pomocą przetworników piezoelektrycznych, intensywnie rozwijana jest metoda emisji akustycznej AE (z ang. Acoustic Emission) [2][57][128][154]. Metoda ta wykorzystuje pierwotny efekt piezoelektryczny, tzw. pojawienie się na powierzchni przetwornika ładunku elektrycznego pod wpływem oddziaływania mechanicznego. Dzięki dużej czułości, zastosowanie tej metody w czasie rzeczywistym pozwala na monitorowanie zjawisk degradacji, niemożliwych do zarejestrowania w inny sposób. Pomiar polega na rejestracji i analizie fal sprężystych, które są naturalnie wzbudzane w strukturze przez procesy nieodwracalne, takie jak zarodkowanie i propagacja pęknięcia, czy inne zjawiska którym towarzyszy uwalnianie energii, co pokazano na rys. 1.18. Sygnały te są rejestrowane przez przetwornik i zamieniane na sygnał elektryczny, który po analizie dostarcza informacji o lokalizacji i typie źródła.



**Rys. 1.18 a) Przykład pionowego pęknięcia oraz delaminacji struktury kompozytowej
b) typowy przebieg sygnału AE w trakcie detekcji tych uszkodzeń [2]**

Przy pomiarze metodą AE wymagane jest stosowanie dedykowanej aparatury pomiarowej, pozwalającej realizować akwizycję danych ze znaczną częstotliwością próbkowania, wysoką dynamiką i rozdzielnością. Fale generowane w trakcie zjawisk nieodwracalnych charakteryzują się częstotliwością w zakresie od kilkudziesięciu do kilkuset kHz, a wartość międzyszczytowa napięcia dochodzi do 20 V. Specyfikacja takiej aparatury jest więc zbliżona do parametrów oscyloskopu, co dodatkowo generuje bardzo duże ilości danych.

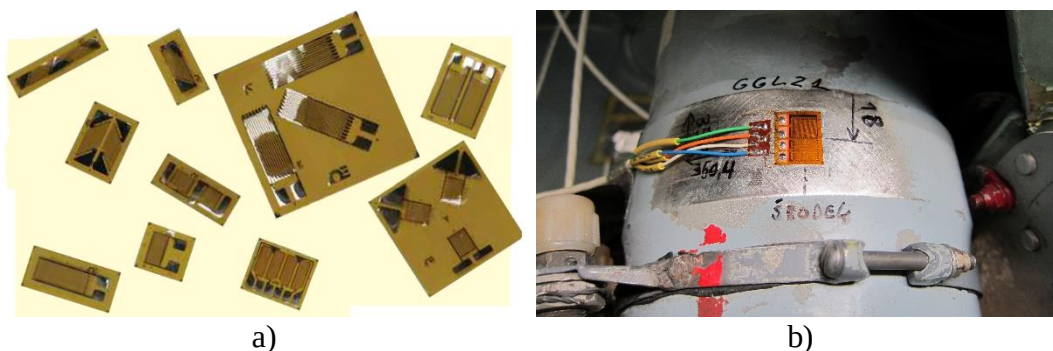
Jednakże, zaleta wysokiej czułości metody AE na detekcję nawet uszkodzeń w skali mikro w warunkach laboratoryjnych, jest jednocześnie wadą w warunkach rzeczywistych. Źródła fal dźwiękowych pochodzących od współpracujących ze sobą elementów (np. keson skrzydła), szum i drgania również będą mierzone przez przetwornik, co może wpływać na obniżenie skuteczności detekcji uszkodzenia.

Rozważaną aplikacją niniejszej metody w warunkach operacyjnych jest detekcja nagłych zdarzeń pochodzących od uderzeń (z ang. impact detection). Przetworniki piezoelektryczne charakteryzują się w tym zakresie lepszą dynamiką niż czujniki wibracji czy przyspieszeń, a dodatkowo nie wymagają zewnętrznego źródła zasilania. Układy tego typu są szczególnie przydatne w przypadku monitorowania struktur kompozytowych, gdzie trudne do zaobserwowania uszkodzenia o nazwie BVID [40] (z ang. Barely Visible Impact Damage) może skutkować delaminacją włókien i znacznym obniżeniem wytrzymałości resztkowej elementu. Dobrym przykładem zastosowania tej metody jest na przykład wykrycie zdarzenia polegającego na zderzeniu z ptakiem. Liczba takich zdarzeń już jest niebagatelna, a prawdopodobieństwo ich wystąpienia wzrasta z ilością

realizowanych operacji powietrznych. W latach 2010÷18 tylko w USA zareportowano ponad 100 000 tego typu sytuacji, i statystycznie około 16% z nich prowadzi do uszkodzenia statku powietrznego [25].

1.2.1.2. Metody bazujące na pomiarze odkształceń

Z uwagi na dostępność aparatury przeznaczonej do realizacji pomiaru odkształceń i znaczącą użyteczność informacji, którą w ten sposób można uzyskać, obecnie stosowane metody monitorowania stanu technicznego bazują lub intensywnie wykorzystują dane z czujników odkształceń. Do niedawna najczęściej w tym celu stosowano czujniki tensometryczne o różnych typach i konfiguracjach kanału pomiarowego [56][75]. Tensometry są czujnikami parametrycznymi, rezystancyjnymi, budowanymi w postaci cienkich drutów, siatek lub folii wykonanych z metalu lub półprzewodnika. Poddane działaniu sił zewnętrznych ulegają one odkształceniu i zmieniają swoje wymiary geometryczne, czego następstwem jest zmiana ich rezystancji. W tensometrii rezystancyjnej wykorzystywane jest zjawisko fizyczne zmiany rezystancji przewodnika (siatki pomiarowej tensometru) pod wpływem odkształceń. Po poprawnym zamocowaniu tensometru w wybranym miejscu, przy użyciu specjalnego kleju, odkształcenia czujnika i odpowiedniego obszaru badanego elementu są praktycznie jednakowe. Metoda ta jest dobrze uwarunkowana metrologicznie, i umożliwia uzyskanie informacji o sprężystej deformacji elementów konstrukcyjnych np. statku powietrznego, które dalej mogą być przetworzone na wartości naprężenia, sił i momentów oddziałujących na strukturę (rys. 1.19).



Rys. 1.19 Czujnik tensometryczny a) przykłady konfiguracji, b) przykład zastosowania na goleni głównej samolotu odrzutowego

Zmiana rezystancji czujnika tensometrycznego jest mierzona przez układ elektryczny, najczęściej w postaci mostka Wheatstone'a, i jest proporcjonalna do deformacji elementu. Zaletą czujników tensometrycznych jest wysoka czułość

pomiaru, co pozwala na pomiar bardzo małych odkształceń względnych z dokładnością do $\varepsilon = 10^{-6}$ m/m, co dla stali odpowiada naprężeniu $\sigma = 1$ N/mm². Dodatkowo, czujniki te charakteryzują się niewielką masą, pozwalającą na badanie zjawisk dynamicznych, oraz niewielkimi wymiarami, dzięki czemu mogą być stosowane w trudno dostępnych miejscach. Natomiast wadami stosowania czujników tensometrycznych jest czasochłonny proces instalacji oraz wrażliwość na zmiany temperatury i wilgotności.

Czujniki tensometryczne znajdują zastosowanie w ciągłym monitorowaniu konstrukcji lotniczych, szczególnie jako sposób monitorowania obciążeń eksploatacyjnych OLM (z ang. Operational Load Monitoring), niż jako bezpośrednia metoda detekcji uszkodzeń takich jak pęknięcia. W Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych został opracowany i wdrożony do eksploatacji System Monitorowania Obciążeń (SMO) dla samolotów Su-22UM3K, gdzie na bazie wskazań zintegrowanej sieci czujników, w czasie rzeczywistym mierzone są obciążenia eksploatacyjne dla połączenia skrzydło-kadłub oraz podwozia głównego. Dane te następnie podlegają analizie na stanowisku naziemnym, w celu wyznaczenia bieżącego profilu eksploatacji tych samolotów, nalotu ekwiwalentnego, szacowania trwałości resztkowej oraz detekcji zdarzeń o charakterze stochastycznym, np. twardych lądowań [81].

Obecnie, coraz powszechniej stosowaną metodą pomiaru odkształceń są różnego typu rozwiązania światłowodowe FOS (z ang. Fiber Optical Sensors), w których wykorzystuje się światło prowadzone w włóknie światłowodowym jako medium transmisji. Czujniki światłowodowe mogą być zastosowane do pomiaru takich wielkości fizycznych, jak odkształcenia, temperatura, ciśnienie czy przyspieszenie [86]. Jedną z głównych zalet tej grupy czujników są ich niewielkie wymiary, rzędu dziesiątek mikrometrów, co pozwala na ich stosunkowo łatwą integrację ze strukturą. W ciągu ostatnich lat zaprezentowano wiele potencjalnych zastosowań czujników FOS, przeznaczonych do detekcji uszkodzeń zwłaszcza konstrukcji kompozytowych [70], takich jak rozwarstwienia, odklejenia i uderzenia. W elementach kompozytowych, przewody światłowodowe mogą być skutecznie implementowane wewnątrz struktury już na etapie jej wytwarzania, co pozwala na monitorowanie procesu jej wytwarzania i oceny jej stanu technicznego jeszcze przed montażem końcowym [38].

Z grupy czujników FOS, najpowszechniej stosowane są tzw. siatki Bragga FBG (z ang. Fiber Bragg Grating), stosowane zwłaszcza w aplikacjach pomiaru odkształceń i temperatury. Czujniki FBG powstają poprzez wystawienie rdzenia światłowodu na działanie modulowanego przestrzennie wzoru, generowanego przy pomocy światła

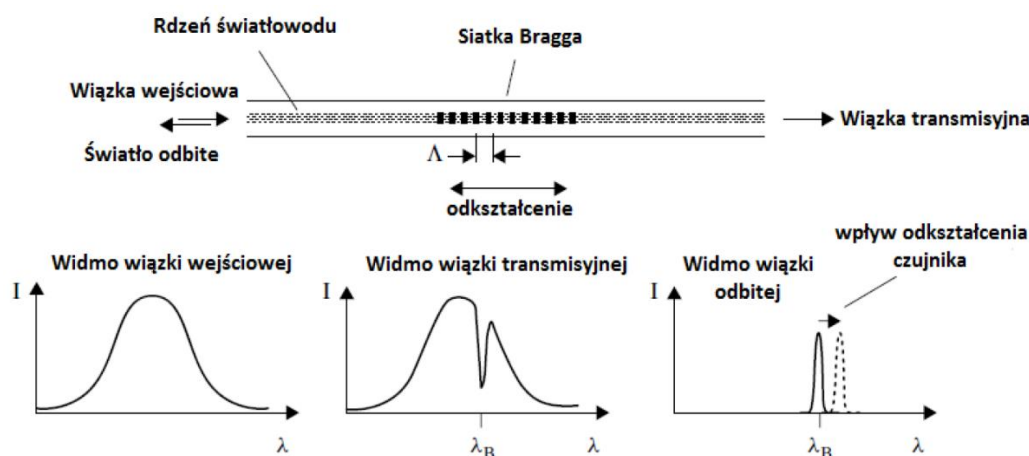
ultrafioletowego. Powstały w ten sposób czujnik powoduje modulację współczynnika załamania światła w rdzeniu światłowodu oraz częściowo odbija określone długości fal światła wejściowego do przewodu [106][110]. Dzięki zachowaniu periodyczności współczynnika załamania światła na tak przygotowanym obszarze, dla odpowiedniej długości fali dochodzi do interferencji światła odbitego od poszczególnych jego elementów. Dla spełnienia warunku interferencji, skala periodyczności sieci Λ musi być wielokrotnością połowy długości fali selektywnie odbijanego światła λ_B :

$$\Lambda = m \cdot \frac{\lambda_B}{2}, m = 1, 2, 3 \dots \quad (1.1)$$

Stąd uwzględniając współczynnik załamania światła rdzenia światłowodu n , graniczna wartość λ_B w próżni definiowana jest poprzez tzw. warunek Bragga:

$$\lambda_B = 2 \cdot n \cdot \Lambda \quad (1.2)$$

Na rys. 1.20 przedstawiono zasadę pomiaru odkształceń za pomocą czujników FBG. Na wejście przewodu światłowodowego, na którym znajdują się naniesione siatki Bragga, wprowadzone jest światło o odpowiednim zakresie spektralnym. Własności poszczególnych czujników FBG są tak dobierane, aby każdy z nich odbijał selektywnie światło o różnej długości fali, co pozwala na ich identyfikację. Naprężenia konstrukcji powodują odkształcenia związanych sztywno z podłożem czujników oraz zmianę skali periodyczności sieci Λ każdego z nich. Zgodnie z warunkiem Bragga, przekłada się to na zmianę długości fali światła selektywnie odbijanego przez czujniki, co pozwala na precyzyjny pomiar odkształceń struktury w poszczególnych lokalizacjach.



Rys. 1.20 Zasada działania czujników FBG

Zalety czujników FBG, takie jak ich nieczułość na interferencje elektromagnetyczne [27], stabilność działania w szerokim zakresie temperatur i surowych warunkach środowiskowych [104] oraz możliwość umieszczenia kilku-kilkunastu czujników

wewnątrz jednego światłowodu (ograniczenie ilości kanałów pomiarowych i wiązek przewodów) sprawiają, że technika ta jest atrakcyjną alternatywą dla czujników tensometrycznych oraz termopar. Jednakże, za stosowaniem technik klasycznych przemawia znaczna przewaga ekonomiczna, z uwagi na wysokie koszty zakupu światłowodowego toru pomiarowego z czujnikami FBG.

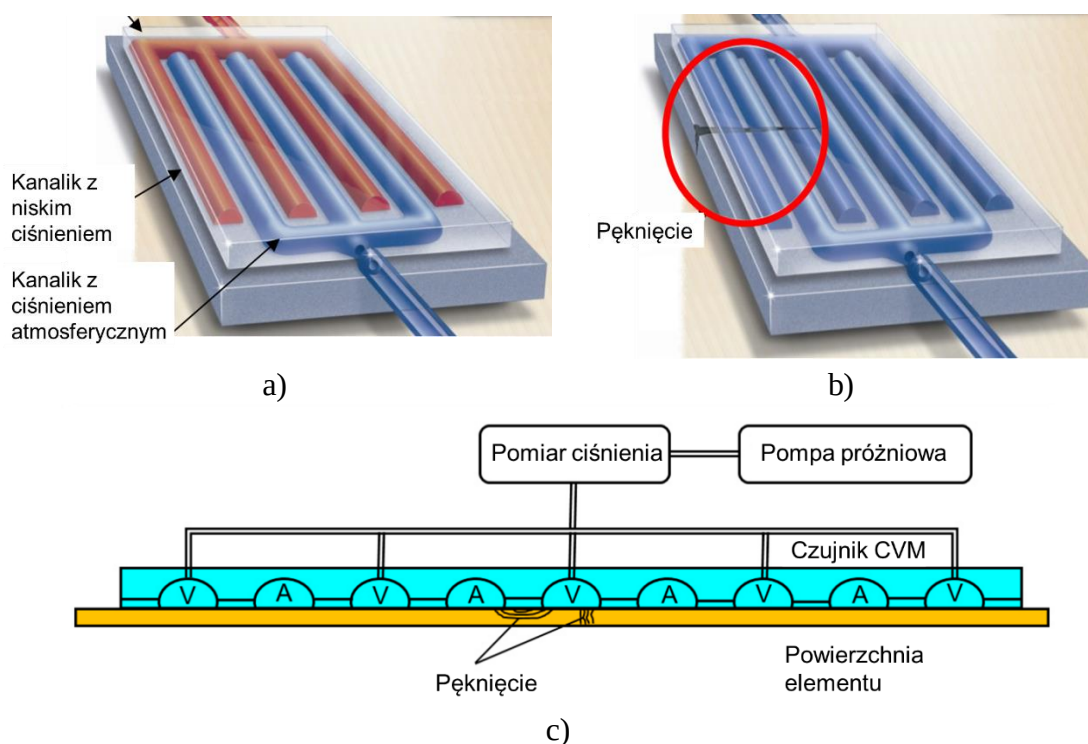
Działanie czujników z grupy FOS zostało potwierdzone w aplikacjach lotniczych, lecz jest głównie ograniczone do pomiaru odkształceń konstrukcji. Zademonstrowano m. in. system pomiarowy z siecią czujników FBG przeznaczonych do analizy w czasie rzeczywistym deformacji skrzydła samolotu z milimetrową rozdzielczością[151], w trakcie wykonywania manewrów w powietrzu. Wykorzystano sieć ponad 780 czujników FBG do analizy obciążeń kadłuba oraz odkształceń skrzydła podczas oddziaływania siłami zewnętrznymi o różnej intensywności. W kolejnym badaniu, zrealizowano pomiar odkształceń skrzydła samolotu typu „ultralight” wykonanego z kompozytu węglowego [94]. Istotnym krokiem do powszechniejszego zastosowania czujników FBG w monitorowaniu obciążeń eksploatacyjnych było przeprowadzenie badań kwalifikacyjnych opracowanych włókien światłowodowych dla warunków operacyjnych statku powietrznego.

Jak wspomniano na wstępie, metody monitorowania stanu technicznego oparte o pomiar odkształceń znajdują głównie zastosowanie w pomiarze obciążeń eksploatacyjnych konstrukcji. Uszkodzenie, na przykład w postaci pęknięcia, może w dużym stopniu obniżyć wytrzymałość konstrukcji. Jednakże dopóki jego rozmiar nie będzie znaczny, nie wpłynie to znacząco na rozkład pola odkształceń elementu. Z tego powodu, jeśli czujnik odkształceń nie znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie pęknięcia, wskazania systemu monitorowania mogą przybrać postać fałszywie negatywną. Sposobem na zwiększenie czułości systemu tego typu, może być wykorzystanie gęsto rozmieszczonej sieci czujników FBG. Dzięki temu, na podstawie zbiorczej informacji o wzajemnych zależnościach pomiędzy odkształceniami w różnych lokalizacjach, można wnioskować o ewentualnych uszkodzeniach struktury [130].

1.2.1.3. Metoda CVM

Metoda Porównawczego Monitorowanie Podciśnienia CVM (z ang. Comparative Vacuum Monitoring) jest stosunkowo nową techniką pomiarową, pozwalającą na wykrywanie inicjacji pęknięć w strukturze. Opracowano ją specjalnie do

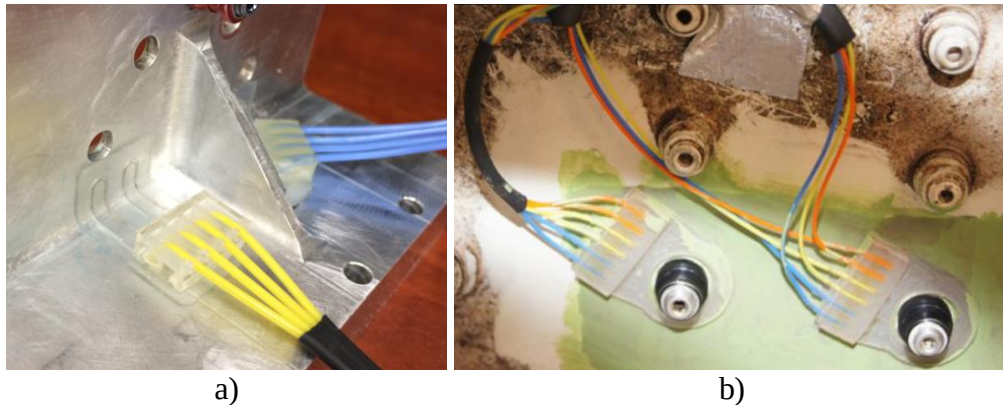
wykorzystania w celu monitorowania pęknięć struktur i elementów statków powietrznych [122]. Głównym elementem tej techniki pomiarowej jest elastyczny, samoprzylepny czujnik, wykonany z silikonu, kauczuku lub innego tworzywa sztucznego, który umożliwia dopasowanie się do badanej powierzchni. Na dolnej stronie czujnika znajdują się laserowo wycięte dwie grupy połączonych kanalików powietrznych, ułożonych naprzemiennie. Po przyklejeniu czujnika do powierzchni, w jednej grupie kanalików panuje stałe ciśnienie atmosferyczne, a w drugiej grupie możliwe jest wytworzenie niskiej próżni przy użyciu dedykowanego urządzenia (rys. 1.21a). W stanie bez uszkodzenia, po wytworzeniu próżni, w szczelnych kanalikach powietrznych możliwe jest uzyskanie stabilnego, niskiego ciśnienia. W stanie z uszkodzeniem, gdy pęknięcie propaguje pod czujnikiem, nastąpi fizyczne połączenie kanalıka szczelnego z sąsiadującym, w którym panuje ciśnienie atmosferyczne (rys. 1.21b). Uniemożliwi to uzyskanie próżni w kanalikach szczelnych, co świadczy o wystąpieniu pęknięcia propagującego pod czujnikiem uszkodzeniu (rys. 1.21c).



Rys. 1.21 Metoda detekcji pęknięcia przy użyciu CVM, a) stan bez uszkodzenia, b) stan z uszkodzeniem, c) elementy systemu monitorowania [139]

Czujniki wykorzystywane w metodzie CVM są elementami pasywnymi i nie wymagają doprowadzenia zewnętrznego źródła zasilania. Energia elektryczna jest potrzebna jedynie dla mobilnej części systemu, składającej się z modułu przeznaczonego

do wytwarzania niskiej próżni, ciśnieniomierza oraz modułu rejestracji danych. Ta część systemu jest okresowo podłączana do zestawu czujników w momencie przeprowadzania inspekcji. Metoda jest przeznaczona do sprawdzania miejsc podejrzanych o powstawanie pęknięć zmęczeniowych. Jej głównym ograniczeniem jest fakt, że gdy czujnik po raz pierwszy wykryje uszkodzenie, to nie jest już w stanie dalej pełnić swojej funkcji. Zatem za pomocą tej metody możliwe jest jedynie wykrycie pęknięcia, a nie śledzenie propagacji. Dlatego czujniki CVM mogą być stosowane w miejscach, gdzie niebezpieczne jest samo pojawienie się uszkodzenia bez określania długości krytycznej (rys. 1.22). Dodatkowo, konieczne jest zachowanie szczelności układu na połączeniach i samych przewodach biorących udział w odsysaniu powietrza, aby uniknąć wskazań fałszywie pozytywnych.



Rys. 1.22 Przykłady zastosowania czujników CVM w konstrukcjach lotniczych [120]

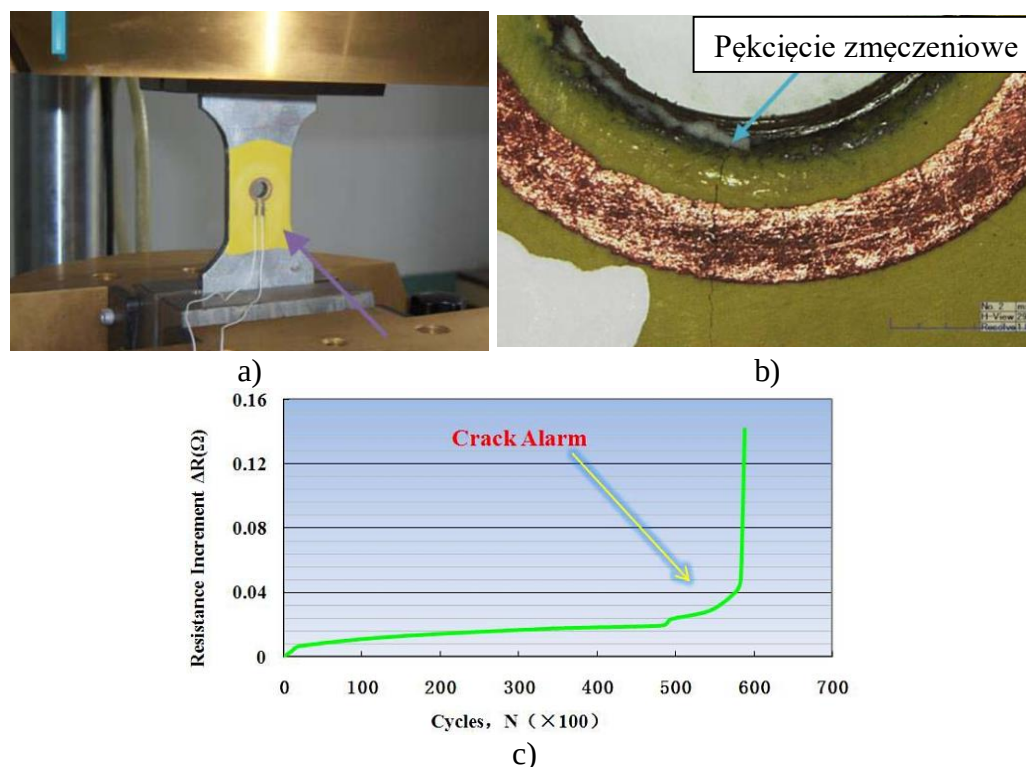
Na uwagę zasługuje fakt, że metoda ta, jako jedyna z wcześniej wymienionych, została wdrożona do eksploatacji na kilkunastu samolotach Boeing 737 przy współpracy z firmą Boeing na zlecenie przewoźnika Delta Airlines. Wykorzystywana jest ona do monitorowania pęknięć na połączeniu skrzydła z kadłubem [120]. Firma Airbus dodatkowo sprawdziła możliwość zastosowania metody CVM w innym obszarach samolotu, do monitorowania połączeń zakładkowych i spawanych [134].

1.2.2. Nowe metody SHM na wczesnym etapie rozwoju

Metody przedstawione w części - 28 -1.2.1 rozprawy stanowią główny przedmiot badań dotyczących opracowania skutecznej metody monitorowania stanu technicznego np. statków powietrznych. W przeważającej większości są to metody wywodzące się z grupy badań nieniszczących NDT. Jednakże, w ciągu ostatnich lat pojawiło się kilka interesujących rozwiązań, wykorzystujące inne podejście do realizacji zadania detekcji

uszkodzeń elementów konstrukcyjnych. Większość z nich oparta jest na wykorzystaniu nowych czujników pojemnościowych i rezystancyjnych, wytworzonych z takich materiałów jak alotropowe odmiany węgla (nanorurki, grafit, grafen) lub mikro- i nanocząsteczki metaliczne (głównie srebro i miedź) w formie dodatków, past czy tuszy do nanoszenia na warstwach nośnych.

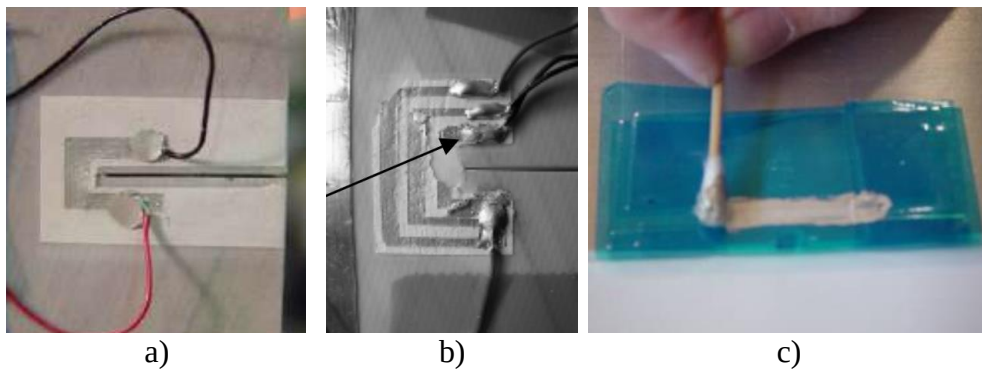
Przykładowo, w pracach [60] i [95] jako czujnik detekcji pęknięć wykorzystano warstwę czułą wytworzoną z zawiesiny wodno-etanolowej z nanocząsteczkami miedzi lub warstwę platerowaną miedzi utworzoną przy zastosowaniu impulsowej łukowej polaryzacji jonowej na podkładzie izolacyjnym. Metoda ta nosi nazwę ICM (z ang. Intelligent Coating Monitoring). Mierzono tutaj zmianę pola elektrycznego czujnika w trakcie badania zmęczeniowego próbki poddanej cyklicznemu rozciąganiu, co pokazano na rys. 1.23a. Zaobserwowano stopniową zmianę rezystancji czujnika ICM wraz z postępującą propagacją pęknięcia próbki. Wskazywało to na jednoczesne pęknięcie warstwy czulej czujnika ICM wraz z badanym elementem. Doświadczalnie potwierdzono, że czujnik w tej konfiguracji pozwala na detekcję pęknięcia o długości poniżej 1 mm, przy zmianie rezystancji na poziomie $\Delta R = 0,05 \Omega$.



Rys. 1.23 Zastosowanie czujnika ICM w trakcie badań zmęczeniowych, a) widok próbki z czujnikiem, b) zbliżenie na fragment czujnika z widocznym pęknięciem, c) dane z czujnika [95]

Na podstawie przebiegu liczby cykli przedstawionym na rys. 1.23c można zaobserwować kolejne fazy rozwoju pęknięcia dla badanej próbki i czujnika ICM. Po rozpoczęciu propagacji pęknięcia, następuje wzrost rezystancji czujnika charakteryzujący się niewielką dynamiką zmian. Wraz z rozwojem pęknięcia na coraz większej szerokości warstwy pomiarowej, wzrost rezystancji przybiera charakter wykładniczy, aż do momentu całkowitego przerwania ścieżki elektroprzewodzącej. W ramach zrealizowanych badań przedstawionych w pracy [96], określono empirycznie próg alarmowy dla detekcji pęknięcia, zanim jego długość całkowicie przerwie miedzianą ścieżkę. Dodatkowo, opracowano dedykowany układ pomiarowy z sygnalizacją świetlną przekroczenia progu alarmowego. W ramach dalszych badań, zespół przeprowadził weryfikację rozwiązania, w ramach próby zmęczeniowej samolotu myśliwskiego.

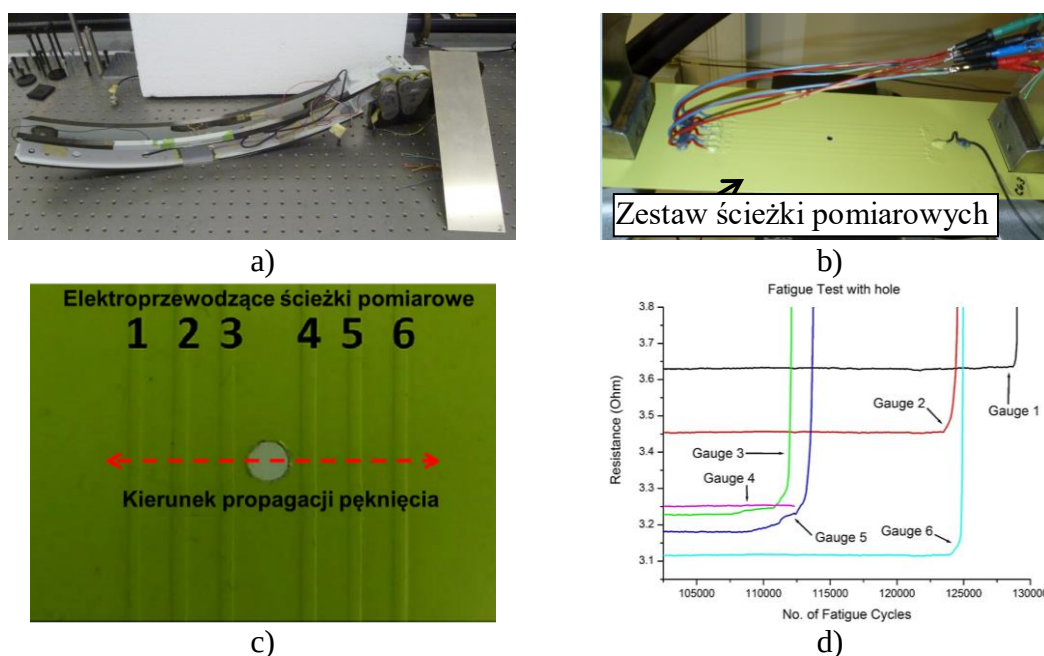
Kolejną metodą rozwijaną z przeznaczeniem do zastosowania w systemach SHM, a będącą na wczesnym etapie rozwoju, jest technika pomiarowa realizowana z wykorzystaniem czujnika SMCS (z ang. Surface Mountable Crack Sensor). W opublikowanych materiałach [73][98] zaproponowano czujnik SMCS w postaci pojedynczej ścieżki elektroprzewodzącej wykonanej z pasty z cząsteczkami srebra na podkładzie z izolacyjnej pasty ceramicznej. Czujnik wykonywany jest bezpośrednio na badanym elemencie, przez ręczne nałożenie kolejnych warstw: izolacyjnej i przewodzącej (rys. 1.24c). Dzięki zastosowanym materiałom oraz metodzie aplikacji, kształt elementu czulego może być dostosowany do potrzeb aplikacji (rys. 1.24a-b). W tym przypadku, zamiast pomiaru rezystancji jak w przypadku czujnika ICM, przeprowadzany był test ciągłości obwodu elektrycznego. Gdy ścieżka zostanie całkowicie przerwana, następuje przerwa w obwodzie, co sygnalizowane jest przez układ monitorowania w postaci zapalenia diody LED.



Rys. 1.24 Czujnik SMCS, a) w konfiguracji pojedynczej ścieżki, b) w konfiguracji wielościeżkowej, c) sposób wykonania czujnika SMCS [73].

Zrealizowany program badań dla zestawu próbek poddanych cyklicznemu rozciąganiu potwierdził możliwość detekcji pęknięcia przy użyciu czujników SMCS. Zaobserwowano przy tym, że nałożenie na ścieżkę elektroprzewodzącą dodatkowej warstwy zabezpieczającej w postaci lakieru poliuretanowego, ogranicza skuteczność tej metody w przypadku pomiarów realizowanych okresowo. Spowodowane było to ponownym połączeniem ścieżki z pasty srebra, gdy próbka była w stanie nieobciążonym. Z tego powodu, zmodyfikowano układ monitorowania w taki sposób, aby pierwsze przerwanie obwodu elektrycznego powodowało stałe uruchomienie sygnalizacji diodowej.

Podobną metodę detekcji pęknięć struktury zaprezentowano w pracach [113] oraz [114], gdzie również zastosowano pastę elektroprzewodzącą z cząsteczkami srebra do budowy czujnika detekcji pęknięć. Czujnik został zweryfikowany w trakcie badań zmęczeniowych próbki z aluminium 2023-T3, przedstawionej na rys. 1.25b-c. Dodatkowo, działanie czujnika sprawdzono w badaniu quasi-statycznego zginania elementu samolotu Airbus A320, stanowiącego prowadnicę slotu skrzydła z istniejącym uszkodzeniem (rys. 1.25a), w celu weryfikacji wskazań przy domykającym się pęknięciu. Warstwę izolacyjną dla ścieżki elektroprzewodzącej stanowił primer epoksydowy, wykorzystywany jako zabezpieczenie antykorozyjne struktur lotniczych.



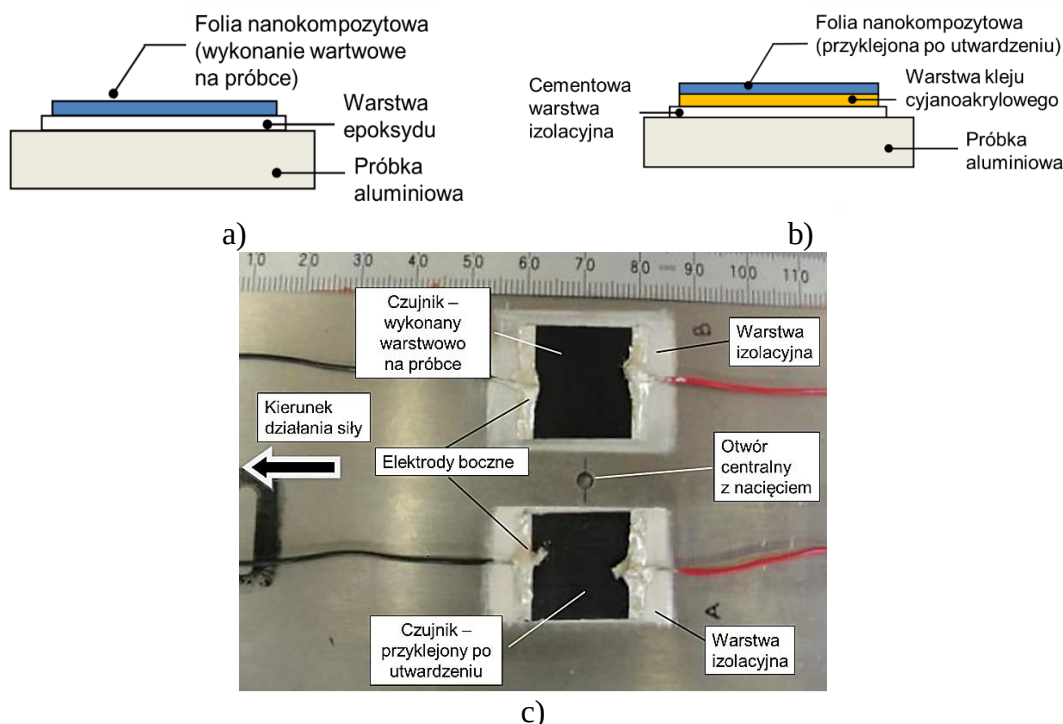
Rys. 1.25 Zastosowanie ścieżek elektroprzewodzących do detekcji pęknięcia
 a) przykład elementu lotniczego, b) badana próbka z aluminium 2024-T3,
 c) zbliżenie na czujnik zamontowany na próbce,
 d) wyniki sprawdzeń działania czujnika [113]

Wyniki badania zmęczeniowego przeprowadzonego przy wykorzystaniu próbki aluminiowej 2024-T3 potwierdziły skuteczność detekcji pęknięcia przy pomocy tej techniki pomiarowej. Wyniki zilustrowane na rys. 1.25d pokazują, że ścieżki pomiarowe wiarygodnie sygnalizowały przyrost długości pęknięcia, propagującego obustronnie od otworu w centralnej części próbki. Wskazania wartości rezystancji pojedynczej ścieżki utrzymywały się na stabilnym poziomie do momentu dotarcia wierzchołka pęknięcia, następnie w krótkim czasie wartości mierzonej rezystancji znacznie wzrastają. Świadczy to o utracie przewodności danej ścieżki pomiarowej na skutek jej przerwania. Po zakończeniu testu sprawdzono, przy jakim obciążeniu próbki, ścieżki ponownie osiągną przewodność, poprzez stopniowe zmniejszanie wartości oddziaływującej siły. Czasowe wznowienie przewodności zaobserwowano jedynie dla zewnętrznych ścieżek pomiarowych, znajdujących się najbliżej wierzchołka pęknięcia. Lecz wartość ich rezystancji była o ok. 65% wyższa niż przed jej przerwaniem.

Dotychczas przedstawione rozwiązania pozwalają na detekcję pęknięcia, a możliwość śledzenia jego propagacji wymagałaby zastosowania szeregu ścieżek elektroprowadzących, z których każda zajmowałaby 1 kanał pomiarowy. Natomiast w pracy [7] zaprezentowano czujnik rezystancyjny wykonany w postaci folii nanokompozytowej z wypełniaczem z jednościennych nanorurek węglowych, który łączy funkcjonalność detekcji i kwantyfikacji długości propagującego pęknięcia. Folia została przygotowana jako mieszanina żywicy epoksydowej i nanorurek dla wybranych proporcji wagowych na poziomie 0,3% i 1%. W trakcie testów zastosowano dwie metody integracji czujnika z badanym elementem, tj. poprzez wykonanie warstwy czulej bezpośrednio na próbce, lub poprzez przyklejenie do próbki czujnika prefabrykowanego (rys. 1.26a-b). Elektrody boczne czujnika wykonano z kleju elektroprowadzącego z cząsteczkami srebra. Tak przygotowany zestaw czujników poddano badaniom zmęczeniowym na aluminiowej próbce (rys. 1.26c).

W ramach zrealizowanych badań stwierdzono, że zaproponowana folia nanokompozytowa może zostać z powodzeniem zastosowana jako czujnik detekcji pęknięcia i śledzenia tempa jego propagacji. Czujniki na warstwie izolacyjnej z epoksydu wykazywały lepsze działanie, ponieważ pęknięcie propagowało w warstwie czulej prawie jednocześnie z próbką i miało bardziej stabilny przebieg. Zastosowanie stężenia nanorurek na poziomie 0,3% pozwoliło na uzyskanie pół-transparentnej warstwy czulej czujnika, co pozwalało na obserwacje propagacji pęknięcia na próbce metodą wizualną. Jednak lepszą dokładność wykonania, odtwarzalność rezystancji folii oraz znacznie

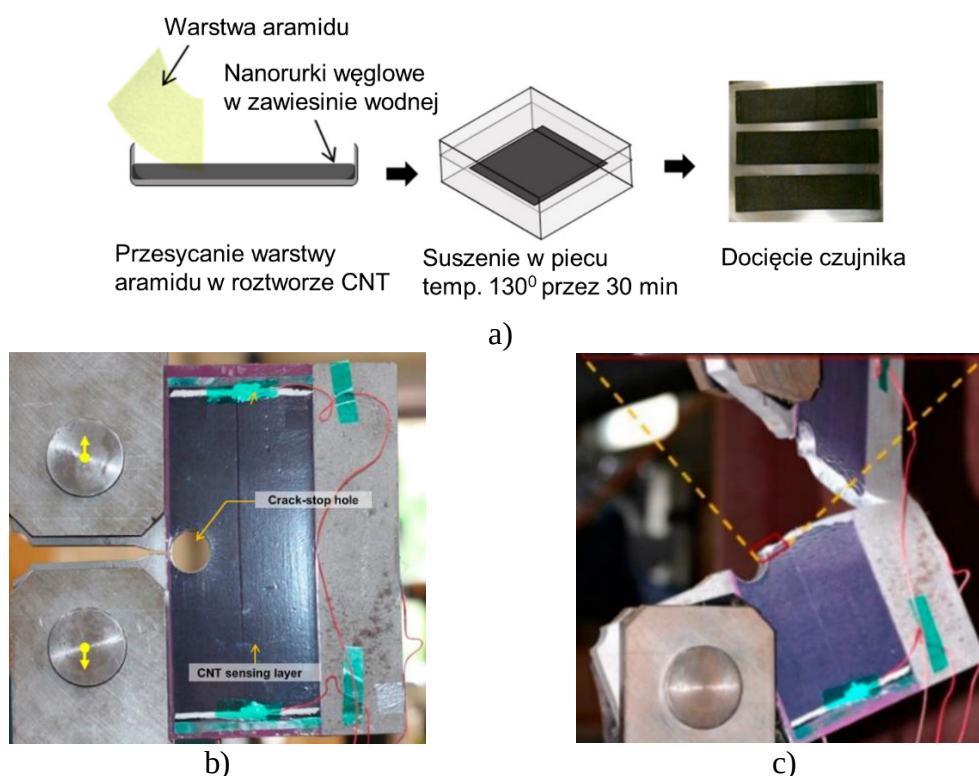
wyższą przewodność elektryczną uzyskano przy zastosowaniu stężenia nanorurek wynoszącego 1%.



Rys. 1.26 Przykład czujnika detekcji pęknięć w postaci folii nanokompozytowej,
a) wykonanie bezpośrednie na próbce, b) przyklejenie folii prefabrykowanej,
c) widok próbki do badań [7]

W trakcie badań zmęczeniowych zaobserwowano, podobnie jak w przypadku wcześniej przedstawionych metod, zależność wskazań czujnika od siły oddziaływującej na próbkę z propagującym pęknięciem. Ma to związek z domykaniem się pęknięcia i tym samym zwiększeniem obszaru kontaktu czujnika w miejscach już przerwanych. W przypadku niniejszych badań, wartość sygnału pomiarowego (w tym przypadku prądu płynącego przez czujnik) wykazywała malejącą tendencję w zakresie poniżej 40% wartości maksymalnej siły przyłożonej do próbki. Dodatkowo zauważono, że wykorzystanie do analizy parametru nazwanego „znormalizowaną różnicą prądu”, zamiast chwilowej wartości prądu czujnika, pozwala na dokładniejsze szacowanie długości uszkodzenia. Spowodowane jest to wzrostem wartości mierzonego prądu czujnika w początkowej fazie propagacji pęknięcia. Najprawdopodobniej jest to skutek występowania strefy uplastycznienia obszaru próbki przed czołem pęknięcia, szacowanej na ok. 10% długości warstwy czulej (2 mm). Zaproponowany dodatkowy parametr diagnostyczny umożliwił znormalizowanie wskazań i uzyskanie liniowej zależności pomiędzy wskazaniami czujnika, a szacowaną długością pęknięcia.

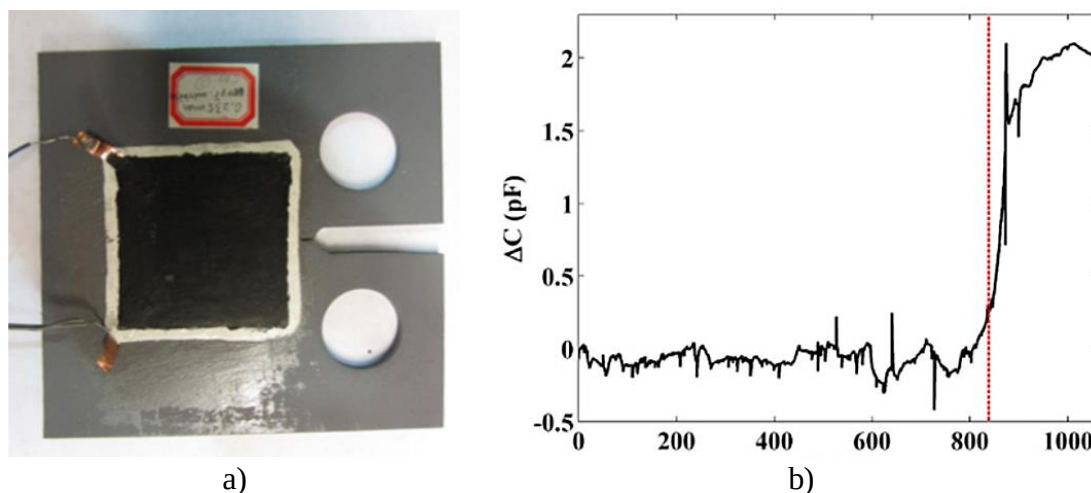
Kolejnym przykładem badań nad opracowaniem czujników detekcji pęknięć wykorzystujących w warstwie czulej alotropowe odmiany węgla przedstawiono w szeregu innych opracowań naukowych. W artykułach [3] oraz [4], zespół badaczy przedstawił wyniki testów dotyczących wykorzystania jako warstwy aramidowej przesyconej roztworem z nanorurek węglowych do detekcji pęknięcia. Warstwa przygotowana zgodnie z rys. 1.27a, po jej docięciu na pożądany wymiar, była przyklejona do próbki kompaktowej CT (z ang. Compact Tension) przy użyciu kleju epoksydowego, a następnie po podłączeniu elektrod, poddana badaniu zmęczeniowemu (rys. 1.27b-c).



Rys. 1.27 Czujnik detekcji pęknięć jak warstwa aramidowa przesycona roztworem z nanorurek węglowych a) schemat przygotowania warstwy czulej, b) widok próbki z czujnikiem przed badaniem, c) widok próbki z czujnikiem po badaniu [4]

Na podstawie przeprowadzonych badań dowiedziono, że zaproponowany czujnik umożliwia monitorowanie pęknięcia w sposób ciągły i w czasie rzeczywistym, za pomocą pomiaru zmiany rezystancji elektrycznej. Nie zaobserwowano wskazań „fałszywie pozytywnych”, a dodatkowy test mający określić czułość metody dla reinicjalizacji propagacji pęknięcia od nawierconego otworu również wykazał skuteczność działania tej metody. Autorzy w ramach przyszłych prac, wskazują potrzebę weryfikacji metody dla struktur rzeczywistych oraz realizacji badań w zmiennych warunkach środowiskowych, tj. temperatura i wilgotność.

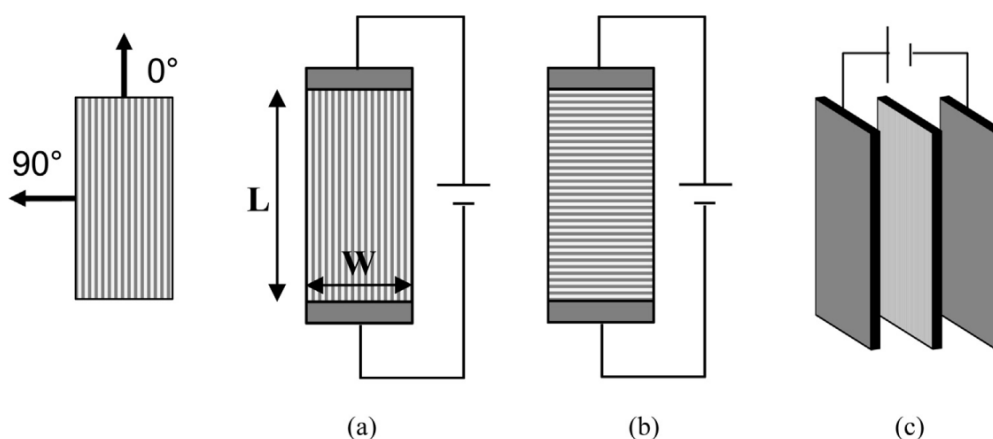
Kolejny interesujący sposób detekcji pęknięć, ponownie wykorzystujący nanorurki węglowe do wytworzenia warstwy czułej, zaproponowano w pracach [68] oraz [83]. Opracowany czujnik nazwany SEC (z ang. soft elastomeric capacitor), jest przeznaczony do detekcji dużych zmian odkształcenia, które wpływają na zmianę pojemności elektrycznej czujnika. Dzięki odpowiedniemu zorganizowaniu sieci pomiarowej, czujniki wykazały czułość na propagujące pęknięcie próbki metalowej. W przeciwieństwie do wyżej wskazanych metod, czujnik ten nie pęka wraz ze strukturą. Osiągnięto to przez zastosowanie elastomeru blokowego SEBS (styren-etylen-butylen-styren) z wypełniaczem tlenku tytanu jako warstwy nośnej, oraz mieszaniny elastomeru SEBS z cząsteczkami sadzy jako materiału elektrod tworzących okładki kondensatora (rys. 1.28a). Taki elastyczny czujnik przyklejony do badanej struktury, deformuje się wraz ze wzrostem pęknięcia, a sygnałem diagnostycznym jest pojemność elektryczna. W trakcie badań korelowano wskazania czujnika z wynikami inspekcji wizualnej. Obserwowano znaczną i skokową zmianę pojemności przy rozmiarach pęknięcia pod czujnikiem poniżej 30 mm (rys. 1.28b).



Rys. 1.28 Czujnik SEC a) widok po zainstalowaniu na próbce, b) przykładowe wyniki [83]

W obliczu coraz powszechniejszego zastosowania konstrukcji kompozytowych, inną grupą metod detekcji uszkodzeń w tych materiałach jest wykorzystanie naturalnego przewodnictwa elektrycznego kompozytów węglowych CPRF (z ang. carbon fiber reinforced polymers) [21][28][36][145]. W publikacji [21] przedstawiono przegląd prac, w których dzięki zmianie konfiguracji punktów pomiaru rezystancji na elemencie wykonanym z kompozytu CPRF, możliwa była detekcja uszkodzeń różnego typu. Wskazano czułość metody na pęknięcia osnowy kompozytu i jego włókien przy rozciąganiu i zginaniu próbki, detekcję uszkodzeń pochodzących od uderzeń (tzn. impact

damage), delaminacji międzywarstwowej czy pęknięć propagujących od nitów. W [36] wskazano, że lepszą czułość na zmianę rezystancji na uszkodzenie wykazuje konfiguracja 4-przewodowa, zamiast korzystanie z klasycznego 2-przewodowego połączenia z badaną strukturą. Zaprezentowano również metodę optymalizacji sposobu analizy danych przy zastosowaniu m. in. wielokryterialnego algorytmu genetycznego MOGA (z ang. Multi-Objective Generic Algorithm). Dalej w pracy [145] przeprowadzono badania anizotropii wartości własności przewodnictwa elektrycznego struktury kompozytowej, zwłaszcza dla struktur węglowych CPRF (rys. 1.29). Przeprowadzono również badania porównawcze przy wykorzystaniu kompozytu szklanego GPRF ze zmodyfikowaną osnową z dodatkiem nanorurek węglowych. Badania eksperymentalne i symulacyjne wykazały niższą anizotropię rezystancji w przypadku zastosowania osnowy z dyspersją nanorurek, w porównaniu do kompozytu CPRF, co ma znaczący wpływ na możliwość skutecznej detekcji uszkodzeń.



**Rys. 1.29 Konfiguracja elektrod do określenia przewodności elektrycznej
a) wzdłużnej b) poprzecznej c) po grubości [36]**

Możliwość zastosowania dyspersji cząstek elektroprzewodzących jak nanorurki węglowe, sadza lub grafen, pozwala na zastosowanie powyższych metod detekcji uszkodzeń również do monitorowania konstrukcji z kompozytu szklanego (taką modyfikację często określa się w literaturze jako nanokompozyt). W pracach [111], [143] i [149] przeprowadzono badania nad możliwością detekcji uszkodzenia dla kompozytu szklanego ze zmodyfikowaną osnową różnymi dodatkami nanocząstek węgla. Przy użyciu opracowanej metody analizy i wizualizacji danych, potwierdzono możliwość detekcji i lokalizacji uszkodzeń pochodzących od niskoenergetycznych uderzeń [143]. Zastosowanie pomiaru rezystancji powierzchniowej i po grubości próbki pozwoliło również na wykrycie pęknięć osnowy oraz plastycznej deformacji powierzchni

[111] i [149]. Dodatkowo, w pracy [143] zastosowano metodę zobrazowania tomografii impedancji elektrycznej EIT (z ang. Electro-Impedance Tomography). Metoda zobrazowania typowo wykorzystywana w aplikacjach biomedycznych, w aplikacjach przeznaczonych do detekcji uszkodzeń ujawniła zdolność do przestrzennego określania zmian przewodnictwa elektrycznego na skutek propagacji uszkodzenia jedynie na podstawie pomiarów granicznych. Zatem elektrody pomiarowe mogą być umieszczone wyłącznie na krawędziach badanego elementu, by skutecznie ujawnić wystąpienie degradacji elementu konstrukcyjnego.

W niniejszym podrozdziale przedstawiono wybrane metody i techniki, pozwalające na detekcję uszkodzeń (głównie pęknięć). Cechą wspólną technik SHM, niezależnie od poziomu ich gotowości technologicznej, jest możliwość trwałej integracji z monitorowaną strukturą, oraz realizacji inspekcji częściej, niż przyjęto dla metod badań nieniszczących NDT. Opracowanie grupy metod, czulej na szeroki zakres uszkodzeń, umożliwi opracowanie zintegrowanych systemów monitorowania stanem technicznym, których koncepcję przedstawiono w kolejnej części rozprawy.

1.3. Zintegrowany system monitorowania stanu technicznego IVHM

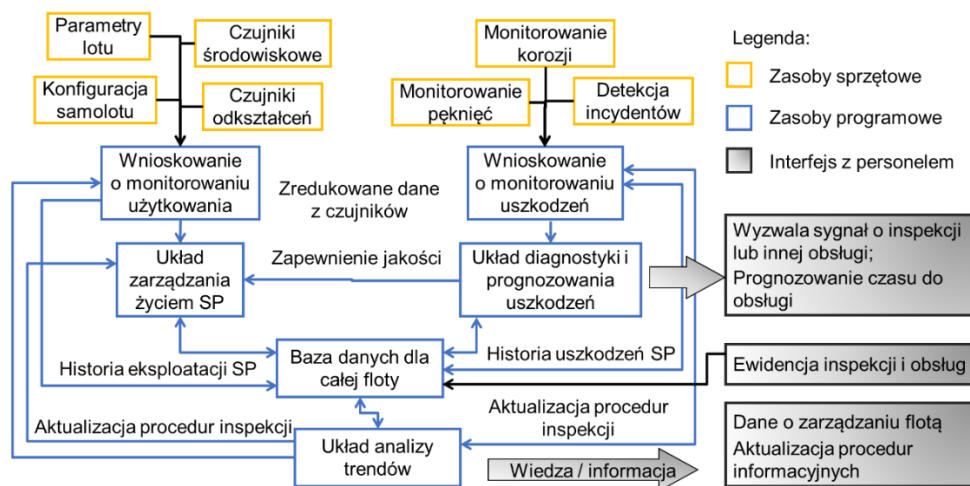
Obecnie na rynku istnieje szereg rozwiązań będących na różnym poziomie gotowości technologicznej, które umożliwiają szeroko pojęte monitorowanie konstrukcji. Z uwagi na złożoność tego zagadnienia, zwłaszcza w zastosowaniach lotniczych, opracowywane są specjalistyczne narzędzia dedykowane do wykorzystania w poszczególnych aplikacjach. Istnieje wielu producentów z dedykowaną grupą odbiorczą, którzy aktywnie uczestniczą w poprawie bezpieczeństwa lotów, choć ich rozwiązania skupiają się nie na detekcji pęknięć, lecz szeroko rozumianym monitorowaniu zużycia elementów konstrukcji statków powietrznych.

Przykładowo grupa firm, tj. Honeywell, RSL Electronics czy GPMS Inc. [47] jest znaczącym dostawcą systemów typu HUMS (z ang. Health and Usage Monitoring), dedykowanych do zastosowania głównie na śmigłowcach. Systemy te monitorują stan techniczny elementów wirujących układu przeniesienia napędu z przekładni głównej (wirnika nośnego) śmigłowca na śmigło ogonowe oraz silników. Składają się one z systemu akwizycji danych i rozproszonej sieci czujników wibracji IEPE (z ang. Integrated Electronics Piezo-Electric) umieszczonych m. in. na przekładniach, łożyskach wieszakowych i silnikach. Systemy te mają za zadanie śledzenie zmian widma

drgań i są wspierane przez oprogramowanie przeznaczone do zautomatyzowanej analizy trendów wskaźników diagnostycznych i sygnalizacji stanów przedawaryjnych.

Do innej grupy systemów dostępnych komercyjnie, można zaliczyć te służące do monitorowania obciążeń eksploatacyjnych OLM (z ang. Operational Load Monitoring). Układ akwizycji danych takiego systemu odbiera informacje o lokalnej wartości odkształceń elementów konstrukcji, na przykład goleni czy skrzydła). Wykorzystywane do tego celu są sieci czujników tensometrycznych, lub coraz częściej światłowodowych siatek Bragga (FBG). Systemy odpowiednie do tego celu produkują firmy FBGS, Smart Fiber (od 2020 należy do Rockwell Collins), Curtiss Wright (po przejęciu Acra Control w 2011), Meggit, Luna Inc. oraz Redondo Optics. Każda z tych firm może pochwalić się wdrożeniami systemów monitorowania obciążeń elementów konstrukcji statków powietrznych. W kooperacji z głównymi producentami samolotów, firmy te dostarczają i rozwijają swoje produkty na potrzeby naziemnych badań kwalifikacyjnych, badań w locie oraz monitorowania bieżącego użytkowania statków powietrznych.

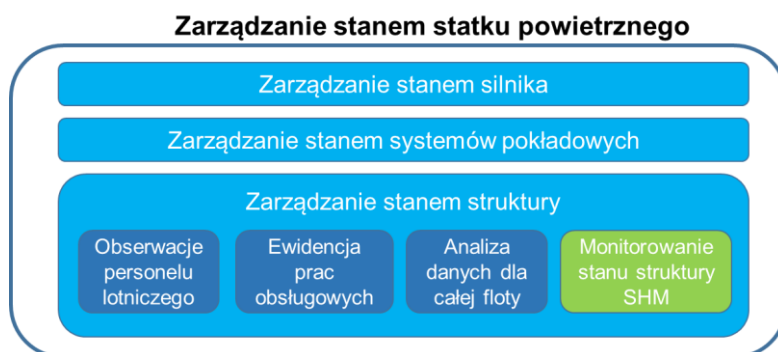
Koncepcją, która w przyszłości powinna połączyć wszystkie aspekty monitorowania konstrukcji jest zintegrowany system monitorowania stanu technicznego IVHM [33][125] (z ang. Integrated Vehicle Health Management). Jego zadaniem będzie łączenie danych ze wszystkich źródeł diagnostycznych obiektu, np. statku powietrznego, w celu kompleksowego zapewnienia jego bezawaryjnego funkcjonowania zgodnie z przeznaczeniem i wysoką dostępnością przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów oraz czasu na nieplanowane przestoje (rys. 1.30). W porównaniu do systemów SHM, OLM czy HUMS, system zintegrowany zapewni nie tylko informacje diagnostyczne i prognostyczne, ale także narzędzia do optymalizacji działań związanych z rozwiązywaniem problemów występujących w trakcie eksploatacji na poziomie całej floty statków powietrznych. W tym celu IVHM będzie wykorzystywał nowe technologie w dziedzinie elektroniki i sensoryki, systemów i inżynierii sterowania oraz komunikacji w połączeniu ze zautomatyzowanymi systemami decyzyjnymi opartymi o sztuczną inteligencję. Już obecnie w dziedzinie IVHM obserwuje się zastosowanie przetwarzania danych w chmurze i analizę dużych zbiorów danych w celu poprawy efektywności monitorowania stanu technicznego obiektów w czasie rzeczywistym.



Rys. 1.30 Schemat blokowy koncepcji IVHM firmy Boeing dla komercyjnego samolotu z włączonymi funkcjonalnościami SHM [125]

Dążenie do interoperacyjności różnych systemów pokładowych wydaje się być naturalnym kierunkiem rozwoju, z uwagi na dostarczanie uzupełniających się informacji o stanie technicznym statku powietrznego. Rozwój transportu lotniczego na świecie oraz sprzyjające zmiany regulacyjne sprawiają, że podejście do monitorowania stanu technicznego, oparte obecnie na resursach technicznych oraz klasycznych inspekcjach przy wykorzystaniu metod NDT, będzie musiała ustąpić miejsca systemom zintegrowanym z obiektem. Wpisanie frazy „aircraft structural health monitoring” w przeglądarce internetowej podaje 22 mln wyników, co świadczy o dużej aktywności w tym obszarze, zarówno w obszarze B+R (projekty, konferencje, opracowania naukowe) jak i opisu udanych, prototypowych implementacji.

Możliwość zastosowania metod SHM zostało już uwzględnione (Rys. 1.31) w nowo opracowanych wytycznych (rys. 1.31), m. in. [126] oraz w części zaktualizowanych dokumentów europejskich władz lotniczych.



Rys. 1.31 Schemat zarządzania stanem statku powietrznego zgodnie z ARP6461 [126]

Pozwoli to na przygotowanie zestawu jasnych wymagań i standardów, które muszą spełniać takie systemy monitorowania. Celem jest potwierdzenie skuteczności ich działania w warunkach operacyjnych oraz bezpieczeństwo eksploatacji na skutek wdrożenia.

1.4. Podsumowanie

Obecnie stan techniczny statków powietrznych weryfikowany jest podczas okresowych inspekcji przy wykorzystaniu metod badań nieniszczących NDT. Jednak ze względu na brak bieżącego monitorowania stanu konstrukcji, jej uszkodzenie może nastąpić pomiędzy terminami wyznaczonych obsług. Z tego powodu, prowadzone są badania nad wdrożeniem systemów SHM do szerszego wykorzystania w procesie eksploatacji statków powietrznych.

Współczesne metody inspekcji konstrukcji lotniczych oparte o tzw. badania nieniszczące NDT, obejmują zestaw wielu technik inspekcyjnych, które są obecnie wykorzystywane w trakcie okresowo realizowanych obsług technicznych. Metody te są skuteczne, dobrze uwarunkowane metrologicznie, i jako grupa zdolne do detekcji uszkodzeń różnego typu, zarówno w strukturach metalowych jak i kompozytowych. Jednak okresowy charakter wykonywanych inspekcji, czasochłonność ich wykonania, brak możliwości dostępu do niektórych lokalizacji konstrukcji oraz konieczność wyłączenia z eksploatacji obiektu na czas obsługi, doprowadziły do poszukiwania nowych rozwiązań.

Odpowiedzią na powyższe niedogodności jest koncepcja SHM, jako systemów pomiarowych trwale zintegrowanych z obiektem. Dzięki temu, możliwe jest monitorowanie miejsc szczególnie narażonych na inicjację uszkodzeń w sposób ciągły. W pracy zaprezentowano szereg metod i technik, które mogą być dobrymi kandydatami do budowy takiego systemu. Każda z nich charakteryzuje się czułością na co najmniej jeden typ uszkodzenia (najczęściej pęknięcia). Wdrożone rozwiązania, występujące w postaci instalacji prototypowych tego typu systemów bazują m. in. na wykorzystaniu przetworników piezoelektrycznych i metodzie fal prowadzonych lub czujników CVM. W pierwszym przypadku, do prawidłowego działania systemu, konieczne jest utworzenie węzła pomiarowego np. z 4-8 przetworników, rozmieszczonych w odległości kilkunastu centymetrów. Same przetworniki są wrażliwe na zmianę temperatury otoczenia, wilgotności i wibracji, przeważnie pozwalając na wykonanie pomiaru w trakcie postoju.

Dodatkowo, rozwiązanie takie opiera się na analizie porównawczej z sygnałem referencyjnym zarejestrowanym dla struktury nieuszkodzonej. Sygnał taki jest unikalny dla kształtu danego węzła pomiarowego i silnie zależy od propagacji fal sprężystych w materiale. Ponadto, zestaw sygnałów referencyjnych musi uwzględniać zmienne warunki otoczenia w celu zniwelowania alarmów fałszywie pozytywnych. System pomiarowy musi być również wyposażony w generator sygnałów o częstotliwości w zakresie 50÷350 kHz (nawet do 500 kHz), oraz wielokanałowy, symultaniczny i szybki ($>>1\text{MHz}$) układ rejestracji danych przeznaczony do pomiaru sygnałów. Konieczne jest stosowanie zaawansowanych metod analitycznych w celu dostarczenia użytkownikowi czytelnej informacji o obecności pęknięcia, a wnioskowanie na podstawie nieprzetworzonego sygnału jest niemożliwe. Zaletą tej technologii jest natomiast możliwość detekcji uszkodzenia różnego typu (pęknięcia, delaminacje, uszkodzenia od uderzeń) znajdującego się w pewnej odległości od przetwornika, ale musi ono propagować wewnątrz węzła pomiarowego. Skuteczność detekcji spada przy obecności niejednorodności struktury, w postaci łączenia elementów czy występowania nitów.

Samo zastosowanie przetworników piezoelektrycznych, zwłaszcza w aspekcie prowadzonych prac nad systemami SHM jest bardzo popularne i obiecujące, ponieważ przetwornik jako element generacyjny może być użyty pasywnie (np. detekcja zdarzeń typu impakt, „energy harvesting”), bądź aktywnie w metodzie impedancji, emisji akustycznej czy zobrazowaniu ultradźwiękowym. Jednak na obecnym etapie, związane z tym prace przeważnie charakteryzują się niskim poziomem gotowości technologicznej, zwłaszcza w przypadku rozwiązań przeznaczonych do monitorowania struktur lotniczych. Istotnym aspektem zastosowania piezoelektrycznych przetworników ceramicznych jest nieunikniona utrata właściwości tych przetworników w czasie, co ogranicza długotrwałe ich użytkowanie.

Z kolei, zastosowanie czujników CVM niweluje problem zaawansowanej analizy i interpretacji uzyskanych danych. Ale metoda zapewnia informację binarną: obecność lub brak pęknięcia, bez możliwości śledzenia jego przyrostu w czasie. Dodatkowo, wykorzystanie pompy próżniowej, determinuje zapewnienie szczelności układu odsysania powietrza z kanałów czujnika. Dodatkowo, czujnik musi być trwale i dokładnie przyklejony do struktury na całej swojej powierzchni, w celu uniknięcia alarmów fałszywie pozytywnych. Oprócz scharakteryzowanych w pracy technik pomiarowych, istnieje szereg innych metod detekcji uszkodzeń m. in. bazujących na czujnikach

wiroprowadowych, lecz nie odnaleziono skomercjalizowanych rozwiązań dedykowanych do ciągłego monitorowania konstrukcji lotniczych.

Inne rozwiązania przeznaczone do monitorowania stanu technicznego konstrukcji statków powietrznych typu OLM czy HUMS, bazują na pomiarach obciążeń eksploatacyjnych lub poziomie wibracji. Dostarczają one bardzo przydatnych informacji o globalnym stanie obiektu lub jego znaczących elementach (odkształcenia skrzydła, podwozia), lecz detekcja uszkodzeń zmęczeniowych przy ich pomocy nie jest możliwa na wczesnym etapie propagacji. Ścieżka przenoszenia obciążeń zmienia się subtelnie, zwłaszcza we współczesnych statkach powietrznych projektowanych w oparciu o filozofię tolerowanego uszkodzenia (z ang. Damage Tolerance). Wyżej wymienione systemy są użyteczne do monitorowania jakości eksploatacji i detekcji zdarzeń stochastycznych (twarde lądowanie, przekroczenie dopuszczalnych obciążeń eksploatacyjnych, szacowanie ekwiwalentu wytrzymałości resztkowej i zużycia od zrealizowanych manewrów), zwłaszcza dla obiektów niestacjonarnych.

Dodatkowo, w literaturze odszukać można szereg prac badawczych, które prezentują nowe metody SHM znajdujące się na wczesnym etapie rozwoju. Przedstawione w podrozdziale 1.2.2 sposoby detekcji uszkodzeń wykorzystują nowe materiały do wytworzenia czujników przeznaczonych do detekcji pęknięć w postaci ścieżek lub folii elektroprzewodzących. Elementy te zazwyczaj pękają wraz z badanym elementem, zmieniając swoje własności elektryczne (głównie rezystancję), których pomiar służy jako sygnał diagnostyczny do szacowania długości pęknięcia struktury. Niewątpliwą zaletą czujników w ramach tej koncepcji, przy założeniu zbadania aspektów eksploatacyjnych jak m.in.: trwałość zmęczeniowa wykorzystanych materiałów, powtarzalność wytwarzania czujników, stabilność własności mechanicznych i elektrycznych w czasie oraz pod wpływem zmiennych warunków środowiskowych, jest relatywnie intuicyjna interpretacja wyników. Dodatkowo, takie czujniki mogłyby współpracować z istniejącą obecnie aparaturą pomiarowo-rejestrującą bez dodatkowych, skomplikowanych układów kondycjonowania sygnałów. Dlatego, pomimo ograniczeń wymienionych metod głównie w zastosowaniu do detekcji pęknięć i lokalnego charakteru czułości na uszkodzenie, opracowanie skutecznego i zweryfikowanego sposobu monitorowania w oparciu o te nowe czujniki ma znaczny potencjał wdrożeniowy. Może więc stanowić dodatkowe narzędzie w zbiorze już rozwiniętych metod SHM o potwierdzonych cechach użytkowych.

Jednak przeprowadzony przegląd literatury przedmiotu, znacznie wykraczający poza przedstawiony w niniejszej pracy ujawnił że najczęściej weryfikacja działania tych nowych czujników kończy się na etapie wczesnych badań podstawowych. Przeważnie brak jest badań własnych nad określeniem własności mechanicznych i elektrycznych zastosowanych materiałów. Autorzy najczęściej też nie odnoszą się do wpływu na wskazania swoich czujników takich zjawisk jak piezorezystywność warstwy pomiarowej, zmiana temperatury i wilgotności otoczenia, adhezyjność międzywarstwowa czujnika lub do badanej powierzchni. Badania wykonywane są na ogół na ustandaryzowanych próbkach, bez potwierdzenia skuteczności zaproponowanej metody detekcji na np. panelach reprezentatywnych elementów konstrukcyjnych. Doświadczenia autora rozprawy wskazują jednak duże znaczenie przeprowadzenia takich badań, w celu potwierdzenia użyteczności metody pomiarowej w warunkach innych niż krótkotrwałe testy laboratoryjne.

W kolejnych rozdziałach rozprawy przedstawione zostaną wyniki badań zrealizowanych na potrzeby opracowania i weryfikacji alternatywnej metody detekcji pęknięć zmęczeniowych z wykorzystaniem tzw. czujników drabinkowych. Badania rozpoczęto od oceny użyteczności komercyjnie dostępnego czujnika, na drodze badań eksperymentalnych na próbkach o nieskomplikowanym kształcie, rzeczywistych elementach konstrukcyjnych statku powietrznego oraz w trakcie pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu szkolnego. Następnie opracowano koncepcję nowego czujnika, który swoją budową nawiązuje do tych przedstawionych w podrozdziale 1.2.2, stanowiąc ich rozwinięcie. Zrealizowany autorski program badań oparty o multidyscyplinarne metody badawcze pozwolił na potwierdzenie skuteczności detekcji pęknięć w elementach konstrukcyjnych statków powietrznych i eliminację wybranych, dostrzeżonych wad i ograniczeń rozwiązań przedstawionych w tej części pracy.

2. TEZA NAUKOWA, CEL ORAZ ZAKRES ROZPRAWY

Opracowanie nowych czujników drabinkowych jest zasadniczym elementem rozprawy i ma na celu zwiększenie podatności użytkowej i eksploatacyjnej opracowanej metody detekcji i monitorowania propagacji pęknięć, w porównaniu do czujników komercyjnych.

Prace nad rozwojem metod monitorowania stanu technicznego, zgodnych z koncepcją SHM, ukierunkowane są na poprawę bezpieczeństwa eksploatacji np. statków powietrznych przez zwiększenie częstotliwości wykonywania inspekcji przy jednoczesnym obniżeniu czasu i kosztów ich realizacji. Jednakże, opracowanie skutecznej i efektywnej metody monitorowania stanu technicznego, z uwagi na interdyscyplinarny charakter niniejszego zagadnienia i konieczność łączenia wiedzy specjalistów z wielu dziedzin, nie jest trywialnym problemem. Indywidualnie podchodzi się do wyboru metody pomiarowej, akwizycji i rejestracji danych, analizy informacji oraz opracowania korelacji pomiędzy wskaźnikami opartymi na danych, a potencjalnym uszkodzeniem.

Wykorzystanie czujników drabinkowych, będących przedmiotem niniejszej rozprawy, zdolnych do detekcji uszkodzeń w postaci pęknięć elementów konstrukcji, wydaje się być atrakcyjną alternatywą dla metod przedstawionych w poprzednim rozdziale. Z pozoru nieskomplikowana budowa i zasada działania tego typu czujników, może okazać się zaletą przy implementacji w warunkach operacyjnych. Jak wykazano w dalszej części rozprawy, do zastosowania niniejszych czujników możliwe jest wykorzystanie układów akwizycji danych typu COTS (z ang. Commercial Of The Shelf), dostępnych również w wersji gotowej do wdrożenia na statku powietrznym. Użyteczną informację na temat wystąpienia pęknięcia można uzyskać na podstawie nawet nieprzetworzonego sygnału, a korelacja danych z rozmiarem potencjalnego uszkodzenia oparta jest na geometrii siatki pomiarowej czujnika drabinkowego.

Główną motywacją do podjęcia tematu pracy była relatywnie niewielka ilość badań weryfikujących skuteczność działania czujników drabinkowych przeznaczonych do detekcji i monitorowania pęknięć. A z uwagi na wyżej wymienione zalety, metoda ta jest dobrym kandydatem do wykorzystania w systemach SHM. Dodatkowo, dzięki opracowaniu autorskiej koncepcji tych czujników, oraz zrealizowaniu niżej przedstawionego programu badań weryfikacyjnych, autor ma nadzieję na zwiększenie

użyteczności tej metody detekcji pęknięć oraz przybliżenie jej do etapu praktycznego zastosowania.

2.1. Teza naukowa oraz cel pracy

W ramach rozprawy przyjęto następującą tezę naukową:

Możliwe jest opracowanie efektywnej metody przeznaczonej do lokalnej detekcji i kwantyfikacji długości pęknięć elementów struktury statku powietrznego przy użyciu zintegrowanej sieci rezystancyjnych czujników drabinkowych.

Cel naukowy niniejszej rozprawy stanowi opracowanie i zweryfikowanie metody możliwie wczesnego wykrywania i monitorowania rozwoju pęknięć zmęczeniowych metalowych struktur lotniczych, przy wykorzystaniu sieci rezystancyjnych czujników drabinkowych na stałe integrowanych z badanym obiektem. Osiągnięcie założonego celu zrealizowano poprzez realizację następujących zadań badawczych:

- opracowanie układu akwizycji danych dla czujników drabinkowych;
- badania weryfikacyjne komercyjnie dostępnych czujników drabinkowych;
- opracowanie koncepcji nowych czujników drabinkowych;
- przeprowadzenie niezbędnych badań materiałów, przeznaczonych do budowy nowych czujników drabinkowych;
- badania eksperymentalne opracowanych czujników.

Jednym z celów użytecznych rozprawy jest weryfikacja i próba podniesienia tzw. poziomu gotowości technologii monitorowania stanu technicznego konstrukcji wykorzystaniem opracowanych czujników. Istotnym elementem pracy jest przedstawienie wyników z wieloetapowej weryfikacji działania zaproponowanej metody oraz multidyscyplinarnych badań zastosowanych materiałów. Uzupełnienie wykonywanych okresowo przeglądów struktury o system automatycznej diagnostyki jej stanu, zwiększyłoby bezpieczeństwo eksploatacji statków powietrznych i obniżyło czasochłonność oraz koszty realizacji badań, zwłaszcza w przypadku elementów trudno dostępnych standardowymi technikami badań nieniszczących.

2.2. Program badań zrealizowanych w ramach rozprawy

Udowodnienie tezy naukowej rozprawy przeprowadzono w ramach programu badań przedstawionego poniżej. Obejmował on badania komercyjnie dostępnych czujników drabinkowych, a następnie opracowanie koncepcji, wykonanie i weryfikację działania autorskich czujników, których zastosowanie pozwoli na zwiększenie użyteczności tej metody detekcji i monitorowania postępu propagacji pęknięć.

Badania weryfikacyjne komercyjnie dostępnych czujników drabinkowych (rozdział 3):

- opracowanie układu akwizycji danych dla czujników drabinkowych;
- badania zmęczeniowe laboratoryjne na próbkach o nieskomplikowanym kształcie;
- badania zmęczeniowe laboratoryjne na elementach konstrukcyjnych;
- badania długotrwałe w trakcie pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu szkolnego PZL-130 TCII Orlik;

Opracowanie nowych czujników drabinkowych obejmowało (rozdział 4 oraz 5):

- wstępny wybór materiałów do wytworzenia nowych czujników drabinkowych;
- badania wstępne / weryfikacyjne – potwierdzenie działania koncepcji oraz obserwacje do dalszej ewaluacji metody;
- badania materiałowe zmierzające do udoskonalenia nowego czujnika w porównaniu do wstępnej weryfikacji;
- badania zasadnicze nowych czujników drabinkowych.

Częścią powyższego etapu pracy, było przeprowadzenie badań materiałowych zgodnie z harmonogramem, był złożony z (rozdział 5.1):

- badań własności mechanicznych materiałów izolacyjnych;
- badań wpływu grubości warstwy izolacyjnej na transfer odkształceń z powierzchni elementu;
- badań własności elektrycznych farby elektroprowadzącej;
- badań własności elektromechanicznych farby elektroprowadzącej;
- badań adhezji zastosowanych materiałów;

- badań własności cieplnofizycznych zastosowanych materiałów;
- badań morfologii powierzchni farby elektroprowadzącej.

W oparciu o analizę wyników z badań materiałowych, możliwe było wyjaśnienie obserwacji z badań wstępnych, mogących mieć negatywny wpływ na poprawność działania nowych czujników drabinkowych. Po uwzględnieniu ograniczeń użytkowych wynikających z zastosowanych materiałów, przeprowadzono testy zasadnicze opracowanych czujników drabinkowych (rozdział 5.2) obejmujące:

- badania na próbce standardowej typu CT w ramach testu tempa propagacji pęknięcia zgodnie z normą ASTM E647-15e1;
- badania na próbce stanowiącej ekwiwalent fragmentu dźwigara samolotu PZL-130 TCII Orlik przy zastosowaniu rzeczywistego widma obciążeń eksploatacyjnych;
- badania na próbce o nieskomplikowanym kształcie bez karbu, w celu weryfikacji stabilności działania nowych czujników drabinkowych bez propagacji pęknięcia.

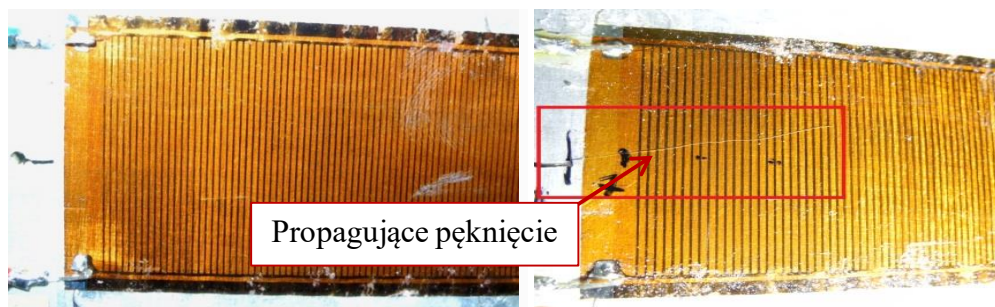
3. CHARAKTERYSTYKA CZUJNIKÓW DRABINKOWYCH

Czujniki drabinkowe zostały opracowane jako alternatywna metoda detekcji pęknięcia oraz kwantyfikacji jego liniowych wymiarów w predefiniowanej lokalizacji badanego elementu lub rzeczywistego obiektu. Zdaniem Autora, czujniki te mają szansę znaleźć zastosowanie jako część składowa systemu SHM do bieżącego monitorowania stanu technicznego konstrukcji. W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną badania własne, mające na celu określenie podatności użytkowej tej metody detekcji pęknięć.

3.1. Budowa i zasada działania czujników drabinkowych

Struktura oraz proces technologiczny wykonywania czujników drabinkowych są zbliżone do foliowych tensometrów rezystancyjnych. Zauważalna różnica to kształt siatki pomiarowej, która jest zaprojektowana jako szereg przewodzących ścieżek połączonych równolegle. W przypadku tensometrów, równoległe ułożone ścieżki są połączone szeregowo, tworząc jeden odcinek przewodnika zdolnego do pomiaru odkształceń bazując na efekcie piezorezystywnym.

Zasada działania czujnika drabinkowego została zilustrowana na rys. 3.1. Czujnik musi być trwale przyklejony do struktury w miejscach podejrzewanych o występowanie pęknięć zmęczeniowych. W trakcie, gdy takie uszkodzenie propaguje pod czujnikiem drabinkowym, następuje stopniowe przerywanie jego powierzchni wraz z elektroprzewodzącą siatką pomiarową. Każdorazowe rozdzielenie pojedynczej ścieżki, w trakcie wzrostu rozmiarów pęknięcia, skutkuje skokowym wzrostem rezystancji czujnika. Realizując pomiar tych zmian w odniesieniu do charakterystyki czujnika oraz geometrii siatki pomiarowej, możliwa jest detekcja oraz określenie rozmiarów rozwijającego się uszkodzenia.



Rys. 3.1 Czujnik drabinkowy [142]

Czujniki drabinkowe, choć dostępne na rynku i oferowane przez uznanych producentów czujników tensometrycznych, nie weszły do powszechnego użytku jako metoda detekcji pęknięć. Przegląd literatury wykazał pojedyncze przykłady ich zastosowania [74][150], a w kilku pracach jedynie wspomina się o tego typu czujnikach [10]. Najprawdopodobniej, jest to wynikiem wad tej metody spowodowanych stosowaniem, w początkowym etapie jej rozwoju, siatek pomiarowych ze ścieżek miedzianych. Z uwagi na właściwości i zachowanie takiej warstwy czulej, występowały dwa niepożądane zjawiska:

- wierzchołek pęknięcia mógł w całości przejść przez ścieżkę nie powodując przerwania siatki pomiarowej;
- w miejscach dużych, cyklicznych odkształceń, miedziana ścieżka mogła się przerwać zmęczeniowo, mimo że pęknięcie nie propagowało w strukturze.

Obecnie, do wytwarzania siatek pomiarowych wykorzystuje się wysoko wytrzymałe materiały, takie jak np. konstantan. Odkształcenie do przerwania ścieżki musi przekroczyć wartość $3\div 5\%$, a odporność zmęczeniowa jest wyższa niż 10^7 cykli przy odkształceniu $\pm 2000\ \mu\text{Str}$. Z kolei, podkładki nośne siatki pomiarowej wykonuje się ze zmodyfikowanych żywic epoksydowo-fenolowych. Sensor jest odporny na działanie temperatury w zakresie $-40^\circ\text{C} \div +200^\circ\text{C}$. Dodatkowo, konstantan charakteryzuje się bardzo niską wartością temperaturowego współczynnika rezystancji TWR na poziomie $2\cdot 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$, czyli o dwa rzędy wielkości niższą niż inne popularne przewodniki. Mimo to, autor nie odnalazł badań weryfikacyjnych, których celem było określenie użyteczności niniejszej metody detekcji pęknięć.

W dalszej części rozdziału przedstawione zostaną badania własne mające na celu weryfikację możliwości zastosowania komercyjnie dostępnych czujników drabinkowych do skutecznej detekcji i kwantyfikacji długości pęknięć zmęczeniowych.

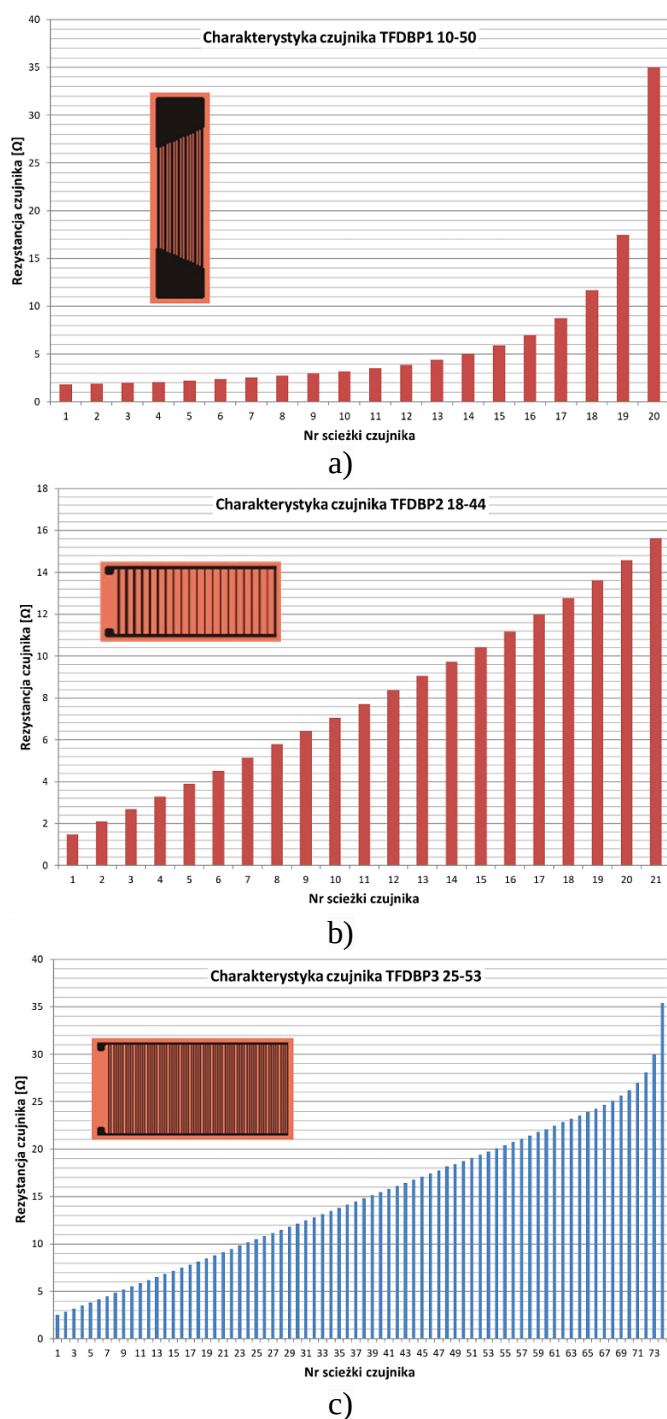
3.2. Badania eksperymentalne czujników drabinkowych

Do badań eksperymentalnych wykorzystano czujniki drabinkowe firmy Tenmex - Pracownia Tensometrii Elektrooporowej [142]. W ofercie występują trzy typy czujników:

- TFDBP1 10-50 - wymiary siatki pomiarowej: szerokość 50 mm, długość 10 mm, 20 ścieżek elektroprowadzących o separacji około 0.5 mm;
- TFDBP2 18-44 - wymiary siatki pomiarowej: szerokość 18 mm, długość 44 mm, 21 ścieżek elektroprowadzących o separacji około 2 mm;

- TFDBP3 25-53 - wymiary siatki pomiarowej: szerokość 25 mm, długość 53 mm, 74 ścieżki elektroprowadzące o separacji około 0.7 mm.

Charakterystyki zmiany rezystancji wybranych czujników drabinkowych względem przzerwania kolejnej ścieżki elektroprowadzącej przestawiono na rys. 3.2. Działanie wszystkich trzech rodzajów czujnika zostało zweryfikowane w ramach kolejnych etapów badań eksperymentalnych.



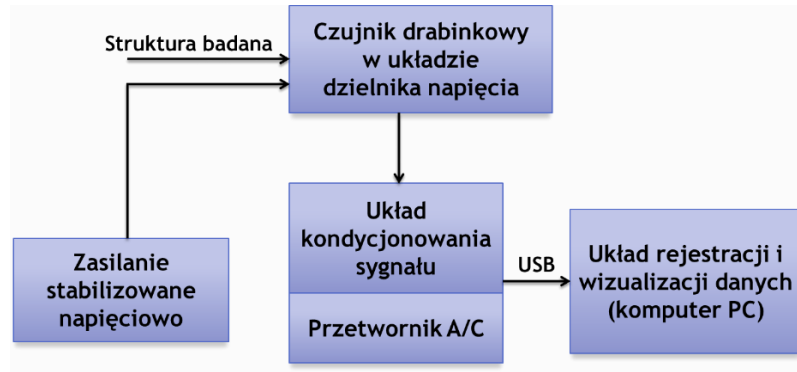
Rys. 3.2 Charakterystyki rezystancyjnych czujników drabinkowych
a) TFDBP1 10-50, b) TFDBP2 18-44, c) TFDBP3 25-53 [142]

Istotnym aspektem mającym wpływ na poprawność działania czujników drabinkowych, podobnie jak w przypadku tensometrów, jest proces ich instalacji na badanym elemencie. Proces przygotowania powierzchni w miejscu instalacji czujnika obejmuje:

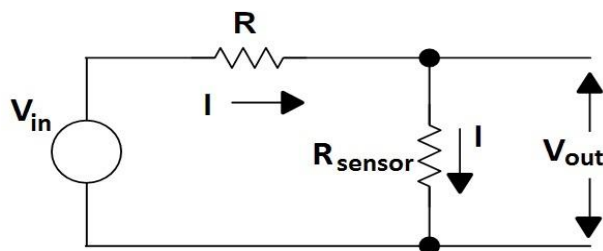
- mechaniczne szlifowanie przy użyciu np. zestawu papierów ściernych o różnej gradacji (w zakresie 120 – 400) w celu usunięcia nierówności, pokryć lakierniczych, innych zanieczyszczeń, nalotów i warstwy tlenków na powierzchni;
- oczyszczenie powierzchni po szlifowaniu odpowiednimi środkami chemicznymi. Autor zastosował w tym celu preparat CSM-3 firmy Vishay, następnie zmywacz Atepo Z-12 firmy Tenmex i alkohol izopropylowy;
- neutralizacja powierzchni po środkach czyszczących w celu zapewnienia odpowiedniej alkaliczności. Zastosowano tutaj neutralizator Atepo Z-03 firmy Tenmex;

Do instalacji czujników na badanych elementach wykorzystano klej cyjanoakrylowy M-Bond 200 firmy Vishay wraz z płynnym katalizatorem, w celu zapewnienia optymalnego procesu utwardzania kleju. Badania były realizowane nie wcześniej, niż 24 h po instalacji czujników, by połączenie adhezyjne uzyskało całkowitą wytrzymałość.

W celu realizacji badań, opracowano układ pomiarowy przeznaczonych do współpracy z czujnikami, przedstawiony na rys. 3.3. Przyklejony do struktury czujnik został włączony w dzielnik napięcia pomiędzy precyzyjny rezystor o wartości 100 Ω a masę układu (rys. 3.4). Dzielnik napięcia podłączono do źródła zasilania stabilizowanego napięciowo na poziomie 5 V DC. Sygnał z czujnika przekazywany jest do karty pomiarowej National Instrument USB NI-6215, pełniącej rolę układu pomiarowo-kondycjonującego. Karta wyposażona jest w zestaw analogowych kanałów wejściowych o zakresie ± 10 V oraz przetwornik analogowo-cyfrowy o rozdzielczości 16 bitów. Karta pomiarowa podłączona jest za pośrednictwem interfejsu USB do komputera PC z oprogramowaniem LabVIEW™ Signal Express do zarządzania procesem rejestracji danych oraz ich wizualizacji.



Rys. 3.3 Schemat blokowy układu rejestracji danych dla czujników drabinkowych [82]



Rys. 3.4 Układ dzielnika napięcia z czujnikiem drabinkowym [59]

Cechą zastosowanego dzielnika napięcia jest to, że jego napięcie wyjściowe nie zależy od samej wartości włączonych rezystancji, a jedynie od ich stosunku. Z uwagi na niską rezystancję początkową czujników drabinkowych rzędu pojedynczych ohmów, zastosowanie rezystancji na poziomie $100\ \Omega$ w górnej gałęzi dzielnika napięcia determinuje w największym stopniu prąd płynący w układzie. Sygnał pomiarowy z czujnika drabinkowego w takim układzie jest wyrażony poniższym równaniem:

$$V_{out} = V_{in} \cdot \left(\frac{R_{sensor}}{R + R_{sensor}} \right) \quad (3.1)$$

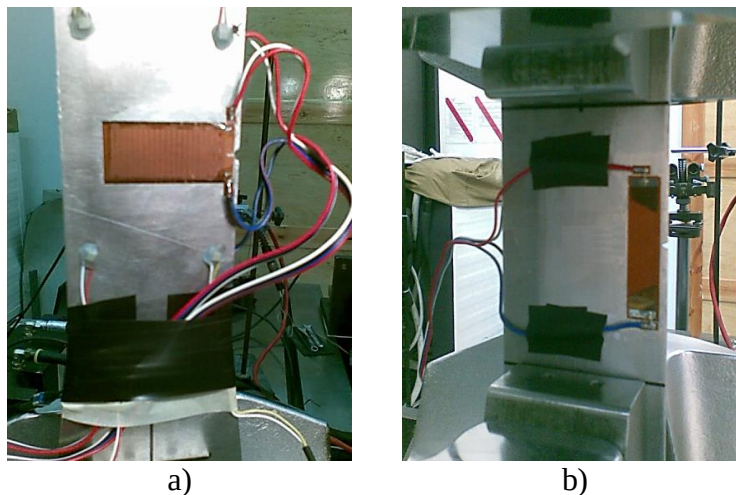
gdzie:

- V_{out} – napięcie wyjściowe z dzielnika napięcia [V];
- V_{in} – napięcie zasilania dzielnika napięcia [V];
- R – rezystancja opornika w górnej części dzielnika napięcia [Ω];
- R_{sensor} – rezystancja czujnika drabinkowego w dolnej części dzielnika napięcia [Ω];

Z uwagi na stały poziom napięcia zasilania, oraz wartość rezystancji opornika, zmiana napięcia wyjściowego będzie wynikać jedynie ze zmiany rezystancji czujnika drabinkowego.

3.2.1. Laboratoryjne badania zmęczeniowe próbek płaskich

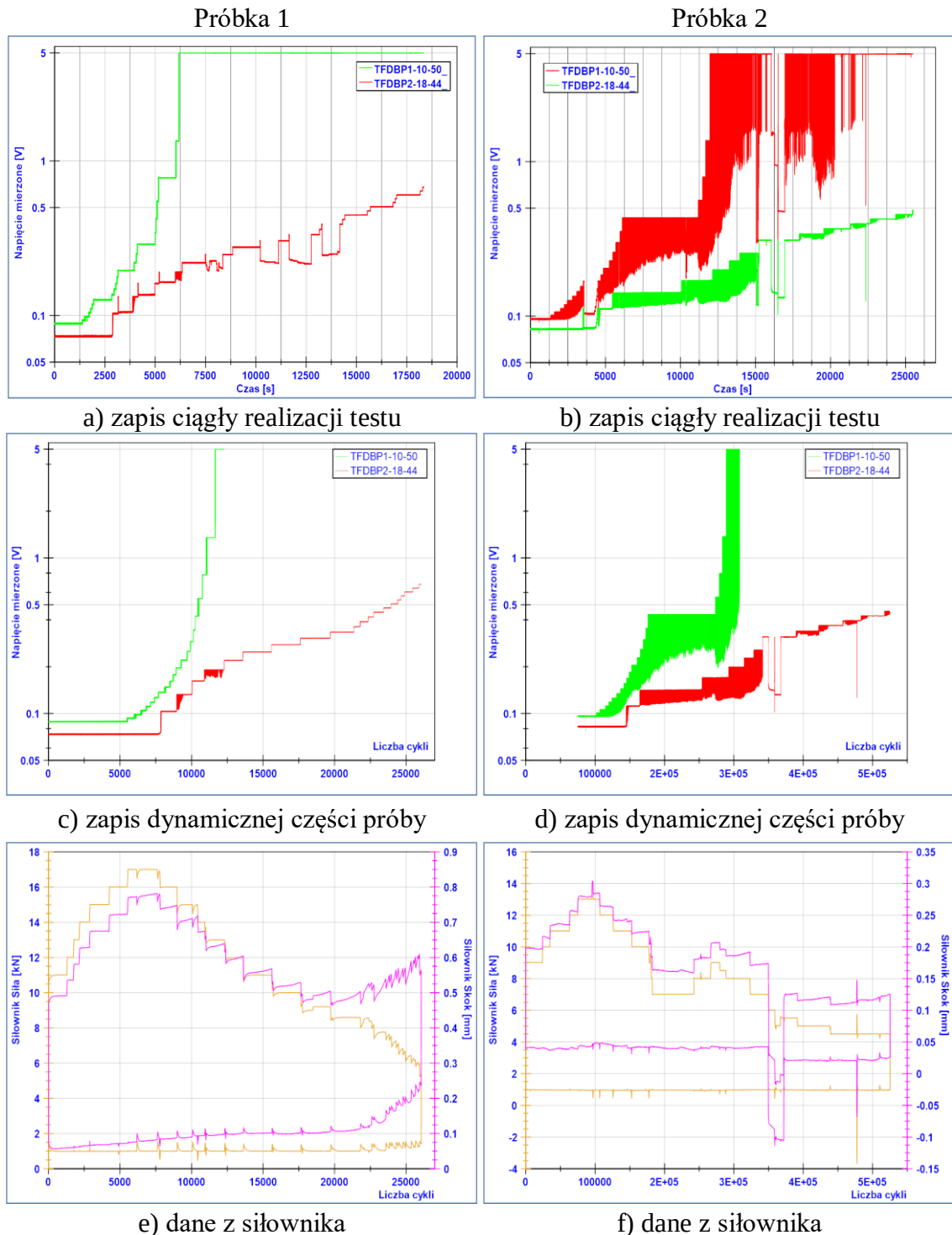
W celu weryfikacji działania czujników drabinkowych przeznaczonych do detekcji i monitorowania propagacji pęknięcia, w ramach pierwszego etapu przeprowadzono badania na próbkach o nieskomplikowanym kształcie. Na próbkach prostokątnych o wymiarach 180x70x2 mm z aluminium PA7, instalowano obustronnie po jednym czujniku danego typu (rys. 3.5) [80][82]. By zapewnić propagację pęknięcia w pożądanej lokalizacji, na próbkach wykonano jednostronnie krawędziowy karb stożkowy lub półokrągły z nacięciem. Próbki poddano badaniom zmęczeniowym w postaci cyklicznego, osiowego rozciągania. Siła minimalna cyklu wynosiła $F_{min}=1$ kN dla przekroju 140 mm². Zastosowano zmienny współczynnik asymetrii cyklu, który był dostosowywany w trakcie realizacji próby, zależnie od bieżącego tempa propagacji pęknięcia. Badania zrealizowano z wykorzystaniem maszyny zmęczeniowej MTS 810.23, oraz układu pomiarowego przygotowanego dla czujników drabinkowych, który został przedstawiony na schemacie rys. 3.3.



Rys. 3.5 Przykłady próbek zastosowanych w badaniach weryfikacyjnych czujników drabinkowych

Na rys. 3.6 i rys. 3.7 przedstawiono wybrane wyniki badań weryfikacyjnych czujników drabinkowych, jako napięcie wyjściowe z układu dzielnika. Dane przedstawione w dziedzinie czasu (rys. 3.6a dla próbki 1, rys. 3.6b dla próbki 2) zawierają wszystkie zarejestrowane fragmenty pomiarów, które zarchiwizowano w ramach badań. Obejmują one zarówno część dynamiczną w trakcie realizacji cykli obciążeń przez maszynę zmęczeniową, jak i część statyczną np. spowodowaną przerwami lub wykonywaniem innych pomiarów. Dane przedstawione względem cykli obciążeń zawierają jedynie dane z dynamicznej części badania (rys. 3.6c-d). Dane zmierzone

z czujników uzupełniono o parametry stanowiska o wartości siły działającej na próbkę oraz skoku siłownika (rys. 3.6e-f).



Rys. 3.6 Przykład wyników badań weryfikacyjnych czujników TFDBP1 i TFDBP2 [80]

Dane z czujników drabinkowych próbkowano z częstotliwością $f_s = 100$ Hz, a częstotliwość wymuszenia realizowanego przez maszynę zmęczeniową wynosiła 2 Hz dla próbki 1 oraz 6 Hz dla próbki 2. Na podstawie wydzielonych zapisów z dynamicznej

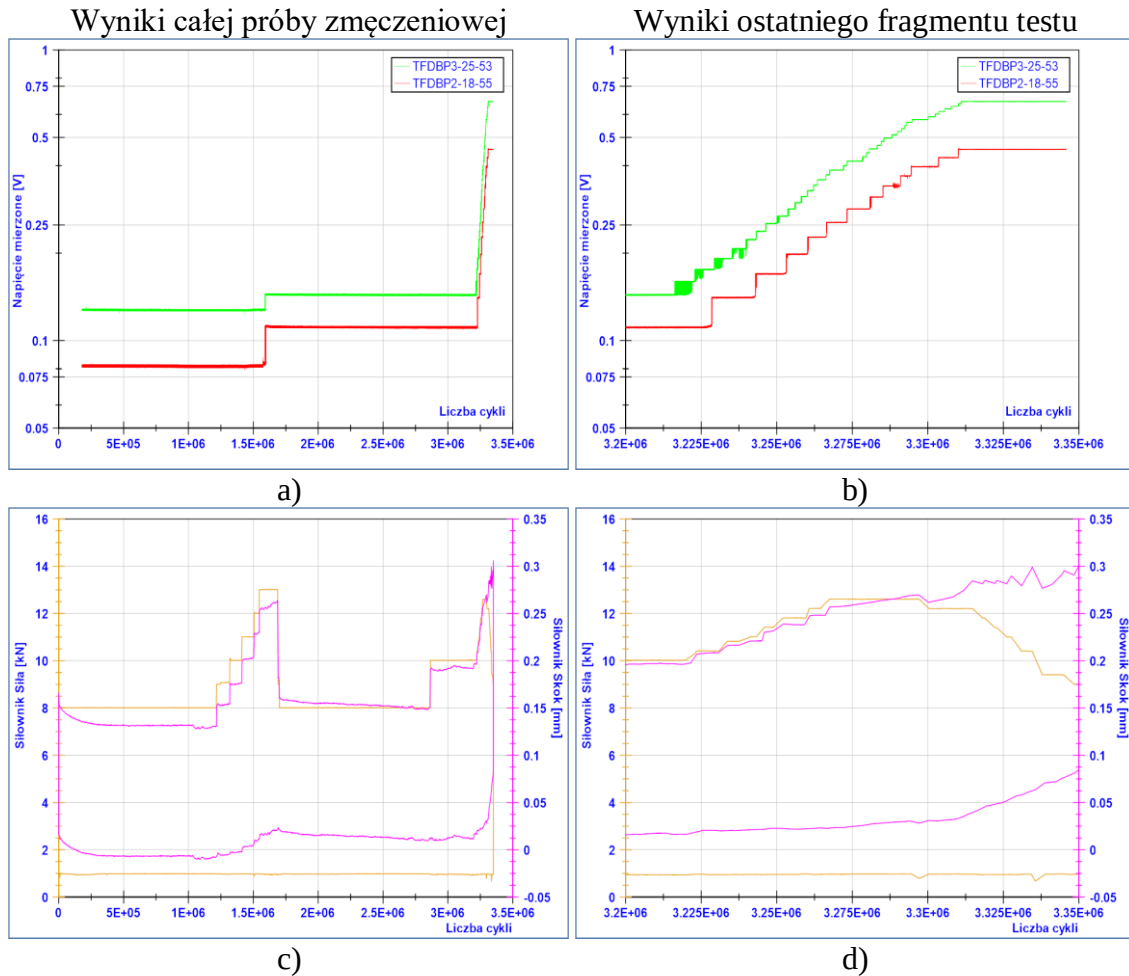
części testów można zaobserwować, że czujniki drabinkowe wykazują się stabilnym działaniem, a zmiany wskazań napięcia odpowiadają propagacji pęknięcia próbki. Choć czujniki po obu stronach próbek nie były umieszczone w tej samej odległości od karbu z uwagi na odmienną budowę, to na podstawie separacji ścieżek elektroprzewodzących można zaobserwować równe pękanie siatki pomiarowej. Uzyskane charakterystyki mają skokową postać i cechują się jednoznaczną zmianą stanu na skutek przzerwania kolejnych ścieżek czujnika.

Zaobserwowano również, że częstotliwość wymuszenia ma wpływ na lokalne minima wskazań z czujników. Dla próbki 1, można zauważyć utrzymywanie poziomu napięcia mierzonego niezależnie od fazy cyklu zmęczeniowego. Natomiast dane z czujników na próbce 2 wykazują tendencję do chwilowego ponownego zwierania ścieżek na część fazy cyklu zmęczeniowego. Wartość tych lokalnych minimów rośnie wraz z postępem propagacji, ale ich zakres świadczy o domykaniu się pęknięcia w obszarze około 2-3 mm od wierzchołka pęknięcia wskazanego przez czujniki drabinkowe.

Na rys. 3.6a-b zilustrowano działanie czujników drabinkowych w stanie statycznym, często po ustaniu obciążenia z maszyny zmęczeniowej. Ma to na celu weryfikację możliwości zastosowania tej metody detekcji pęknięć w systemach monitorowania SHM. Dla obu próbek można zaobserwować zjawisko domykania się pęknięcia w stanie nieobciążonym. Przy czym ponownie, większe obniżenie wartości napięcia wykazała próbka 2, dla której częstotliwość wymuszenia była większa, a obszar domknięcia określony na podstawie geometrii siatek pomiarowych czujników drabinkowych wyniósł około 4 mm.

Na wykresach przedstawionych na rys. 3.7 zilustrowano wyniki testu dla próbki 3. Próba zmęczeniowa była realizowana w trybie ciągłym bez zatrzymania, z częstotliwością wymuszenia 10 Hz. Brak postojów w trakcie próby uniemożliwił zaobserwowanie domykania pęknięcia po ustaniu obciążenia. Natomiast realizacja tego testu pozwoliła na zweryfikowanie działania czujników drabinkowych pod wpływem znacznie większej liczby cykli zmęczeniowych. W porównaniu do wcześniej przeprowadzonych testów, nie zaobserwowano obniżenia stabilności wskazań czujników drabinkowych na skutek zwiększenia liczby zmian obciążeń. Także lokalne minima mierzonego napięcia nie wykazują takiej zmienności, jak na rys. 3.6b, d. Charakterystyki skokowych zmian wartości napięcia dla obu czujników w trakcie rozwoju pęknięcia korespondują obustronnie, zgodnie z geometrią i separacją ścieżek w siatkach

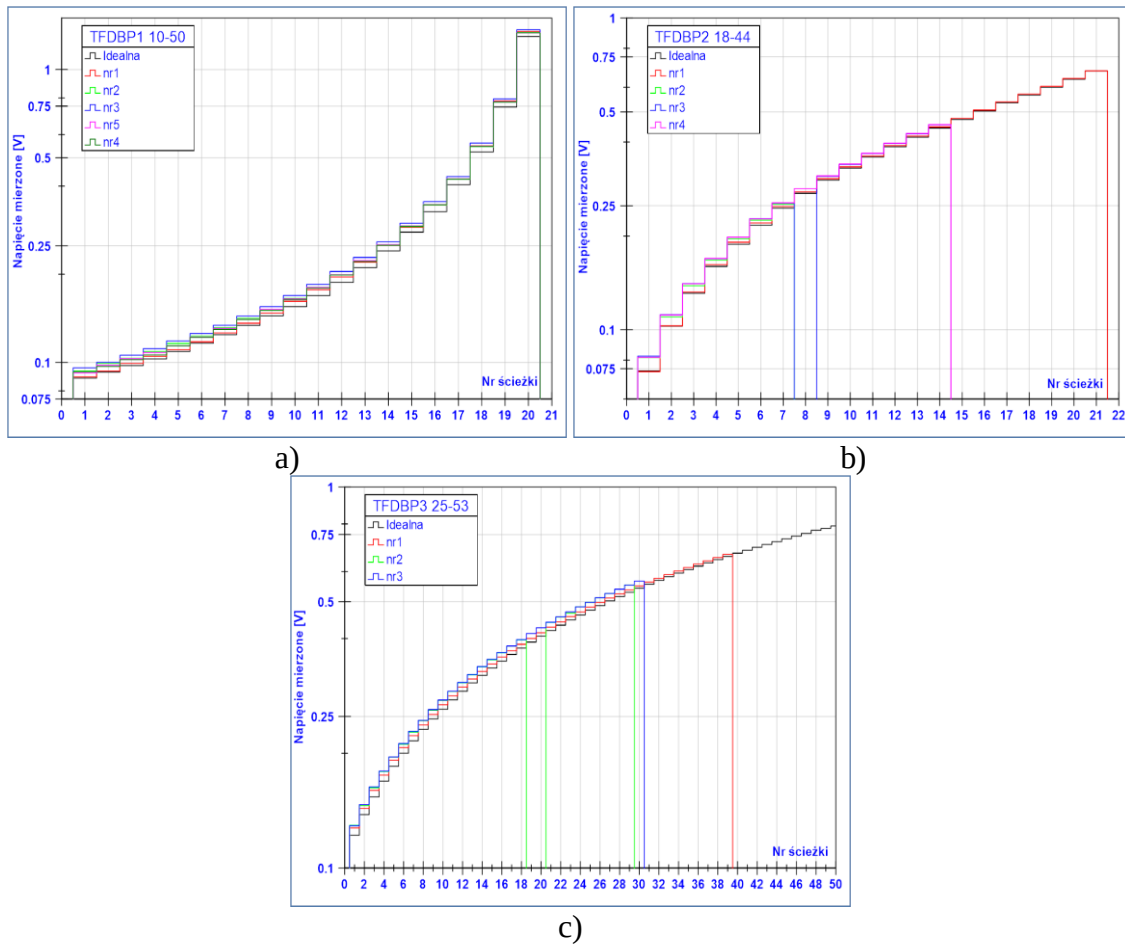
pomiarowych. Potwierdza to, że pęknięcie sygnalizowane jest przez czujnik bez zauważalnych opóźnień, i fakt przerywania się czujnika równo z próbką poddaną badaniom.



Rys. 3.7 Przykład wyników z badań długotrwałych realizowanych w trybie ciągłym

Na podstawie przeprowadzonych testów weryfikacji czujników drabinkowych do detekcji i śledzenia propagacji pęknięcia zmęczeniowego, możliwe było zweryfikowanie odchyłań zmierzonych charakterystyk czujników drabinkowych od przebiegu wzorcowego. Charakterystyki podane przez producenta sprowadzono do wartości napięcia, mierzonego jak dla układu pomiarowego z rys. 3.4, stosując wzór 3.1. W celu wyizolowania poziomów napięcia, odpowiadających aktualnie przerwanej ścieżce czujników z danych pomiarowych, wykorzystano klasyfikację histogramową rozkładu mierzonego napięcia, podzieloną na 1000 klas. Następnie przeanalizowano wartości pierwszych maksimums otrzymanego rozkładu. Wartości napięcia zaokrąglono matematycznie do 1 mV. Charakterystyki zmian napięcia w funkcji numeru kolejnej

pękniętej ścieżki siatki pomiarowej czujnika drabinkowego danego typu przedstawiono na rys. 3.8.



Rys. 3.8 Porównanie charakterystyk wzorcowej i zmierzonych w trakcie badań zmęczeniowych dla czujników drabinkowych
a) TFDBP1 10-50, b) TFDBP2 18-44, c) TFDBP3 25-53

Dla wszystkich zmierzonych danych z czujników drabinkowych uzyskano wartości wyższe od charakterystyki wzorcowej, dla odpowiadającej wartości przerwanej ścieżki pomiarowej. Dla czujników TFDBP1 mediana różnic mieściła się w zakresie $4 \div 8\%$, dla TFDBP2 $1 \div 5\%$ oraz dla TFDBP3 $1 \div 2\%$. Jest to spodziewane, z uwagi na dodatkową rezystancję w postaci przewodów pomiarowych, które w tym układzie pomiarowym są szeregowo włączone z czujnikiem w kanał pomiarowy oraz ze względu na tolerancję rezystancji wykonania siatki pomiarowej na poziomie deklarowanym przez producenta. Przedstawione przebiegi ujawniły dodatkowo sposób, w jaki rezystancja przewodów wpływa na przesunięcie charakterystyki ze względu na umiejscowienie punktów styku elektrod bocznych siatki pomiarowej z przewodami. Jak można zaobserwować na charakterystykach z rys. 3.2, jedynie dla czujnika TFDBP1 pola lutownicze umieszczone są wzdłuż elektrod bocznych czujnika. Dla TFDBP2 i TFDBP3 są one

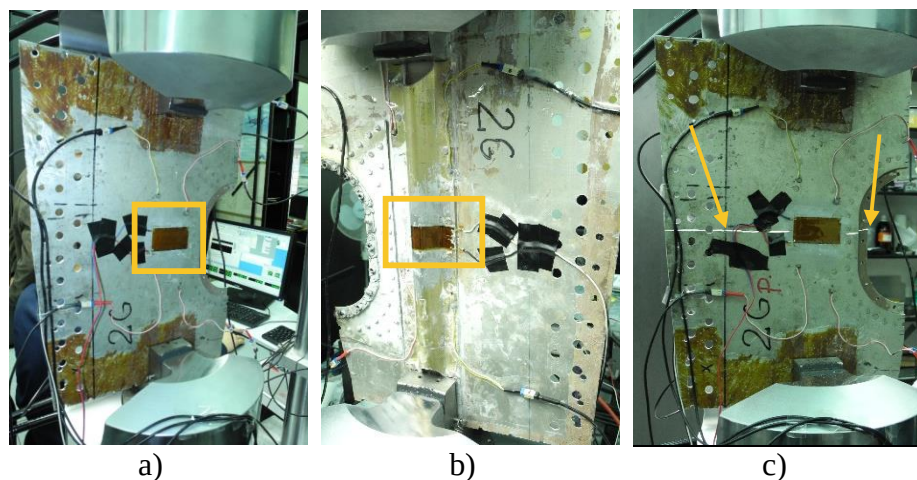
umieszczone punktowo przed pierwszą ścieżką. Relatywny wpływ rezystancji przewodów maleje szybciej dla tych dwóch typów czujnika, ponieważ wzrost rezystancji spowodowany przerwaniem kolejnej ścieżki elektroprzewodzącej wynika ze zmniejszenia liczby równoległe połączonej ścieżki, jak i dodania rezystancji od fragmentu elektrody bocznej na odcinku pomiędzy dwoma sąsiednimi ścieżkami. Taki przypadek występuje, gdy przewodnikiem jest materiał o względnie wysokiej rezystancji, a za taki uważany jest konstantan.

Podsumowując, wyniki zrealizowanych badań laboratoryjnych z propagacją pęknięcia dla próbek o nieskomplikowanym kształcie dowiodły, że czujniki drabinkowe wykazują skuteczność w detekcji i śledzeniu propagacji pęknięcia dla tego typu elementów. Wartości mierzonego napięcia charakteryzują się wysokim stopniem stabilności pomiędzy przerwaniem kolejnych ścieżek siatki pomiarowej, a skokowe zmiany są jednoznacznie identyfikowane na podstawie nieprzetworzonych danych. Opracowany układ pomiarowy poprawnie współpracuje z czujnikami.

3.2.2. Laboratoryjne badania zmęczeniowe elementów konstrukcyjnych

Po pozytywnej weryfikacji działania czujników drabinkowych zainstalowanych na próbkach o nieskomplikowanym kształcie, przeprowadzono badania zmęczeniowe elementu konstrukcyjnego samolotu PZL-130 TCI Orlik, składającego się z fragmentu poszycia z podłużnicą (tzw. „omegowką”). Do badań wykorzystano 2 czujniki (rys. 3.9):

- TFDBP2 – zainstalowany na podłużnicy typu „omega”, który jest elementem o nieliniowym kształcie (rys. 3.9b);
- TFDBP3 – zainstalowany na poszyciu w osi podłużnicy (rys. 3.9a).



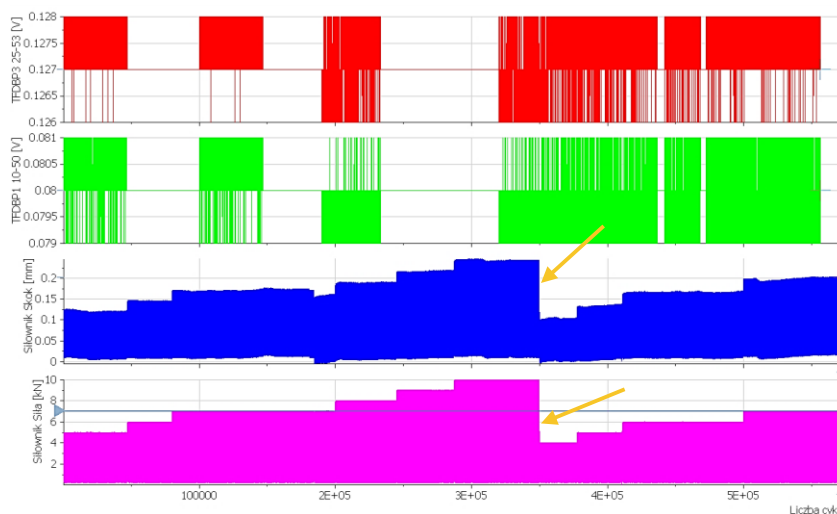
Rys. 3.9 Element konstrukcyjny samolotu do weryfikacji działania czujników drabinkowych a) strona poszycia, b) strona z podłużnicą, c) próbka po nacięciu [82]

Realizacja testu przebiegała w trzech etapach, których wyniki przedstawiono poniżej:

- inicjacja pęknięcia / wprowadzenie karbu – weryfikacja stabilności działania czujników (rys. 3.10);
- propagacja pęknięcia od strony poszycia – detekcja i śledzenie propagacji pęknięcia przez czujnik TFDBP3 z dalszą weryfikacją stabilności działania dla czujnika TFDBP2 (rys. 3.11);
- propagacja pęknięcia na podłużnicy – detekcja i śledzenie propagacji pęknięcia na podłużnicy za pomocą czujnika TFDBP2 (rys. 3.13).

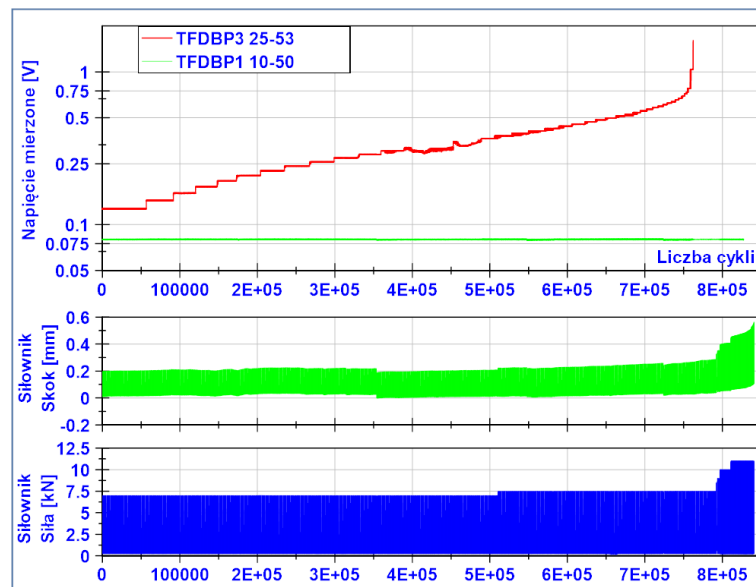
W trakcie realizacji etapu a), dane z czujników drabinkowych były archiwizowane okresowo, z uwagi na brak propagacji. Stopniowo podnoszono wartość maksymalną siły w ramach cyklu zmęczeniowego, przy utrzymaniu wartości minimalnej na poziomie 0.25 kN, zwiększając współczynnik asymetrii cyklu. Na rys. 3.10, po zrealizowaniu 350 000 cykli, zaznaczono moment wykonania na elemencie karbu w postaci dwustronnego nacięcia, by skrócić czas oczekiwania na inicjację pęknięcia. Etap zakończono, gdy pęknięcie na poszyciu pojawiło się w pobliżu czujnika TFDBP3.

Warto zauważyć, że w trakcie etapu a), czujniki drabinkowe w całym okresie wskazywały stabilną wartość mierzonego napięcia. Szczegółową analizę przedstawiono w tabeli 1, gdzie dodatkowo porównano wyniki dla czujnika TFDBP2 w trakcie etapu b) testu. Dane nie były poddane żadnym procesom przetwarzania, jak filtrowanie, a mimo to parametry statystyczne sygnału, takie jak wartości średnie: arytmetyczna i średniokwadratowa, mediana i odchylenie standardowe są na zbliżonym poziomie dla czujnika TFDBP2 dla obu etapów testu.

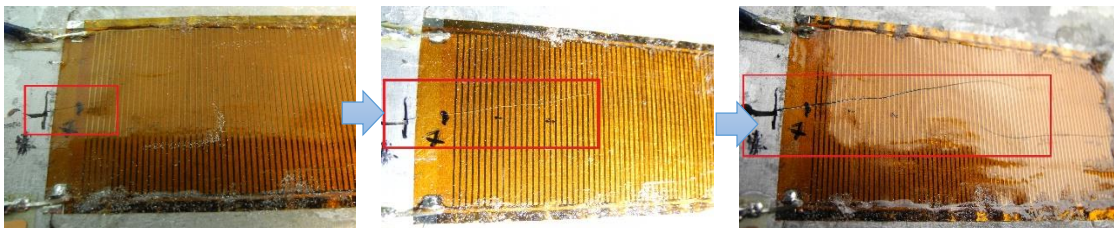


Rys. 3.10 Wyniki z etapu a) testu - inicjacja pęknięcia

W etapie b), czujnik TFDBP3 śledził propagację pęknięcia znajdującego się na fragmencie poszycia. Czujnik prawidłowo reagował na wzrost pęknięcia, a wizualne wskazania długości uszkodzenia korespondowały ze skokowymi zmianami napięcia mierzonego. W okolicach 400 000. cyklu zaobserwowano zwiększenie zmienności wskazań czujnika, i pojawienie się poziomów niezgodnych ze spodziewaną charakterystyką zmian napięcia. Potwierdzono przy użyciu metod wizualnych, że ma to związek z rozpoczęciem propagacji pęknięcia po drugiej stronie próbki w tym samym przekroju poprzecznym. Skutkowało to rozpoczęciem przerywania czujnika również od drugiej strony (rys. 3.12). Jednakże, dalszy postęp propagacji od końca siatki pomiarowej nie jest wyraźnie identyfikowalny na podstawie mierzonego napięcia, a dominujące skokowe zmiany sygnału są skutkiem przyrostu pęknięcia pierwotnego. Dlatego, pomimo przerywania wszystkich ścieżek siatki pomiarowej czujnika TFDBP3 w ramach niniejszego testu, z otrzymanej charakterystyki można wyróżnić około 40 z ponad 70 skokowych zmian. Przyczyny tego zjawiska zostaną wyjaśnione w dalszej części pracy.



Rys. 3.11 Wyniki z etapu b) testu - propagacji pęknięcia na fragmencie poszycia lotniczego elementu konstrukcyjnego



Rys. 3.12 Postęp przerywania czujnika drabinkowego TFDBP3

W trakcie etapu b) testu, jedynie czujnik TFDBP3 był wykorzystany do detekcji i śledzenia propagacji pęknięcia. Natomiast kontynuowano weryfikację stabilności działania czujnika TFDBP2 pod wpływem długotrwałego oddziaływania zmiennych obciążeń. Potwierdzając wyniki z etapu a), czujnik TFDBP2 w trakcie obu części badania wykazał się niezmiennym zakresem wskazań, co potwierdza m. in. analiza wartości średnich, które różnią się w obu częściach testu zaledwie o 0.1 mV.

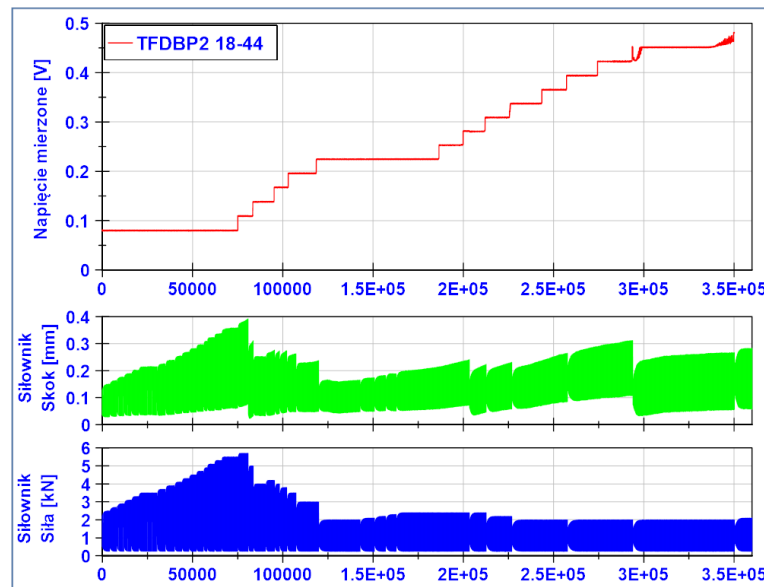
Tabela 1 Wyniki stabilności wskazań czujników drabinkowych w trakcie testu na elemencie konstrukcyjnym

	Etap nukleacji pęknięcia		Etap propagacji pęknięcia na poszyciu
Czujnik	TFDBP3 25-53	TFDBP2 18-44	TFDBP2 18-44
Wartość minimalna	0.126	0.079	0.0785
Wartość maksymalna	0.128	0.081	0.081
Średnia arytmetyczna	0.128	0.080	0.080
Średnia kwadratowa	0.127	0.080	0.080
Mediana	0.127	0.080	0.080
Zakres	0.002	0.002	0.0026
Odchylenie standardowe	2.84E-4	2.16E-4	2.88E-4
Standardowy błąd	6.66E-07	5.06E-07	3.53E-07
Wariancja	8.08E-08	4.66E-08	8.27E-08
Liczba cykli	573 517	573 517	840 719

W ramach etapu c) testu, zweryfikowano działanie czujnika TFDBP2, zainstalowanego na podłużnicy. Jak przytoczono wcześniej, (w podrozdziale 3.2), ten czujnik charakteryzuje siatka pomiarowa o separacji ścieżek około 2 mm. Dzięki zmiennej grubości kolejnych ścieżek, uzyskano czujnik w przybliżeniu o liniowej zależności rezystancji od liczby przerwanych linii. Monitorowanie elementów o zmiennym kształcie jest istotne z punktu widzenia podatności użytkowej, a elastyczny czujnik drabinkowy może być zastosowany w takich lokalizacjach.

W niniejszym przypadku, czujnik również zachowywał się prawidłowo i stabilnie. Ścieżki jego siatki pomiarowej przerywały się równo z wierzchołkiem pęknięcia propagującego na podłużnicy, określanego za pomocą metod wizualnych. Dłuższy fragment bez zmiany wskazań w około 150 000 cyklu wyznacza moment propagacji pęknięcia w pierwszym przegięciu podłużnicy (rys. 3.14). Na podstawie danych

z literatury [71][88], dla tego elementu są to naturalne miejsca spowolnienia rozwoju uszkodzenia. Podobne zjawisko zaobserwowano, gdy pęknięcie dochodziło do szczytu podłużnicy (końcowa część pomiarów).



Rys. 3.13 Wyniki 3 etapu testu – propagacja pęknięcia na podłużnicy z czujnikiem TFDBP2



Rys. 3.14 Postęp przerywania czujnika drabinkowego TFDBP2

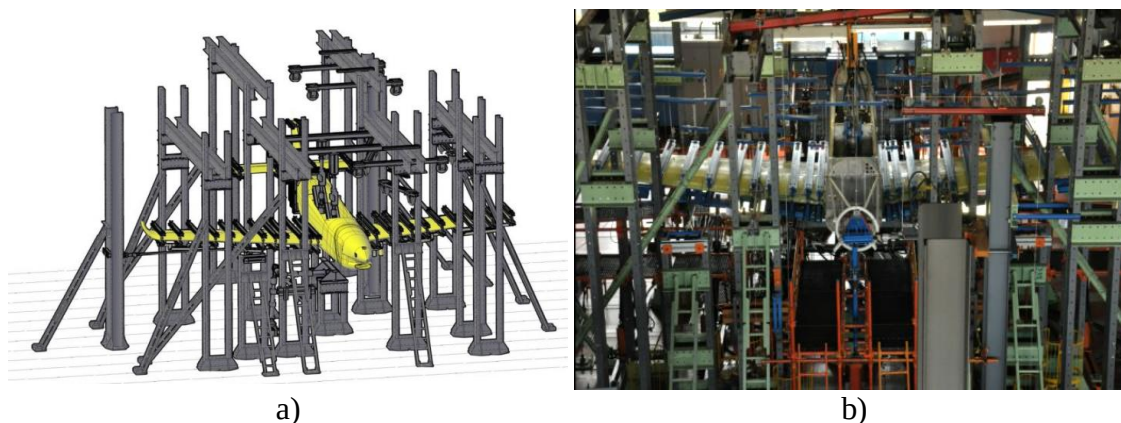
Podsumowując, wyniki badań poprawności działania czujników drabinkowych przeznaczonych do detekcji i śledzenia propagacji pęknięcia, zrealizowanych dla elementu konstrukcyjnego, potwierdziły skuteczność tej metody. Czujniki w sposób jednoznaczny pozwalają określić moment przyrostu rozmiarów uszkodzenia w ramach rozdzielczości ich siatki pomiarowej. Nie zaobserwowano odklejenia czujnika od struktury elementu, ani fałszywie pozytywnych lub fałszywie negatywnych wskazań. We wszystkich etapach testu, zmierzone wartości były bardzo stabilne, a uzyskane charakterystyki zmiany rezystancji były zbieżne z danymi producenta. Na podstawie danych z czujnika TFDBP2 potwierdzono brak wpływu długotrwałego oddziaływania zmiennych obciążeń na poziom napięcia wyjściowego z układu dzielnika. Dodatkowo, na podstawie danych z czujnika TFDBP3 ujawniono ograniczenie skuteczności detekcji

pęknięcia w przypadku jego propagacji od końca siatki pomiarowej, co zostanie rozwinięte w końcowej części niniejszego rozdziału.

3.2.3. Badania długotrwałe w trakcie pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu szkolnego PZL-130 TCII Orlik

Kolejnym krokiem badań weryfikacyjnych było zastosowanie czujników drabinkowych do śledzenia propagacji pęknięć w trakcie pełnoskalowej próby zmęczeniowej FSFT (z ang. Full Scale Fatigue Test) samolotu szkolnego PZL-130 TCII Orlik [78][79]. Badanie tego typu polega na umieszczeniu całego statku powietrznego wewnątrz tak zwanej klatki zmęczeniowej, w której zestaw siłowników hydraulicznych zadaje obciążenia w zdefiniowanych obszarach konstrukcji (rys. 3.15). W ten sposób, wykorzystując widmo obciążeń rzeczywiście oddziałujących na strukturę samolotu w czasie eksploatacji, możliwa jest realizacja symulowanych lotów. Celem przeprowadzenia badania jest wykrycie obszarów powstawania uszkodzeń konstrukcji, a także określenie jej wytrzymałości pod wpływem zmiennych, długotrwałych obciążeń.

W trakcie zrealizowanych badań w warunkach laboratoryjnych, poziom obciążeń oraz współczynnik asymetrii cyklu były dobierane tak, by zapewnić postęp propagacji pęknięcia w obciążanym elemencie. W trakcie FSFT, poziom wyężenia struktury odpowiada wartości rzeczywiście występującej w locie samolotu, w ramach projektowanego widma eksploatacji.

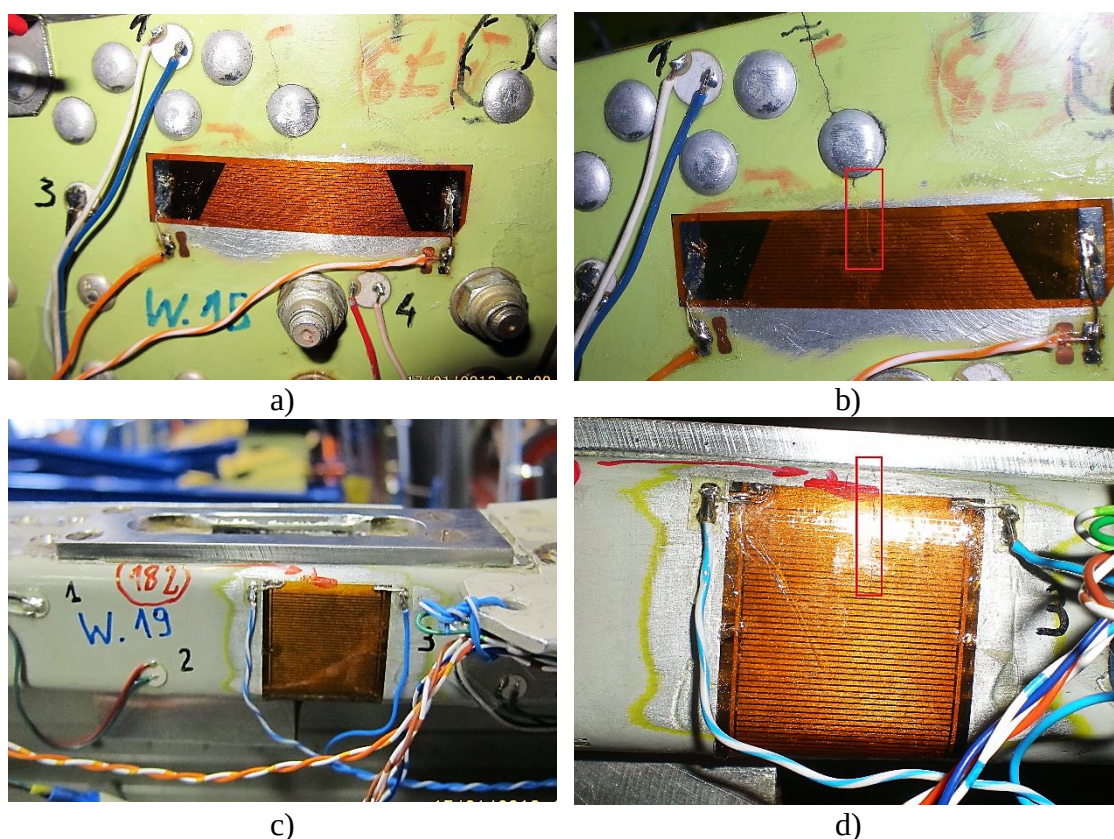


**Rys. 3.15 Stanowisko pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu PZL-130 TCII Orlik
a) schemat, b) widok rzeczywisty [88]**

Aby zweryfikować działanie czujników drabinkowych, głównie wybierano lokalizacje o już zainicjowanych pęknięciach. W ten sposób zastosowanie niniejszych czujników wykazało potencjalną wartość dodaną, w postaci bieżącego monitorowania przyrostu pęknięcia w wybranych lokalizacjach i przekazywaniu tej informacji do

personelu odpowiedzialnego za realizację próby tego statku powietrznego. Zdaniem Autora jest to jedno z naturalnych pól eksploatacji tej metody w celu ograniczenia czasochłonności inspekcji metodami NDT, przy jednoczesnym pozyskaniu standardowo niedostępnych informacji, jak np. zależności długości pęknięcia od liczby symulowanych godzin lotu.

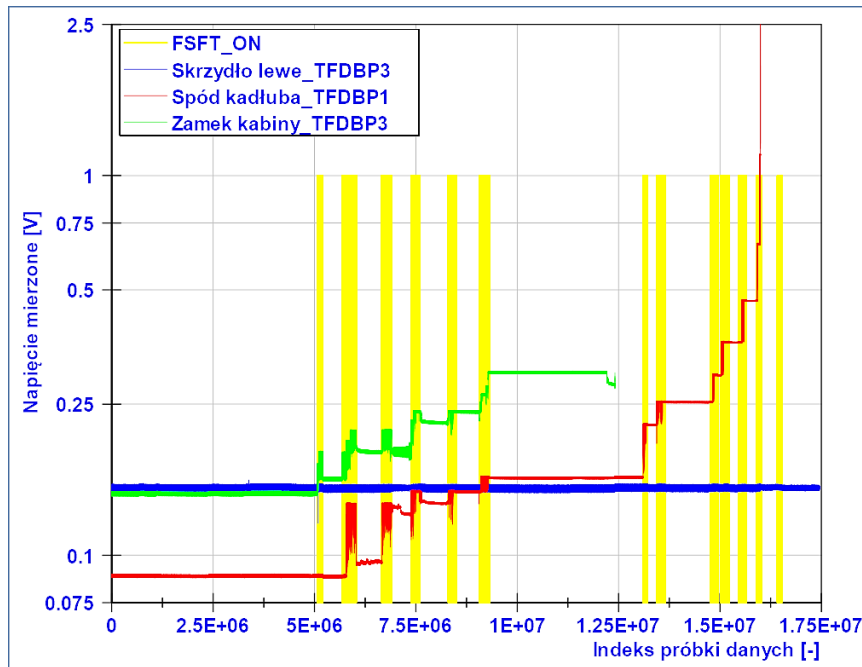
W trakcie realizacji próby FSFT zainstalowano kilka czujników drabinkowych na różnych etapach jej zaawansowania. Czujnik TFDBP1 monitorował pęknięcie ujawnione w trakcie inspekcji NDT na poszyciu dolnej centralnej części skrzydła, w pobliżu wzłużnej osi symetrii samolotu (rys. 3.16a). Pęknięcie propagowało dwukierunkowo od jednego z nitów. Z uwagi na ograniczony obszar możliwy do instalacji, siatka pomiarowa czujnika została ustawiona w taki sposób, aby nachodzić około 3 mm na pęknięcie (rys. 3.16b). Drugi czujnik typu TFDBP3 umieszczono na lewej bocznej podłużnicy w obszarze zamka przedniej kabiny pilotów (rys. 3.16c). W tym przypadku, siatka pomiarowa nachodziła na wierzchołek pęknięcia na około 1 mm.



Rys. 3.16 Lokalizacja czujników drabinkowych na obiekcie badań FSFT

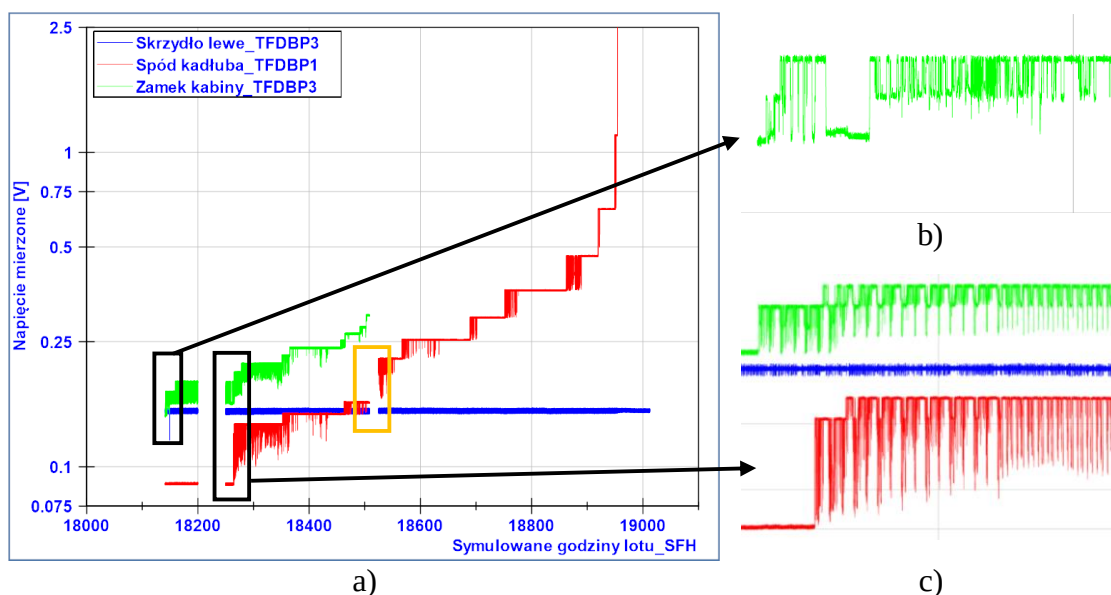
- a) czujnik TFDBP1 na dolnym poszyciu skrzydła po instalacji i
- b) z zaznaczonym propagującym pęknięciem
- c) czujnik TFDBP3 w obszarze zamka kabiny pilotów po instalacji i
- d) z zaznaczonym propagującym pęknięciem

Podobnie jak dla wizualizacji danych z testów weryfikacyjnych przedstawionych w części 3.2.1, oddzielnie przedstawiono cały zbiór zarchiwizowanych danych w tym okresie (rys. 3.17). Na żółto zaznaczono obszary, gdy samolot był poddawany obciążeniom w ramach postępu FSFT. Następnie wyodrębniono fragmenty zapisów jedynie z dynamicznej części próby, i przedstawiono je w funkcji parametru symulowanych godzin lotu SFH (z ang. Simulated Flight Hours) na rys. 3.18.



Rys. 3.17 Dane z czujników drabinkowych zarchiwizowane w trakcie FSFT – zbiór 1

Z wyników pomiarów napięcia dla czujników drabinkowych przedstawionych na rys. 3.17 można zaobserwować efekty domykania się pęknięcia po ustaniu obciążenia. Identyczne zjawisko już zostało zidentyfikowane w ramach wcześniej przeprowadzonych badań. Zasięg domykania w stanie ustalonym (odciążonym) sukcesywnie zanika wraz ze wzrostem rozmiarów uszkodzenia. Dla czujnika TFDBP3 umieszczonego na zamku, domykanie początkowo miało zasięg do około drugiej ścieżki (około 1.4mm), lecz po przerwaniu ścieżki nr 7, mierzalny efekt domykania w trakcie postoju przestał występować. Dla czujnika TFDBP1 efekt domykania w stanie statycznym zanikł, gdy pęknięcie weszło w głąb siatki pomiarowej na około 4.5 mm.



Rys. 3.18 Dane z czujników drabinkowych z dynamicznej części próby FSFT
a) kompletny przebieg,
b) zbliżenie na fragment wykrycia pęknięcia przez czujnik na zamku kabiny,
c) zbliżenie na fragment wykrycia pęknięcia przez czujnik na spodzie kadłuba

Na przebiegach napięcia mierzonego podczas dynamicznej części testu można zaobserwować, że czujniki drabinkowe przeważnie prawidłowo i stabilnie odpowiadają na przyrost długości pęknięcia w trakcie realizacji próby FSFT. W rozpatrywanym zakresie występują dwie przerwy w danych widoczne na wykresie po 18200 SFH w wymiarze około 50 SFH oraz krótsza około 20 SFH po 18500 SFH. Występuje zjawisko fluktuacji wartości minimalnych, intensywniejsze do około 1/3 rozpatrywanego zakresu danych, ale lokalne maksymalne wartości napięcia wykazują się wysoką wiarygodnością.

Na rys. 3.18 zilustrowano w powiększeniu pierwsze zmiany napięcia mierzonego, świadczące o przerwaniu początkowych ścieżek siatek pomiarowych czujników. Czujnik TFDBP3 już na wczesnym etapie ujawnił przyrost pęknięcia, a następnie napięcie mierzone skokowo zmieniało swoją wartość w trakcie przyrostu długości uszkodzenia. Natomiast czujnik TFDBP1 ulokowany na spodzie kadłuba (czerwony) na istniejącym pęknięciu, na początku nie wskazał poprawnie rozmiarów uszkodzenia. W trakcie instalacji jego siatka pomiarowa została umieszczona w taki sposób, aby wierzchołek pęknięcia znajdował się w około 1/3 długości czujnika. Spodziewano się, że od razu po uruchomieniu próby pojawi się skokowa i dość wysoka zmiana wskazań. Lecz ta wystąpiła z opóźnieniem po około 100 SFH. Prawdopodobną przyczyną tego zjawiska było naprężenie wstępne tego obszaru w trakcie instalacji czujnika. Z tego powodu,

odkształcenie w rejonie wierzchołka pęknięcia nie przekroczyło wartości progowej 5% dla przerwania ścieżki, podanej przez producenta. Inną hipotezą może być wystąpienie sytuacji, w której ścieżka w okolicy wierzchołka pęknięcia została przerwana, ale zmiana napięcia była bliska granicy rozdzielczości sygnału obciążonego szumem. I dopiero przy wystąpieniu większego obciążenia w tym rejonie, otwarcie pęknięcia doprowadziło do przerwania ścieżek w przedniej części siatki pomiarowej, co doprowadziło do ujawnionej skokowej zmiany mierzonego napięcia. Ten przypadek unaoczniał potencjalne dwa ograniczenia tej metody, tzn.:

- czujnik najlepiej instalować na strukturze w stanie bez dodatkowego obciążenia;
- instalację czujnika do monitorowania już zainicjowanego pęknięcia wykonywać tak, aby pierwsza ścieżka siatki pomiarowej czujnika znajdowała się w bezpośredniej bliskości wierzchołka pęknięcia.

Innymi słowy, siatka pomiarowa w trakcie instalacji nie powinna obejmować swoim zakresem w sposób znaczny strefy oddziaływania plastycznej deformacji struktury, utworzonej na skutek postępu uszkodzenia.

W odniesieniu do powiększonych przebiegów napięcia pokazanych na rys. 3.18b-c, warto podkreślić charakter przejściowy, towarzyszący skokowej zmianie napięcia mierzonego dla czujników drabinkowych. Widoczne jest tu cykliczne zwieranie nowo przerwanej ścieżki siatki pomiarowej, której towarzyszą zmiany wartości chwilowej. Można zaobserwować, że intensywność fluktuacji maleje wraz z oddalaniem się wierzchołka pęknięcia od nowo pękniętej ścieżki. Początkowo, odstępów pomiędzy lokalnymi minimami są gęsto ułożone i charakteryzują się znacznym, chwilowym spadkiem amplitudy. Lecz dość szybko, czas utrzymywania wartości charakterystycznej dla bieżącego stanu czujnika zaczyna zwiększać swój udział w sygnale, a amplitudy minimów mają coraz mniejszy zasięg. Efekty tej fluktuacji mogą zostać docelowo wyeliminowane przez zastosowanie filtracji lub innych metod analizy, np. wyznaczenia krótkookresowej obwiedni sygnału. Jednak istotne jest, że poziom danego skoku sygnału jest jednoznaczny i stabilny oraz pełni rolę asymptoty, która nie jest przekraczana przez wartość chwilową w trakcie realizacji cyklicznych obciążeń.

Na wykresie z rys. 3.18 pokazano przebieg napięcia dla jeszcze jednego czujnika z grupy TFDBP3, który został umieszczony na górnej części lewego skrzydła przed istniejącym, krótkim pęknięciem postępującym od nitu. Jednak to uszkodzenie nie propagowało na dalszym etapie, stąd brak zmiany jego wartości. Ten czujnik wykorzystano do sprawdzenia stabilności działania pod wpływem rzeczywistych

obciążeń eksploatacyjnych dla testowanego samolotu w warunkach szumu elektromagnetycznego typowego dla obiektów przemysłowych. Choć poziom zmienności był podwyższony względem badań w warunkach laboratoryjnych i wynosił około 6 mV, zamiast 2 mV (nieprzetworzony sygnał bez filtracji), to np. odchylenie standardowe wynosiło $8.43E-4$, a więc zawierało się w tym samym rzędzie wielkości.

3.3. Wnioski i spostrzeżenia z badań weryfikacyjnych czujników drabinkowych

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań dotyczących weryfikacji działania czujników drabinkowych przeznaczonych do detekcji i śledzenia propagacji pęknięć. Koncepcja tych czujników oraz sposób pomiaru jest zgodny z koncepcją systemów SHM, gdzie czujniki monitorowania uszkodzeń są trwale zintegrowane z obiektem.

Plan badań obejmował testy:

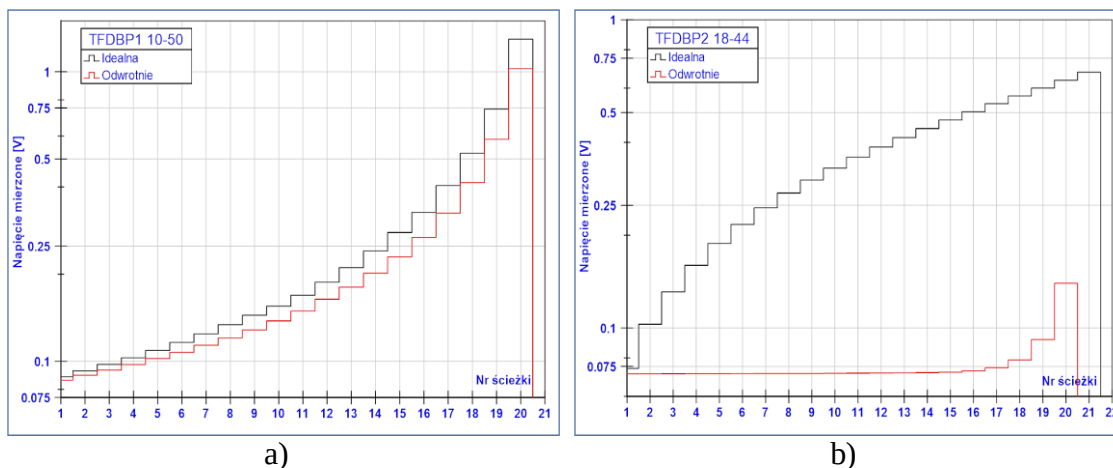
- na próbkach o nieskomplikowanych kształcie;
- na lotniczym elemencie konstrukcyjnym;
- w trakcie realizacji pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu PZL-130 TCII Orlik.

Powyższy zestaw eksperymentów pozwolił na zbadanie własności tych czujników oraz określenie ich podatności użytkowej w monitorowaniu pęknięć elementów konstrukcyjnych, nie ograniczając się przy tym jedynie do prób w warunkach laboratoryjnych na próbkach podstawowych. W trakcie realizacji tych badań, czujniki wykazały się skutecznością detekcji pęknięcia i poprawnością działania. Zmiany mierzonego napięcia wyjściowego z układu dzielnika odpowiadały bieżącemu stanowi próbek i elementów. Potwierdzono, że charakterystyki wzorcowe producenta odpowiadają tym, uzyskanym w trakcie testów dla statystycznie znaczącej ilości czujników. Zmiany wskazań z czujników na skutek propagującego pęknięcia są wprost identyfikowalne, nawet na podstawie obserwacji nieprzetworzonego sygnału, dzięki budowie siatki pomiarowej złożonej z szeregu ścieżek elektroprzewodzących. Pomimo sposobu instalacji czujnika przy użyciu połączenia adhezyjnego, nie zaobserwowano w ramach prowadzonych badań zjawiska delaminacji czujnika od powierzchni elementu, ani znaczących opóźnień w przerywaniu czujnika względem lokalizacji wierzchołka pęknięcia, wyznaczanego metodami wizualnymi.

Zaobserwowano szereg czynników, które determinują zastosowanie czujników drabinkowych. Z uwagi na domykanie pęknięcia w stanie nieobciążonej próbki, wskazania czujników mają tendencję do obniżania swojej wartości. Jest to spowodowane ponownym zwieraniem już przerwanych ścieżek. Zasięg tego ponownego łączenia zależny jest od wielkości uszkodzenia, i w niektórych badaniach dochodził do 3-4 mm. **Determinuje to ograniczenie stosowalności tych czujników do systemów monitorowania uszkodzeń pracujących w trybie ciągłym, tzn. gdy struktura poddawana jest obciążeniom.**

W dynamicznych fragmentach testów, również występuje efekt zwierania ścieżek siatki pomiarowej na skutek cyklicznie występujących obciążeń, co prowadzi do fluktuacji lokalnych wartości minimalnych mierzonego napięcia. Jednak chwilowe wartości maksymalne osiągają spodziewany dla aktualnego zaawansowania propagacji pęknięcia poziom. Zatem nie jest to zjawisko wykluczające stosowanie czujników drabinkowych do monitorowania pęknięć konstrukcji. Intensywność tych fluktuacji, podobnie jak w przypadku zwierania w stanie statycznym, zależy od rozmiarów pęknięcia i lokalizacji jego wierzchołka względem kolejnych ścieżek siatki pomiarowej czujnika.

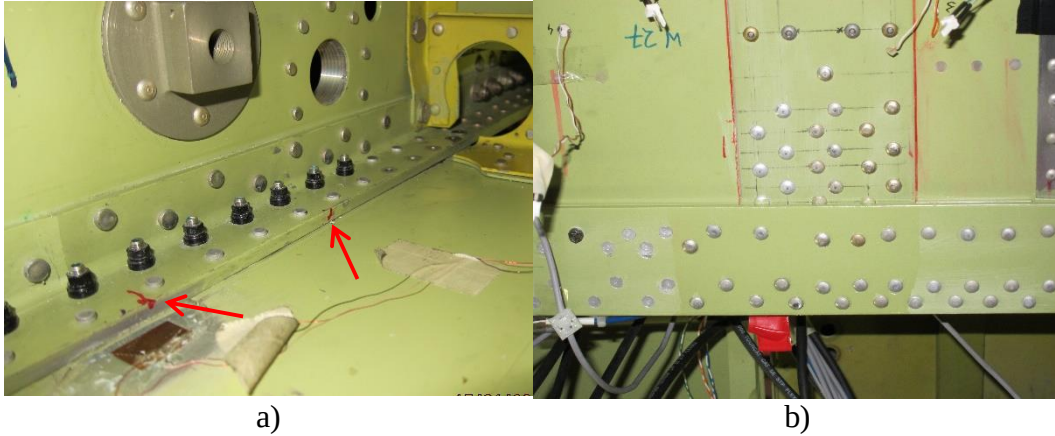
Kolejną obserwacją wynikającą ze zrealizowanych testów była zależność umiejscowienia punktów przyłączeniowych czujników z możliwością detekcji pęknięcia. W czujniku TFDBP1 elektrody boczne są równocześnie punktami podłączenia przewodów, lecz dla pozostałych dwóch typów, punkty te umieszczone są przy pierwszej ścieżce. Skutkuje to różnicami w rozplywie prądu wewnątrz siatki pomiarowej, która jest wykonana z konstantanu, uważany za stop oporowy. Efekt tego zauważono w trakcie testu, w którym pęknięcie zaczęło propagować z obu stron czujnika, lecz zmiany w sygnale na skutek przerywania końcowych ścieżek pozostawały bez zauważalnego wpływu na mierzone napięcie. Przeprowadzono tutaj testy, mające na celu porównanie charakterystyki producenta i otrzymanej w trakcie przecinania skalpelem kolejnych ścieżek od końca siatki pomiarowej. Wyniki tego porównania dla czujnika TFDBP1 oraz TFDBP2 przedstawiono na rys. 3.19. **Zauważono, że czujnik TFDBP2 (i TFDBP3) jest w szerokim zakresie nieczuły na przerywanie ścieżek od końca siatki pomiarowej.** Natomiast charakterystyka czujnika TFDBP1 jest znacznie obniżona, w porównaniu do tej, przewidzianej przez producenta.



Rys. 3.19 Porównanie charakterystyk czujników drabinkowych wzorcowej i nacinanej od końca siatki pomiarowej, a) czujnika TFDBP1, b) czujnika TFDBP2

Oznacza to, że przy zastosowaniu czujników TFDBP2 oraz TFDBP3, kierunek propagacji pęknięcia musi być znany, a czujnik odpowiednio zorientowany przy instalacji, aby skutecznie śledzić rozwój uszkodzenia. Czujnik TFDBP1 powinien ujawnić pęknięcie od końca siatki pomiarowej, lecz zmiana napięcia mierzonego będzie niższa od spodziewanej. Można więc uznać, że czujniki drabinkowe z konstantanową siatką pomiarową są co do zasady jednokierunkowe.

Jeden z istotnych aspektów użytkowych tych czujników został ujawniony w trakcie wyboru lokalizacji do monitorowania pęknięć w ramach badania FSFT. **Nie wszędzie była możliwość ich instalacji z uwagi na wymiary czujników, zwłaszcza w obszarze gęsto zainstalowanym.** Przykładem lokalizacji, w której nie udało się zainstalować fabrycznych czujników drabinkowych był dźwigar skrzydła (rys. 3.20a) oraz obszar dolnej, zwłaszcza centralnej części skrzydła (rys. 3.20b). **Siatki pomiarowe o fabrycznym kształcie, nie pozwalają na detekcję pęknięcia propagującego od nitu na wczesnym etapie rozwoju.** Dodatkowo, konieczność przekroczenia wartości progowej odkształcenia do przerywania ścieżki pomiarowej na poziomie $3 \div 5\%$ może być przyczyną wskazań fałszywie negatywnych. **Analiza danych z badań wykazała, że przerywanie ścieżki konstantanowej następuje zazwyczaj w jednym cyklu obciążeń.**



Rys. 3.20 Elementy konstrukcyjne dla których nie udało się zastosować czujnik drabinkowych a) dźwigar skrzydła, b) obszar poszycia z dużą ilością nitów

Wyżej wymienione kwestie użytkowe, związane z zastosowaniem fabrycznych czujników drabinkowych przeznaczonych do monitorowania pęknięcia, skłoniły Autora to opracowania koncepcji nowych czujników drabinkowych, które pozwoliłyby na zniwelowanie niektórych ograniczeń, ujawnionych w trakcie badań weryfikacyjnych. Szczegóły tej koncepcji stanowią zawartość kolejnych rozdziałów rozprawy.

4. KONCEPCJA I REALIZACJA BADAŃ WSTĘPNYCH NOWYCH CZUJNIKÓW DRABINKOWYCH

Opracowanie nowych czujników drabinkowych jest zasadniczym elementem rozprawy i ma na celu zwiększenie podatności użytkowej i eksploatacyjnej opracowanej metody detekcji i monitorowania propagacji pęknięć, w porównaniu do czujników komercyjnych. Na podstawie zrealizowanych badań weryfikacyjnych przy wykorzystaniu fabrycznych czujników drabinkowych, wyszczególniono co najmniej dwie pożądane modyfikacje, które umożliwią szersze stosowanie niniejszej metody monitorowania konstrukcji. Należą do nich:

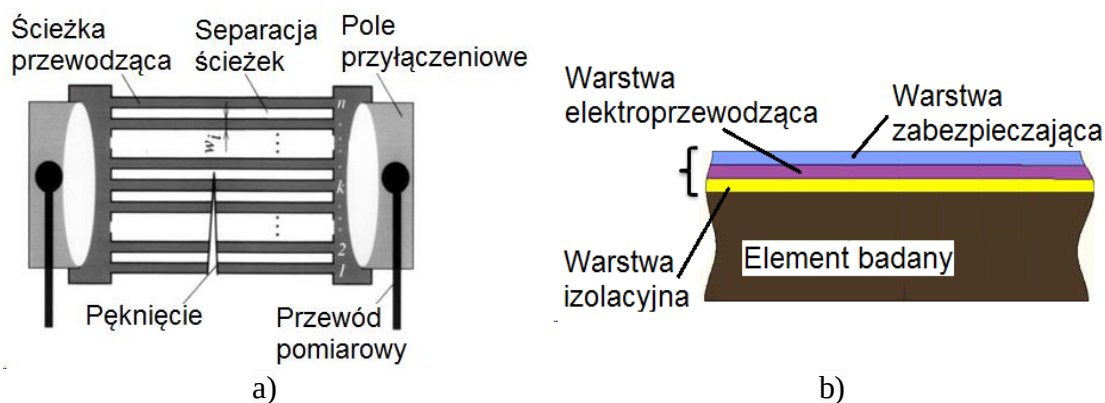
- możliwość adaptacji kształtu siatki pomiarowej do predefiniowanej lokalizacji konstrukcji, przy jednoczesnym ograniczeniu kosztów wytwarzania;
- możliwość detekcji i monitorowania pęknięcia, które propaguje w obrębie siatki pomiarowej w pierwotnie nieznanym kierunku.

Pierwsza właściwość czujnika pozwoli na dostosowanie kształtu siatki pomiarowej do miejsca przeznaczonego do monitorowania propagacji pęknięcia. Możliwość wykonania takiego czujnika pozwoli na umiejscowienie go blisko potencjalnego ogniska pęknięcia, co przełoży się na zdolność detekcji nawet relatywnie niewielkiego uszkodzenia. W przypadku dedykowanego czujnika, zamiast prostych odcinków ścieżki pomiarowej, elementy siatki pomiarowej mogą przyjąć postać krzywoliniową. Dodatkowo, ogólne wymiary czujnika mogą zostać zmniejszone i dopasowane do lokalizacji, pozwalając na ominięcie np. otworów lub nitów. Ilość i separacja ścieżek pomiarowych stanowiących kształt siatki pomiarowej również może zostać dobrana według potrzeb.

Z kolei, druga nowa własność czujnika pozwoli na realizację siatki pomiarowej, która np. obejmowałaby szew nitowy. W takim przypadku, poszczególne ścieżki pomiarowe mogłyby być umieszczone w różnych rzędach nitów, co pozwoliłoby na skuteczną sygnalizację propagacji pęknięcia. W przypadku czujników fabrycznych, pęknięcie propagujące np. od tyłu czujnika, nie może być skutecznie zdiagnozowane, co przedstawiono w rozdziale 3.3 na rys. 3.19. W nowym czujniku, skutek pęknięcia którejkolwiek ścieżki pomiarowej powinien być zjawiskiem mierzalnym.

W ramach niniejszego rozdziału, przedstawiona zostanie koncepcja nowego czujnika drabinkowego, spełniającego powyższe założenia. Dokonano wstępnej selekcji materiałów, które będą wykorzystane do budowy autorskiego czujnika drabinkowego. Następnie zrealizowano badania eksperymentalne, o zakresie zbliżonym jak dla czujników komercyjnych w ramach rozdziału 3, które wstępnie potwierdzają możliwość wykorzystania czujników zgodnych z przyjętą koncepcją do detekcji pęknięć konstrukcji. Przeprowadzona krytyczna analiza uzyskanych wyników, umożliwiła określenie zasięgu dalszych prac, stanowiących rozdział 5 niniejszej rozprawy, a zmierzających do poprawy działania zaproponowanej metody detekcji. Autorska koncepcja wykonania czujnika drabinkowego przy użyciu farb elektroprzewodzących i plastycznych izolatorów

W celu osiągnięcia założonych nowych własności czujników drabinkowych, umożliwiających adaptację kształtu siatki pomiarowej do monitorowania pęknięć w konkretnej lokalizacji konstrukcji, należało zredefiniować sposób wytwarzania czujników drabinkowych oraz zastosować inne materiały do ich produkcji. Zdecydowano, że nowy czujnik drabinkowy będzie wykonany w technologii elektroniki elastycznej przy użyciu addytywnych [58][141], warstwowych metod wytwarzania z wykorzystaniem farb elektroprzewodzących oraz plastycznych materiałów izolacyjnych, co pokazano na rys. 4.1.



**Rys. 4.1 Koncepcja czujnika przeznaczanego do detekcji pęknięć;
a) widok z góry; b) przekrój poprzeczny**

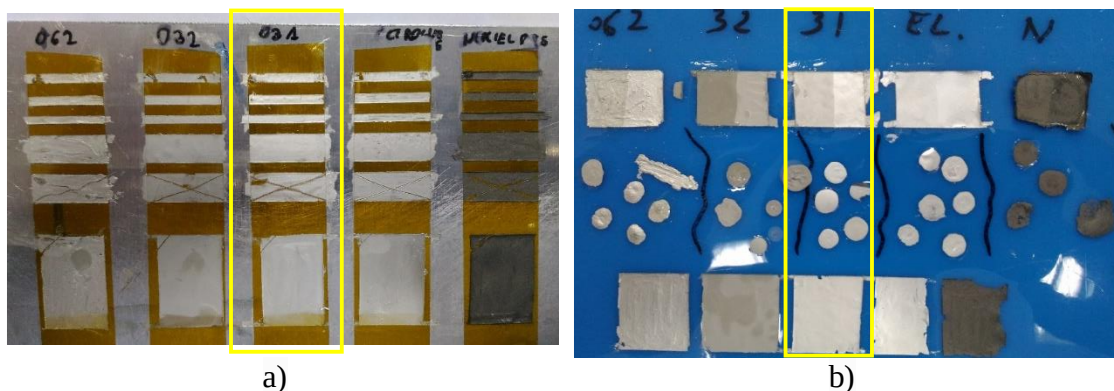
Zastosowanie wymienionych materiałów do wytwarzania np. pasywnych i aktywnych elementów elektronicznych [65], elastycznych układów elektronicznych, połączeń elektrycznych alternatywnych do lutowania, nowych czujników, wyświetlaczy elastycznych, baterii czy elementów paneli fotowoltaicznych jest już znane w praktyce przemysłowej [64]. Jako cząstki elektroprzewodzące, w farbách i pastach można

wykorzystać szeroką gamę materiałów, takie jak cząstki organiczne (polimery) elektroprzewodzące (PEDOT/PSS, polipirol), alotropowe pochodne węgla (grafit, nanorurki, grafen), związki organiczno-metaliczne, prekursory metali (np. tlenek srebra) lub same mikro- i nanocząstki metaliczne (np. srebra, miedzi czy niklu). Związki organiczne charakteryzują się niską przewodnością (10–20 S/cm) i znane są ich ograniczenia długotrwałej stabilności elektrycznej [9][99]. Z kolei zastosowanie związków organiczno-metalicznych oraz prekursorów metali wymaga przeprowadzenia dodatkowej obróbki termicznej w trakcie procesu redukcji. Dodatkowo, relatywnie wysoka zawartość pozostałości organicznych wpływa niekorzystnie na przewodność wytworzonych warstw elektroprzewodzących.

Do wytworzenia siatki pomiarowej nowego czujnika drabinkowego zdecydowano się zastosować farby i pasty zawierające mikro i/lub nanocząsteczki metaliczne, z uwagi na możliwość ich bezpośredniego wykorzystania (bez wcześniejszego przygotowania) oraz wyższą i potwierdzoną stabilność własności elektrycznych, zwłaszcza w aspekcie przyszłej długotrwałej eksploatacji [117].

Przed przystąpieniem do procesu wykonywania czujnika przeprowadzono jakościową selekcję ówczesnie dostępnych farb elektroprzewodzących pod kątem możliwości ich wykorzystania do wytworzenia siatki pomiarowej. Wybrano 5 typów farby, których producent deklarował brak konieczności przeprowadzenia procesu utwardzania w podwyższonej temperaturze, dobrą adhezję do różnych powierzchni oraz możliwość pracy w temperaturze do co najmniej +85°C. Na rys. 4.2 zestawiono wybrane materiały, nałożone na taśmę polimidową (rys. 4.2a) oraz warstwę silikonu (rys. 4.2b), w celu jakościowego porównania m.in. równomierności pokrycia, jakości powierzchni po nałożeniu pędzlem i metodą tamponową, ścieralności i kruchości warstwy. Sprawdzone również skutek oddziaływania izopropanolu oraz lakieru poliuretanowego na powierzchnię farby elektroprzewodzącej.

Po zrealizowanych testach, na podstawie wyników ich analizy do dalszych badań wybrano farbę 16031 firmy Ted Pella, ponieważ charakteryzowała się ona równomiernym pokryciem taśmy polimidowej oraz gładką powierzchnią po utwardzeniu. Nie zaobserwowano negatywnego oddziaływania środków czyszczących, takich jak izopropanol.



Rys. 4.2 Realizacja jakościowej selekcji farby elektroprzewodzącej

Przed przystąpieniem do procesu wytwarzania czujnika, konieczne było również wybranie materiału na izolacyjną warstwę kontaktową czujnika z powierzchnią badanego elementu. Kryterium określonym przez autora pracy ograniczającym wybór, była transparentność materiału po utwardzeniu, aby na wstępnym etapie testów możliwa była obserwacja struktury badanej wraz z propagującym pęknięciem przy użyciu metod wizualnych. Z tego powodu wybrano lakier poliuretanowy M-Coat A firmy Vishay Precision Group, stosowany jako wstępna warstwa zabezpieczająca m.in. dla czujników tensometrycznych. Utworzone warstwy z tego materiału charakteryzowały się gładkością powierzchni, a komponent jednoskładnikowy o dobrej płynności zapewniał nieskomplikowaną aplikację za pomocą np. pędzla. Lakier utwardzał się w temperaturze pokojowej, co na tym etapie badań upraszczało technologię wykonania czujnika w warunkach poza laboratoryjnych.

4.1. Wstępne badania eksperymentalne nowych czujników w celu potwierdzenia założeń koncepcji

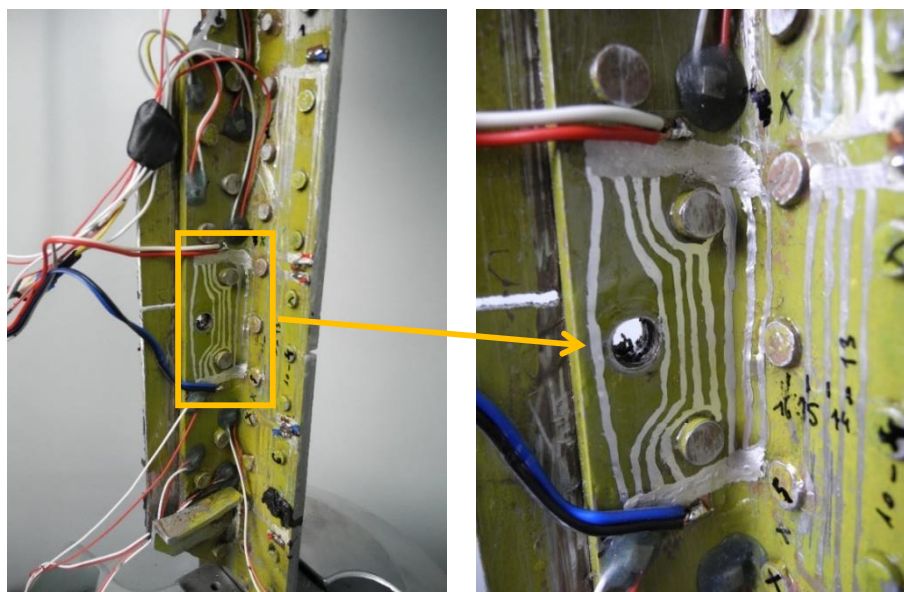
Realizacja badań wstępnych miała na celu weryfikację poprawności działania nowego czujnika drabinkowego wykonanego przy użyciu wybranych materiałów izolacyjnych i elektroprzewodzących. W ramach niniejszych badań, czujniki były wykonywane głównie warstwowo, bezpośrednio na badanym elemencie, po uprzednim przygotowaniu powierzchni w sposób przedstawiony w części 3.2 niniejszej rozprawy. Kolejne warstwy czujnika były nakładane ręcznie raklą, pędzlem lub szpatułką z wykorzystaniem maskowania w postaci przyciętych odcinków taśmy elektroizolacyjnej. Na tym etapie badań, materiały nie były poddawane żadnej dodatkowej obróbce (np. cieplnej) w trakcie utwardzania i nie charakteryzowano

w sposób ilościowy geometrii siatki pomiarowej, grubości warstwy izolacyjnej lub ścieżek elektroprowadzących.

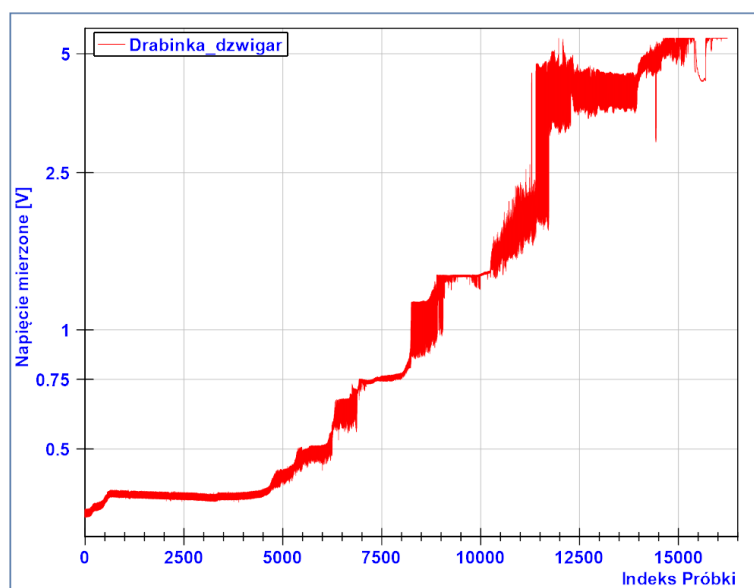
4.1.1. Laboratoryjne badania zmęczeniowe elementu konstrukcyjnego z nowym czujnikiem drabinkowym

W celu ujawnienia zalety czujnika, którą jest możliwość adaptacji kształtu jego siatki pomiarowej do badanej powierzchni, wstępnie pominięto etap badań na próbkach o nieskomplikowanym kształcie. Pierwszym elementem poddanym badaniom zmęczeniowym był fragment dźwigara ze skrzydła samolotu PZL-130 TCI Orlik, poddany osiowemu rozciąganiu (rys. 4.3).

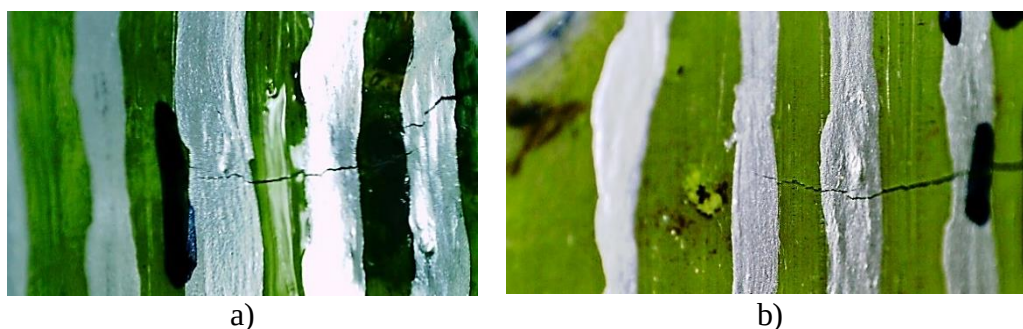
Czujnik umieszczony na strukturze złożony był z ośmiu ścieżek pomiarowych o kształcie dostosowanym do obecnych na elemencie nitów i otworów, a dodatkowo znajdował się na obu wzajemnie prostopadłych ściankach dźwigara. Jako układ pomiarowy, zastosowano dotychczas wykorzystywany dla czujników komercyjnych, w którym sygnałem mierzonym było napięcie wyjściowe z układu dzielnika. Na rys. 4.4 przedstawiono przebieg zmian napięcia mierzonego dla czujnika drabinkowego w trakcie propagacji pęknięcia w badanym elemencie. Z kolei, na rys. 4.5 pokazano zdjęcia czujnika umieszczonego na strukturze wykonane przy użyciu mikroskopu potwierdzające, że wierzchołek pęknięcia powoduje przerywanie ścieżki pomiarowej równo ze strukturą próbki.



Rys. 4.3 Fragment dźwigara wykorzystany do badań nowych czujników drabinkowych



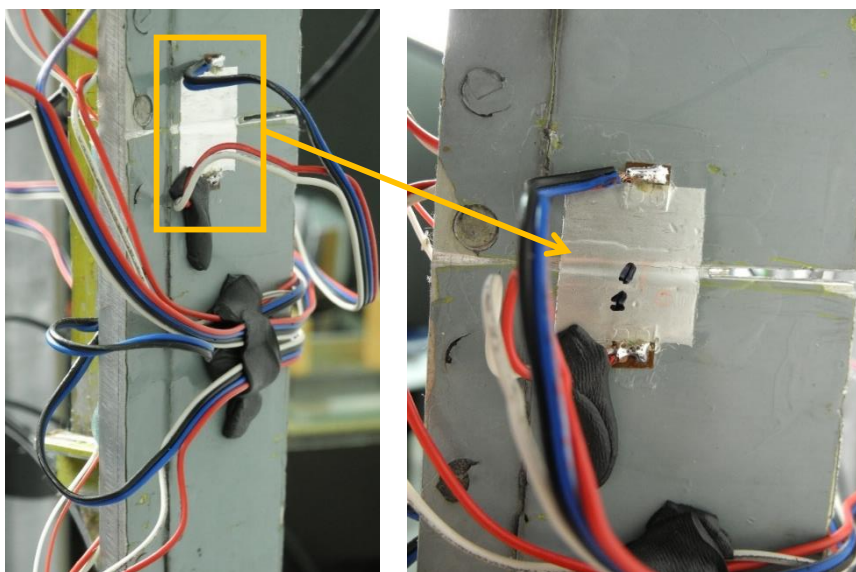
Rys. 4.4 Zmiana napięcia mierzonego dla czujnika drabinkowego w trakcie badań dźwigara.



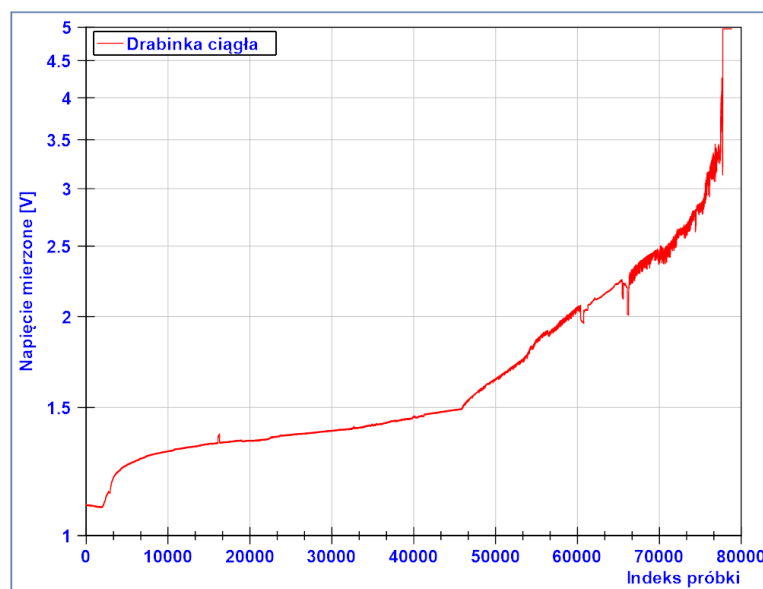
Rys. 4.5 Widok propagującego pęknięcia a) w 3 ścieżce czujnika b) w 6 ścieżce czujnika.

W ramach tego samego etapu badań, na płaskiej części fragmentu poszycia sprawdzono działanie czujnika z siatką pomiarową w postaci ciągłej, analogicznej do tej przedstawionej w opracowaniach [4][3][4][7], przedstawionych w rozdziale 1.2.2 niniejszej rozprawy. Widok czujnika na próbce ilustruje rys. 4.6, a zmianę napięcia mierzonego przedstawiono na rys. 4.7.

W tym przypadku nie było możliwości obserwacji pęknięcia propagującego w elemencie, z uwagi na nietransparentną warstwę siatki pomiarowej. Przy zastosowaniu metod wizualnych, obserwowano postęp przerywania czujnika, lecz wskazanie bieżącej lokalizacji wierzchołka pęknięcia propagującego w strukturze nie było możliwe.



Rys. 4.6 Fragment poszycia z czujnikiem o ciągłej siatce pomiarowej



Rys. 4.7 Zmiana napięcia mierzonego dla czujnika ciągłego w trakcie zrealizowanych badań

Wyniki tych wstępnych badań przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych, pozwoliły na potwierdzenie poprawności założeń koncepcji działania nowych czujników drabinkowych z siatką pomiarową wykonaną z użyciem farby elektroprzewodzącej. Na wykresie zmian napięcia (rys. 4.4) zarejestrowanego dla czujnika drabinkowego można zaobserwować kolejne stabilne poziomy mierzonej wartości, których ilość odpowiada liczbie przerwanych ścieżek czujnika. Charakter tych zmian odbiega nieco od tego, zaobserwowanych dla czujników fabrycznych, gdzie stan przejściowy ma postać gwałtownej, prawie skokowej zmiany przebiegu w ramach kilku cykli zmęzeniowych.

Zauważane jest tutaj stopniowe zwiększenie napięcia o charakterze wykładniczym, do osiągnięcia wartości stabilnej. Spowodowane jest to większą szerokością ścieżek nowego czujnika, oraz prawdopodobnie niższą wartością granicznego odkształcenia do przerywania ścieżki, która dla czujnika komercyjnego wynosiła 5%. Dzięki temu, ścieżka przerywa się stopniowo wraz z elementem, co potwierdzono wizualnie na rys. 4.5.

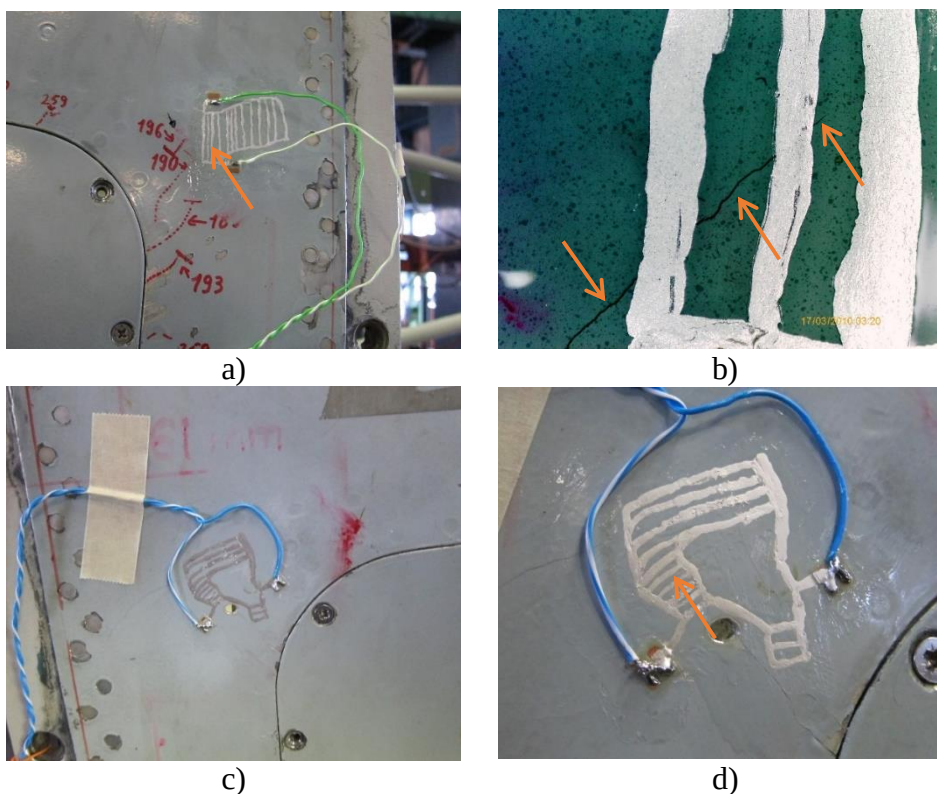
Wstępne badania czujnika o ciągłej siatce pomiarowej również potwierdzają jego poprawną reakcję na przyrost długości pęknięcia w elemencie. Praktycznie od początku testu można zaobserwować monotoniczny i stabilny wzrost napięcia mierzonego w trakcie postępu badania. Nieznaczne wahania w końcowej części testu mogą mieć związek z niejednorodnością warstwy farby lub osobliwym zachowaniem tego złożonego elementu, gdy pęknięcie osiągnęło już znaczną długość. Podobną zwiększoną zmienność można zaobserwować w trakcie przerywania dwóch ostatnich ścieżek czujnika drabinkowego, zainstalowanego na dźwigarze.

Zdaniem autora rozprawy, porównując na wstępnym etapie te dwa typy siatki pomiarowej, czujnik drabinkowy wykazuje lepsze własności eksploatacyjne. Brak możliwości obserwacji pęknięcia w elemencie konstrukcyjnym z powodu ciągłego charakteru siatki pomiarowej powoduje, że opracowanie funkcji przejścia z mierzonego napięcia na długość pęknięcia wymagałoby opracowania dedykowanych równań empirycznych na podstawie dużego zbioru danych. Dodatkowo, charakterystyka wyjściowa czujnika ciągłego będzie w znacznym stopniu uzależniona od zmiany kształtu siatki pomiarowej, a w przypadku eksploatacji w warunkach rzeczywistych, również od wpływu czynników zewnętrznych, takich jak odkształcenie struktury, temperatura czy wibracje. W przypadku siatki pomiarowej w kształcie drabinki, nawet w obecności znacznych wahań wartości mierzonej, spowodowanej wpływem czynników zewnętrznych, skokowy charakter zmiany napięcia na skutek przyrostu długości pęknięcia powinien umożliwić określenie wymiarów uszkodzenia.

4.1.2. Badania wstępne nowego czujnika w trakcie pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu szkolnego PZL-130 TCII Orlik

W ramach badań wstępnych, zweryfikowano również działanie nowych czujników drabinkowych w badaniach długotrwałych, w trakcie pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu szkolnego PZL-130 TCII Orlik. Podobnie jak dla wcześniej przedstawionych

testów dla czujników fabrycznych, nowe czujniki drabinkowe instalowano głównie w lokalizacjach o już rozpoczętej propagacji pęknięcia. Umieszczono tutaj dwa czujniki w przedniej części kadłuba, po obu jego stronach, wykonane ręcznie warstwowo, bezpośrednio na strukturze. Na rys. 4.8a oraz rys. 4.8d zaznaczono strzałkami lokalizację wierzchołków pęknięć po instalacji. Czujnik na prawym boku miał kształt drabinki klasycznej (zbliżonej do czujnika komercyjnego), natomiast ten na lewym boku dostosowano do obecności wcześniej wykonanego otworu, stanowiącego element spowalniający propagację.

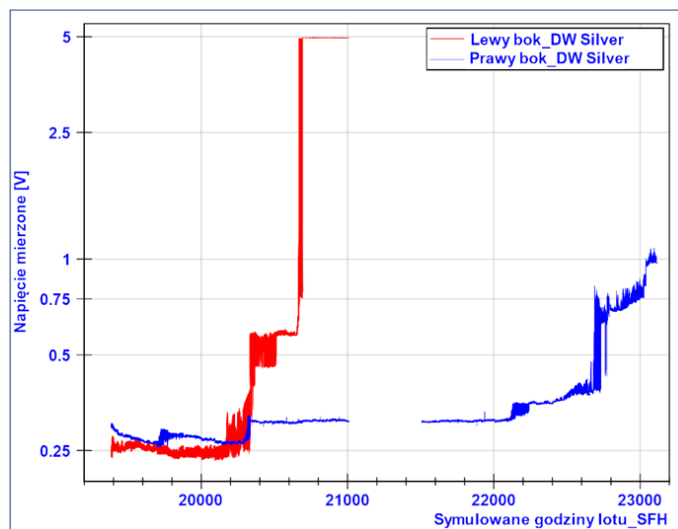


Rys. 4.8 Czujniki drabinkowe w przedniej części kadłuba samolotu w trakcie FSFT
a) czujnik na prawym boku kadłuba, b) widok wierzchołka pęknięcia po instalacji,
c) czujnik na lewym boku kadłuba, d) zbliżenie na siatkę pomiarową.

Na rys. 4.9 przedstawiono wyniki pomiarów zarejestrowanych w trakcie dynamicznej części testu. Ponownie, jak w przypadku pierwszych zrealizowanych badań, zmiany napięcia dla niniejszych czujników również w sposób wyraźny wskazywały przyrost długości pęknięcia. Dużo lepsze jakościowo wskazania uzyskano dla czujnika umieszczonego na prawym boku kadłuba (o bardziej klasycznym kształcie), z uwagi na porównywalne długości wszystkich ścieżek elektroprzewodzących w ramach siatki pomiarowej. Spowolnienie propagacji pomiędzy 20330 – 22100 SFH spowodowane było wykonaniem otworu w okolicach wierzchołka pęknięcia po jednym z przeglądów

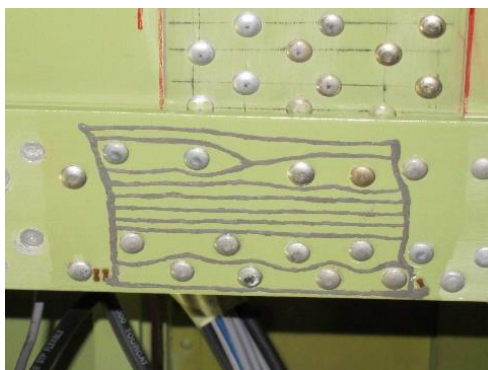
konstrukcji. Jednakże pomimo przerwy w akwizycji danych, poziom napięcia pozostał stabilny w całym tym okresie. Następnie z uwagi na wznowienie propagacji pęknięcia, można zaobserwować (rys. 4.9, przebieg niebieski) kolejne cztery skoki poziomu napięcia będące wynikiem kontynuacji przerywania ścieżek czujnika.

Z kolei, w odniesieniu do danych z czujnika umieszczonego na lewym boku kadłuba, to wykazywał on wzrost napięcia mierzonego w sposób nieznaczny do momentu przecięcia pierwszej długiej ścieżki w około 20200 SFH. Przerwanie kolejnych trzech dłuższych ścieżek jest już wyraźnie widoczne na przebiegu, do momentu całkowitego rozdzielenia czujnika, które miało miejsce około 20600 SFH.

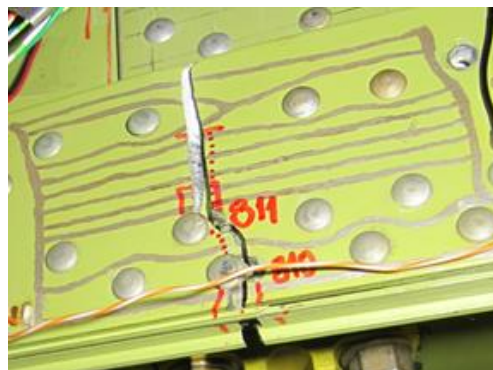


Rys. 4.9 Przebieg zmian napięcia mierzonego z nowych czujników drabinkowych w trakcie realizacji FSFT

Kolejną lokalizacją, w której ulokowano nowy czujnik drabinkowy była naprawa w postaci metalowej nakładki, zamontowanej w dolnej części kadłuba (rys. 4.10).



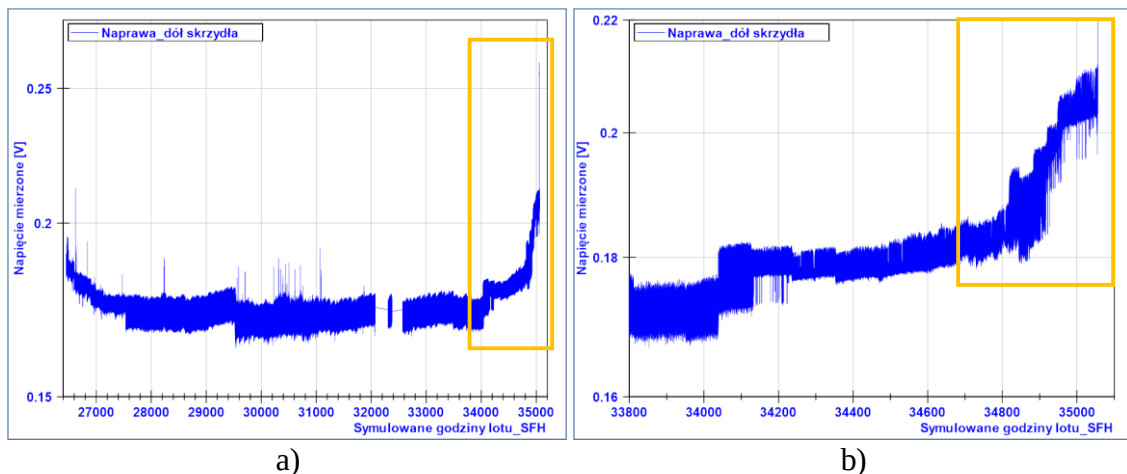
a)



b)

Rys. 4.10 Widok czujnika drabinkowego zainstalowanego na naprawie dolnej części skrzydła a) po instalacji b) po całkowitym pęknięciu elementu.

Czujnik zainstalowano na tym elemencie od razu po wykonaniu naprawy, zanim rozpoczęła się propagacja. Na podstawie informacji od wykonawcy naprawy oraz wcześniejszych uszkodzeń w tym obszarze, spodziewano się szybko postępującego pęknięcia po jego zainicjowaniu. Na rys. 4.11 zilustrowano dane, które pod względem czasowym obejmują ponad 7 miesięcy akwizycji, w trakcie których obiekt badań zrealizował prawie 9000 symulowanych godzin lotu (SFH). Zgodnie z danymi zawartymi w raportach z przeglądów okresowych, propagacja pęknięcia w tym obszarze rozpoczęła się dopiero po 34000 SFH od jednego z nitów w dolnym rzędzie w kierunku krawędzi nakładki. Następnie po kolejnych 700 SFH, rozpoczęła się propagacja w drugim kierunku nakładki, która najpierw zmęczeniowo, a następnie statycznie doprowadziła do całkowitego zniszczenia tego elementu. W tym okresie można zaobserwować zarejestrowanych pięć poziomów napięcia, odpowiadających rozwojowi pęknięcia w relatywnie krótkim czasie.



**Rys. 4.11 Przebieg zmian napięcia dla czujnika zainstalowanego na napawie dolnej części skrzydła a) dane z całego okresu akwizycji
b) fragment danych ujawniający szybką propagację pęknięcia**

Do istotnych zaobserwowanych niekorzystnych zjawisk pojawiających się w trakcie powyższych badań można zaliczyć około 10%, stopniowy spadek wartości napięcia mierzonego w początkowym okresie akwizycji danych, oraz krótkookresowe nieznaczne fluktuacje w ramach pomiaru dobowego. Nie zaobserwowano tych osobliwości w trakcie badań w warunkach laboratoryjnych. Próba wyjaśnienia ich występowania zostanie przeprowadzona w dalszej części rozprawy (m. in. podrozdział 5.1.2 oraz 5.1.3.), w ramach realizacji badań materiałów zastosowanych do wytworzenia czujnika.

4.1.3. Badania nowego czujnika drabinkowego przeprowadzone w trakcie próby zmęczeniowej belki ogonowej śmigłowca transportowego Mi-8

Na podstawie dotychczas zrealizowanych badań weryfikacyjnych dostrzeżono, że wykonanie siatki pomiarowej przy użyciu pędzla lub szpatałki skutkowało nieregularnością wykonania pojedynczej ścieżki elektroprowadzącej. W konsekwencji, uzyskiwano ścieżki o istotnych różnicach geometrycznych, nawet wzdłuż pojedynczego elementu siatki. W ramach niniejszego testu wprowadzono dwie zmiany w wykonaniu czujników drabinkowych:

- użyto zmodyfikowanego rapidografu wypełnionego farbą elektroprowadzącą, który posłużył do wytworzenia ścieżek siatki pomiarowej;
- sprawdzono możliwość wykonania czujnika prefabrykowanego poza strukturą, który następnie był przyklejony do konstrukcji.

Pierwsza zmiana pozwoliła na uzyskanie ścieżek elektroprowadzących o wyższym stopniu regularności. Dzięki temu, rozrzut wartości rezystancji kolejnych elementów siatki pomiarowej został ograniczony. Druga zmiana mogła pozwolić na przygotowanie czujnika poza strukturą, gdzie na wstępnie utwardzonej warstwie izolacyjnej nakładano by siatkę pomiarową, i dopiero wtedy całość byłaby przyklejana w obszarze monitorowania pęknięcia. Na rys. 4.12 zilustrowano stanowisko badawcze, w którym zastosowano czujniki przygotowane zgodnie ze zmienioną technologią wykonania.



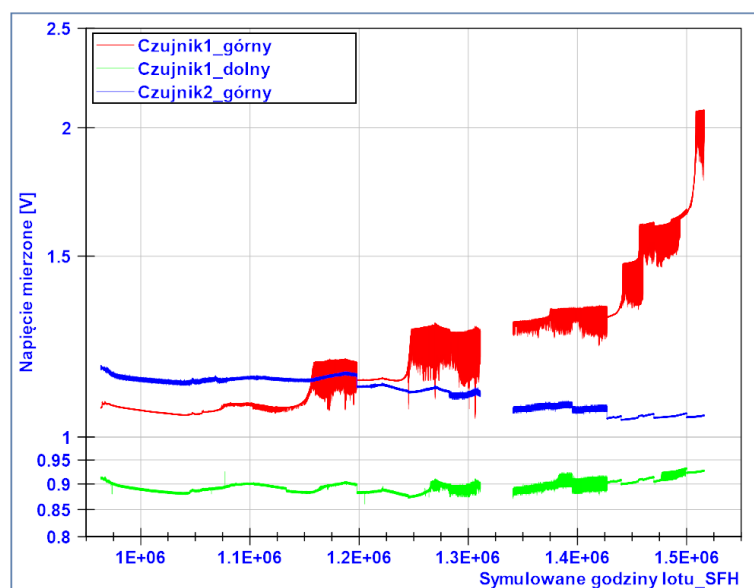
Rys. 4.12 Badanie zmęczeniowe belki ogonowej, a) stanowisko do realizacji testu, b) widok nowych czujników drabinkowych przygotowanych do pracy.

W trakcie realizacji próby zmęczeniowej belki ogonowej śmigłowca wykorzystano dwa czujniki aktywne oraz dodatkowo jeden referencyjny, oznaczone jako:

- *czujnik1_górny* - wykonany bezpośrednio na obszarze badania;
- *czujnik1_dolny* – prefabrykowany poza obiektem a następnie przyklejony;
- *czujnik2_górny* - referencyjny przeznaczony do sprawdzenia stabilności wskazań bez propagacji.

Przebieg zmian napięcia zmierzonego dla czujników drabinkowych podczas dynamicznej części badania przedstawiono na rys. 4.13. Dla zbioru *czujnik1_górny* można zaobserwować znaczne polepszenie jakości danych w stosunku do tych, zarchiwizowanych dla czujników przed wprowadzeniem modyfikacji wykonania siatki pomiarowej. Wartości te charakteryzują się niższym poziomem fluktuacji chwilowej, fragmenty stanu przejściowego są wyraźnie rozróżnialne i świadczą o stopniowym przerywaniu ścieżki pomiarowej. Kolejne stabilne poziomy dla niniejszego czujnika charakteryzują się dobrą separacją wartości napięcia.

Zaobserwowano jednak niewielką zmienność zbioru *czujnik1_dolny*, dla którego zmiany napięcia nie przekraczają 50 mV w trakcie całego badania. Na podstawie zarejestrowanych danych, nie sposób jednoznacznie stwierdzić, w którym momencie i czy w ogóle nastąpiło przerwanie ścieżki. Jedynie na podstawie wystąpienia zwiększonej zmienności chwilowego napięcia mierzonego, od około połowy testu można założyć, że zwierana jest już przerywana ścieżka pod wpływem oddziaływania zmiennych obciążeń mechanicznych na strukturę belki ogonowej.



Rys. 4.13 Przebiegi zmian napięcia mierzonego dla czujników drabinkowych w trakcie badania belki ogonowej śmigłowca

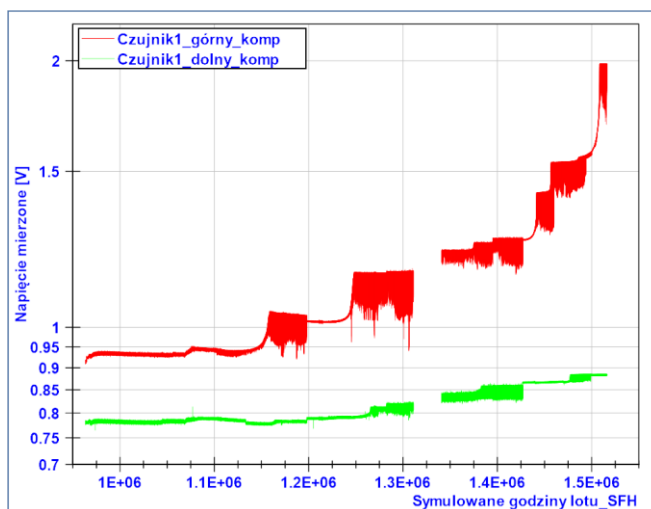
Dodatkowo, w przypadku wszystkich czujników można zaobserwować stopniowe obniżanie wartości napięcia mierzonego wraz ze wzrostem czasu trwania testu (zwłaszcza *czujnik2_górny*). Podobne zjawisko ujawniło się w początkowych okresach akwizycji danych z nowych czujników drabinkowych wykorzystanych w trakcie badań FSFT samolotu Orlik. Na podstawie badań materiałowych przedstawionych w dalszej części pracy wyjaśniono to zjawisko. Ma ono związek z długookresową stabilizacją wartości rezystancji dla pojedynczej ścieżki wykonanej z farby elektroprowadzącej, utwardzanej w temperaturze pokojowej.

Ponadto, dla wszystkich zastosowanych czujników występuje również okresowa zmienność napięcia mierzonego, w granicach 20 mV. Jest ona skorelowana z cyklem dobowym, a jej przyczyna ma najprawdopodobniej związek ze zmianą temperatury otoczenia. Wpływ zmiany temperatury na rezystancję ścieżki z farby elektroprowadzącej był elementem badań materiałowych, których szczegóły zostaną przedstawione w kolejnym rozdziale.

Z uwagi na fakt, że zmienność ta jest prawie identyczna dla wszystkich czujników, wykorzystano dane z czujnika referencyjnego *czujnik2_górny* jako źródło wartości kompensującej dla pozostałych czujników, biorących aktywny udział w detekcji pęknięcia. Do wyznaczenia wartości skompensowanej w postaci napięcia względnego, skorzystano z zależności:

$$Czujnik1_górny_komp = Czujnik1_górny / Czujnik2_górny \quad (4.1)$$

W ten sam sposób przeliczono dane dla zbioru *czujnik1_dolny*, a wyniki zilustrowano na rys 4.14.



Rys. 4.14 Przebiegi zmian napięcia mierzonego dla czujników drabinkowych skompensowane o wartości czujnika referencyjnego

W wyniku tej operacji, udało się wyeliminować okresową zmienność, a także częściowo skutek stopniowego obniżenia wartości napięcia w czasie. Dla danych zarejestrowanych pod nazwą *czujnik1_górny* jedynie dwa pierwsze poziomy wykazują stopniowe obniżenie wartości, a w dalszej części testu poziomy napięcia są stabilne. Natomiast dla zbioru *czujnik1_dolny*, dopiero po uwzględnieniu danych z czujnika referencyjnego *czujnik2_górny*, możliwe jest rozróżnienie kolejnych stabilnych poziomów napięcia, świadczących o propagacji pęknięcia. Niemniej jednak, w dalszym ciągu dla *czujnik1_dolny*, zmiana napięcia na skutek przzerwania ścieżki jest zbyt mała, aby możliwe było śledzenie propagacji w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Dodatkowo, zmierzona długość dolnej części pęknięcia struktury przy użyciu metody wizualnej na koniec testu wykazała, że na otrzymanej charakterystyce powinno być widocznych około 14÷15 poziomów, a wyróżnić można nie więcej niż 8. Oznacza to, że czujnik nie przerywał siatki pomiarowej równo ze strukturą.

4.2. Wnioski i spostrzeżenia ze wstępnych badań weryfikacyjnych nowych czujników drabinkowych

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań wstępnych, dotyczących możliwości zastosowania nowych czujników drabinkowych. Główną zmianą w stosunku do czujników fabrycznych, przedstawionych w rozdziale 3, jest zastosowanie farby elektroprzewodzącej przeznaczonej do wykonania siatki pomiarowej na plastycznym izolatorze poliuretanowym. Pozwoliło to na wykonanie czujnika drabinkowego, którego kształt siatki pomiarowej był dostosowany do konkretnej lokalizacji na elemencie poddanym badaniom zmęczeniowym z propagacją pęknięcia.

Wyniki niniejszych badań wstępnych udowodniły możliwość opracowania czujnika, który pozwoliłby na skuteczną detekcję pęknięcia i śledzenie jego propagacji w elemencie konstrukcyjnym. Kształt siatki pomiarowej czujnika, wykonanej z farby elektroprzewodzącej, uwzględniał obecność naturalnie występujących elementów konstrukcyjnych, takich jak nity i otwory, co nie jest możliwe w przypadku czujników komercyjnie dostępnych na rynku.

Badania zrealizowano na rzeczywistych elementach konstrukcyjnych, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i w badaniach długotrwałych w trakcie pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu szkolnego PZL-130 TCII Orlik oraz belki ogonowej śmigłowca transportowego Mi-8. Czujniki wykazały się względnie dobrą stabilnością

działania pod wpływem długotrwałego oddziaływania zmiennych i rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych, nawet w relatywnie długim okresie. Siatka pomiarowa czujników przeważnie przerywała się równocześnie ze strukturą badanego elementu, a wartości mierzonego napięcia, zwłaszcza po zmianie technologii wykonania warstwy elektroprzewodzącej z wykorzystaniem rapidografu, nie wykazywały skokowych fluktuacji. Dla jednego z czujników wykorzystanych w trakcie badania FSFT samolotu Orlik, historia akwizycji danych obejmowała ponad 7 miesięcy, w trakcie których obiekt badań zrealizował prawie 9000 symulowanych godzin lotu. Nawet biorąc pod uwagę współczynnik rozrzutu danych dla tego typu próby na poziomie 3, w dalszym ciągu jest to znaczący procent godzinowego resursu technicznego dla typowego samolotu wykorzystywanego w Siłach Zbrojnych RP.

Na podstawie zarejestrowanych danych, zaobserwowano pewne osobliwe zjawiska, nie występujące w przypadku zastosowania komercyjnie dostępnych czujników drabinkowych. Dla nowych czujników, przerywanie ścieżki następuje stopniowo wraz z rozwojem uszkodzenia. Objawia się to zauważalnym obszarem stanu przejściowego pomiędzy dwoma stabilnymi poziomami, w którym napięcie mierzone przybiera charakter wykładniczy. Szerokość obszaru stanu przejściowego jest zależna od szerokości ścieżki pomiarowej oraz bieżącej prędkości propagacji pęknięcia. Dla czujników komercyjnych, zazwyczaj przerwanie ścieżki wywoływało nagłą i skokową zmianę poziomu napięcia w ciągu pojedynczych cykli obciążeń. Do przerwania ścieżki konieczne było przekroczenie progu lokalnego jej odkształcenia, które producent określił na minimum 5%.

Zaobserwowano również kilka dodatkowych zjawisk, które mogą mieć potencjalnie negatywny wpływ na skuteczność działania nowych czujników. Wymagają one przeprowadzenia dalszych badań, zwłaszcza materiałowych, i należą do nich:

- a) stopniowe obniżenie wartości napięcia w początkowym okresie użytkowania czujnika (przykład danych dla zbioru *czujnik2_górny* na Rys. 4.13);
- b) prawdopodobny wpływ temperatury otoczenia na stabilność napięcia mierzonego z układu pomiarowego (widoczne m. in. na Rys. 4.13);
- c) relatywnie niewielka separacja poziomów stabilnych napięcia po przzerwaniu kolejnych ścieżek siatki pomiarowej (przykład zbioru danych *czujnik1_dolny* na Rys. 4.13);
- d) brak widocznej zmiany napięcia/przerwania ścieżki pomimo postępującej propagacji pęknięcia;

- e) zwarcie elektryczne siatki pomiarowej do powierzchni próbki (nie rozważane w treści niniejszego opracowania, lecz występujące w trakcie wykonywania czujników).

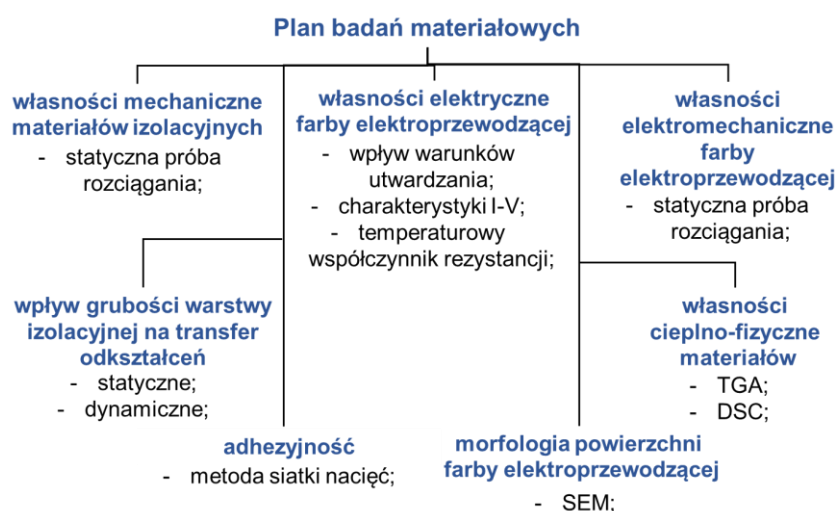
W kolejnym rozdziale rozprawy przedstawione zostaną wyniki badań materiałowych, w tym m. in. własności mechanicznych, elektrycznych, cieplnych oraz adhezyjnych zastosowanych materiałów. Ich realizacja pozwoliła w znacznej części na wyjaśnienie przyczyn powyższych zjawisk, wprowadzenie odpowiednich zmian w technologii obróbki zastosowanych materiałów oraz wytwarzania nowych czujników, a także pozwoliła na zdefiniowanie ich ograniczeń konstrukcyjnych i eksploatacyjnych.

5. BADANIA MATERIAŁOWE I EKSPLOATACYJNE NOWYCH CZUJNIKÓW DRABINKOWYCH

W ramach niniejszego rozdziału, przedstawiono prace ukierunkowane na poprawę działania autorskich czujników drabinkowych, w porównaniu do zrealizowanych wstępnych badań koncepcji nowego czujnika drabinkowego. Na podstawie wniosków z poprzedniego rozdziału, opracowano i zrealizowano multidyscyplinarny program badań, którego wyniki pozwoliły na poznanie własności materiałów zastosowanych do budowy nowego czujnika, zrozumienie zjawisk zaobserwowanych w trakcie badań wstępnych oraz określenie między innymi ograniczeń konstrukcyjnych i eksploatacyjnych proponowanego rozwiązania. Następnie, przeprowadzono ponowną weryfikację poprawności i stabilności działania autorskich czujników drabinkowych, na podstawie wybranych scenariuszy badań eksperymentalnych.

5.1. Badania materiałów wykorzystanych do wytworzenia nowych czujników drabinkowych

Główny cel realizacji badań materiałowych, których wyniki przedstawiono w ramach niniejszej części rozprawy, to wyjaśnienie zjawisk zaobserwowanych w trakcie eksperymentalnej weryfikacji koncepcji autorskich czujników drabinkowych. Wybrane spostrzeżenia mogły mieć potencjalnie negatywny wpływ na skuteczność działania nowych czujników, stabilność ich wskazań lub możliwość interpretacji wyników, pozyskanych w trakcie użytkowania. Plan badań materiałowych ilustruje rys. 5.1.



Rys. 5.1 Zrealizowany plan badań materiałowych

Zakres przedstawionych badań materiałowych został dostosowany do potrzeb osiągnięcia założonego celu pracy, którym jest opracowanie efektywnej metody detekcji i monitorowania pęknięć przy użyciu czujników drabinkowych. Jednak przeprowadzone studium literatury, związanej z przedmiotem badań nad aspektami zastosowania farb, tuszy i klejów elektroprowadzących oraz plastycznych materiałów izolacyjnych do wytworzenia np. układów elektroniki elastycznej, drukowanej i noszonej (z ang. wearable electronics) [138], wskazuje szereg interesujących analiz.

W aspekcie zastosowanych materiałów, rozpoznano zależność pomiędzy geometrią i porowatością warstwy elektroprowadzącej, a niezawodnością działania pasywnych elementów elektronicznych pod wpływem cyklicznych obciążeń mechanicznych [87][53][5]. Zaobserwowano również korelację pomiędzy własnościami elektromechanicznymi, a wielkością cząstek elektroprowadzących [62][100][101], [123]. Wskazano również, że istotnym czynnikiem wpływającym na elastyczność drukowanych ścieżek z cząsteczkami srebra jest obecność wierzchniej warstwy zabezpieczającej.

Mechanizmy uszkodzenia elementów elektroniki elastycznej w stosunku do tej opartej na materiałach klasycznych również są obiektem badań i okazują się być dużo bardziej złożone. Zaobserwowano zależność występowania typów uszkodzeń np. od parametrów geometrycznych warstwy elektroprowadzącej nawet dla tego samego materiału [17][44][49][69]. Dodatkowo udowodniono, że porowatość warstwy izolacyjnej, a także jej grubość ma znaczący wpływ na wytrzymałość wykonanych komponentów, jak i na samą nominalną wartość rezystancji ścieżek elektroprowadzących [43][54][146]. Należy więc zwrócić uwagę na fakt, że technologia wytwarzania komponentu [117] oraz proces technologiczny obróbki materiału po aplikacji będzie wpływał na końcowe własności wyrobu [84][112].

5.1.1. Badania własności mechanicznych materiałów izolacyjnych

Podczas badań wstępnych nowych czujników zaobserwowano, iż w przypadku niektórych eksperymentów występuje brak widocznej zmiany napięcia / przerwania ścieżki pomimo postępującej propagacji pęknięcia pod czujnikiem. Przyczyną takiego zjawiska mogą być własności materiałowe zastosowanych do budowy czujnika materiałów izolacyjnych, dlatego ich poznanie pozwoli na określenie wpływu tej warstwy czujnika na zdolność działania prezentowanej metody detekcji pęknięć. W tym celu

opracowano i zrealizowano program badań bazujący na statycznej próbie rozciągania próbek wykonanych z materiałów izolacyjnych. W porównaniu do weryfikacji metody przedstawionej w ramach rozdziału 4, niniejsze badania przeprowadzono przy wykorzystaniu dwóch odmiennych typów izolatorów:

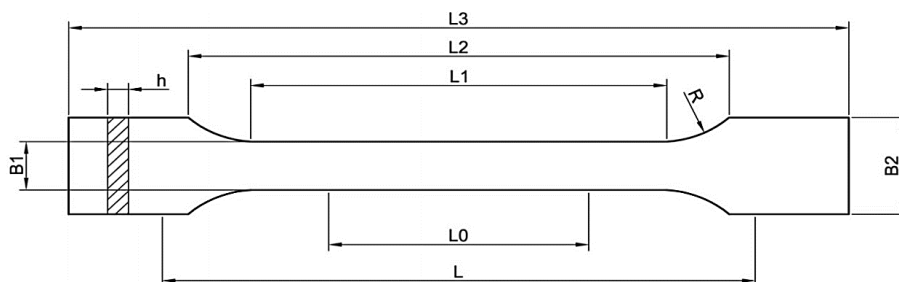
- jedno-składnikowego lakieru poliuretanowego M-Coat A firmy Vishay (wykorzystywanego w badaniach wstępnych).;
- komponentu dwu-składnikowego żywicy epoksydowej o nazwie handlowej 832C firmy MG Chemicals [93].

Producent lakieru poliuretanowego (dalej nazwanego „PU”) nie udostępnił karty charakterystyki technicznej. Z kolei, dla żywicy epoksydowej (dalej nazwaną „EP”), w karcie charakterystyki producent podał wartości wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia materiału występującego przy zerwaniu. Do realizacji badań wykonano próbki o kształcie wioselkowym (rys. 5.2), odlewane w elastycznej formie silikonowej, które następnie poddano manualnej obróbce mechanicznej, w celu zachowania równoległości powierzchni czołowych i gratowania krawędzi [46].

Badania własności materiałowych przygotowanych próbek przy wykorzystaniu metody statycznego rozciągania (w oparciu o normę PN-EN ISO 527-1:2012) zrealizowano w następujących warunkach:

- próbki mocowane w szczękach samozaciskowych,
- odległość pomiędzy uchwytami: 100 mm,
- prędkość badania: 1 mm/min,
- realizacja obciążenia: narastanie siły F do zniszczenia próbki,
- kryterium zakończenia badań: zerwanie próbki.

Przeprowadzenie próby statycznego rozciągania pozwoliło na wyznaczenie takich cech wytrzymałościowych jak, maksymalnego naprężenia rozciągającego, modułu sprężystości oraz zależności naprężenie/wydłużenie [14] [63][131].



Rys. 5.2 Schemat próbki wioselkowej wykorzystanej do badań własności mechanicznych materiałów izolacyjnych

Tabela 1 Oznaczenia i wymiary próbki wioselkowej wykorzystanej w badaniach

$L3$ – długość całkowita	≥ 150 mm
$L2$ – odległość między szerokimi równolegle usytuowanymi częściami	104-113 mm
$L1$ – długość części ograniczonej liniami równoległymi	80 ± 2 mm
$B2$ - szerokość na końcach	$20 \pm 0,2$ mm
$B1$ – szerokość wąskiej części	$10 \pm 0,2$ mm
h – zalecana grubość	$4 \pm 0,2$ mm

Badania własności materiałowych warstwy izolacyjnej czujnika przeprowadzono z wykorzystaniem maszyny wytrzymałościowej MTS 370.01, wyposażonej w siłomierz o zakresie ± 2.5 kN dla próbek EP oraz ± 1.0 kN dla próbek PU. Parametrami pozyskanymi ze sterownika maszyny wytrzymałościowej w trakcie realizacji testu była wartość siły działającej na próbkę oraz skok (przemieszczenie) tłoka siłownika. Dla wszystkich próbek mierzono odkształcenia za pomocą wideoekstensometru MessPhysik ME46 przy długości bazy pomiarowej wynoszącej 75 mm. Zastosowanie metody optycznej pomiaru odkształceń pozwoliło na ograniczenie ryzyka uszkodzenia próbek w trakcie montażu przyrządów mechanicznych. Na wybranej liczbie próbek zainstalowano dodatkowo czujniki tensometryczne w kształcie rozety typu T (dwie ortogonalne, niezależne siatki pomiarowe). Przy ich użyciu realizowano pomiar 2-kanalowy w układzie ćwierć-mostka odkształceń próbki (rys. 5.3) w kierunku głównej osi podłużnej i poprzecznej w celu określenia współczynnika Poissona materiału.



Rys. 5.3 Widok próbki epoksydowej przygotowanej do badań, a) przed zniszczeniem ze znacznikami wideoekstensometru; b) przed zniszczeniem z dodatkowych czujnikiem tensometrycznym; c) i d) te same próbki po zerwaniu

Na podstawie zrealizowanych pomiarów, wyznaczono następujące parametry i wielkości (tabela 2):

- F_m – siłę maksymalną rozciągającą próbkę, [N];
- F_f – siłę rozciągającą w chwili zerwania próbki, [N];

- δ_m – przemieszczenie tłoka siłownika maszyny przy sile maksymalnej [mm];
- $\delta_{m,VE}$ – przemieszczenie tłoka siłownika mierzone wideoekstensometrem przy sile maksymalnej [mm];
- δ_f – przemieszczenie tłoka siłownika maszyny w chwili zerwania próbki [mm];
- $\delta_{f,VE}$ – przemieszczenie tłoka siłownika mierzone wideoekstensometrem w chwili zerwania próbki [mm];
- $\varepsilon_{m,VE}$ – odkształcenie przy naprężeniu maksymalnym próbki, wyznaczone na podstawie rejestracji wideoekstensometrem, [%];
- $\varepsilon_{f,VE}$ – odkształcenie w chwili zerwania próbki, wyznaczone na podstawie rejestracji wideoekstensometrem [%].

Z kolei, wartości naprężenia wyznaczono na podstawie zależności:

$$\sigma = F/A \quad (5.1)$$

gdzie:

σ – naprężenie próbki, [MPa], F – siła rozciągająca próbkę, [N], A – pole przekroju poprzecznego próbki [mm²].

Dalej, pole przekroju poprzecznego wyznaczono na podstawie uśrednionych trzech pomiarów suwmiarką:

$$A = h_{sr} \cdot b_{sr} \quad (5.2)$$

gdzie h_{sr} – grubość odcinka pomiarowego, wartość średnia [mm]:

$$h_{sr} = (h_1 + h_2 + h_3)/3 \quad (5.3)$$

oraz b_{sr} – szerokość odcinka pomiarowego, wartość średnia [mm]:

$$b_{sr} = (b_1 + b_2 + b_3)/3 \quad (5.4)$$

Następnie, na podstawie zależności 5.1 określono:

- σ_m – naprężenie maksymalne próbki [MPa];
- σ_f – naprężenie w chwili zerwania próbki [MPa] podstawiając odpowiednią wartość siły.

Moduł sprężystości przy rozciąganiu $E_{t,VE}$ został wyznaczony z nachylenia linii regresji metodą najmniejszych kwadratów przyjętej dla odkształcenia $\varepsilon_{m,VE} = 0.05\%$ oraz 0.25% .

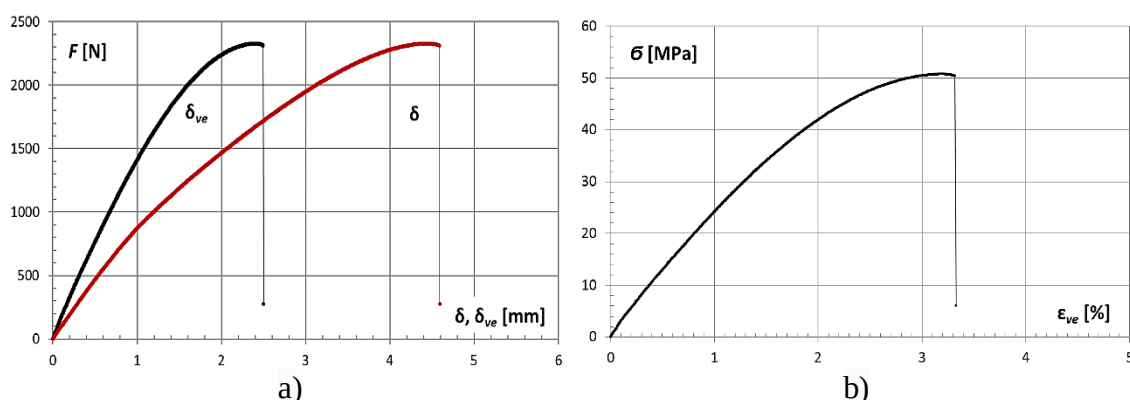
Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli 2. Reprezentatywne przebiegi zmian siły i naprężenia w zależności od odkształcenia próbki przedstawiono na rys. 5.4. Otrzymane rozbieżności w wartościach naprężenia maksymalnego oraz odkształceń niszczących

próbek wioselkowych mogą wynikać z wad wewnętrznych i powierzchniowych struktury próbek [23], powstałych w procesie ich przygotowania. Zaobserwowano jednak wyraźną zależność, że próbki z czujnikami tensometrycznymi odznaczają się brakiem strefy nieliniowych odkształceń plastycznych, i zrywają się przy niższej wartości naprężenia i wydłużenia, co przedstawiono na rys. 5.5 oraz rys. 5.6. Jednocześnie, wartość modułu Younga oraz współczynnika Poissona osiągają wartości o znikomych rozbieżnościach niezależnie od obecności czujników tensometrycznych. Na podstawie przeprowadzonych badań wyznaczono wartość współczynnika Poissona, która mieściła się w przedziale $0.38 \div 0.39$.

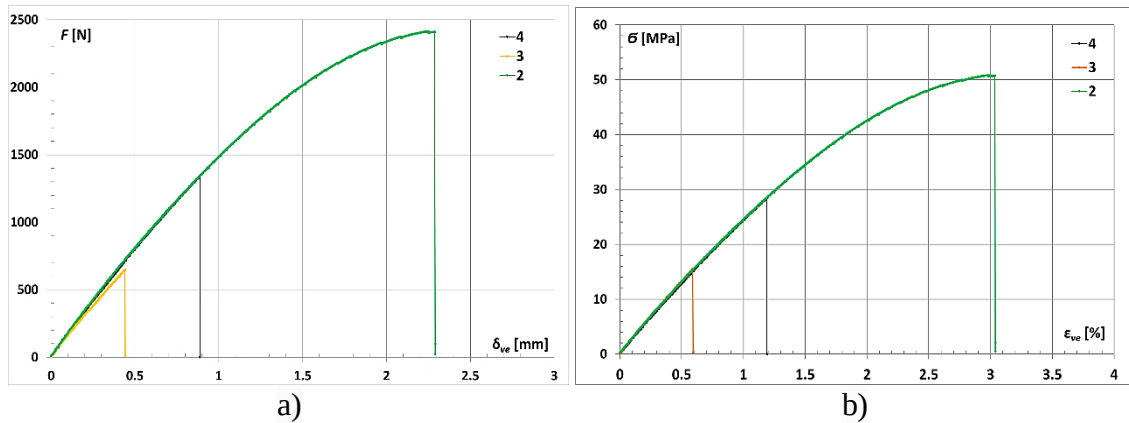
Tabela 2 Wyniki badań wytrzymałościowych dla próbek EP

Numer próbki	F_m [N]	σ_m [MPa]	σ_f [MPa]	δ_m [mm]	$\delta_{m,VE}$ [mm]	$\epsilon_{m,VE}$ [%]	δ_f [mm]	$\delta_{f,VE}$ [mm]	$\epsilon_{f,VE}$ [%]	$E_{t,VE}$ [MPa]
1	2330	50.7	50.3	4.45	2.40	3.2	4.59	2.50	3.3	2640
2	2410	50.8	50.7	4.59	2.25	3.0	4.66	2.29	3.0	2680
3*	646	15.4	15.4	0.746	0.438	0.59	0.746	0.438	0.59	2670
4*	1340	28.4	28.4	1.59	0.887	1.2	1.59	0.887	1.2	2660
5	2240	55.8	55.7	4.43	2.59	3.5	4.58	2.71	3.6	2650
6	2200	54.5	54.3	4.19	2.57	3.4	4.32	2.67	3.6	2610
7	2130	54.2	54.1	4.29	2.43	3.3	4.38	2.50	3.7	2690
8*	2050	48.5	48.5	3.48	1.94	2.6	3.48	1.94	2.6	2580
9*	1380	34.5	34.5	1.78	1.12	1.5	1.78	1.12	1.5	2630

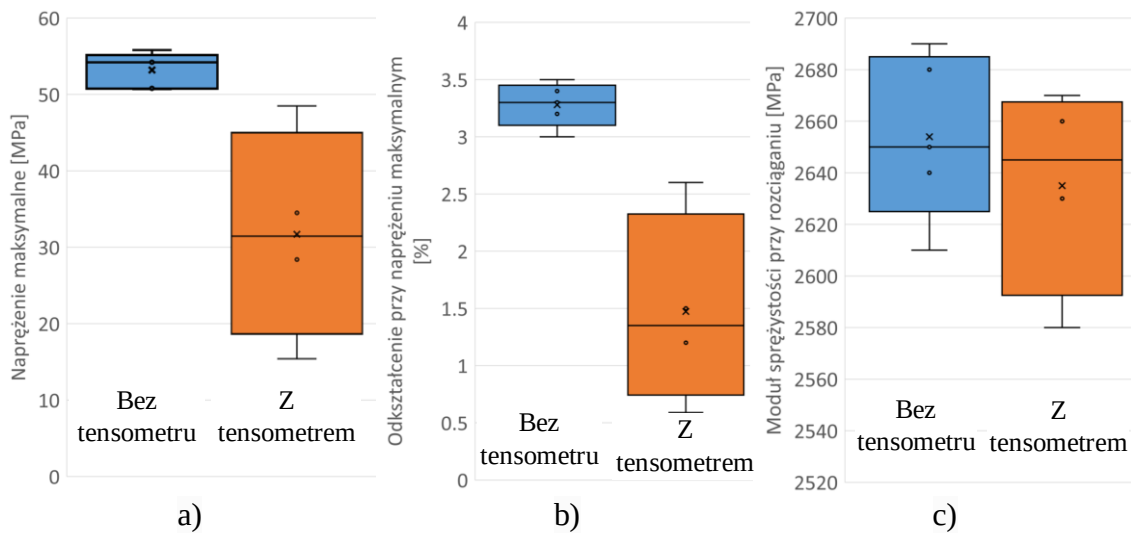
* na zielono oznaczono próbki z zainstalowanym czujnikiem tensometrycznym



Rys. 5.4 Reprezentatywne dane ze statycznej próby rozciągania próbek EP,
a) charakterystyka siły względem przemieszczenia
b) charakterystyka naprężenia w funkcji odkształcenia



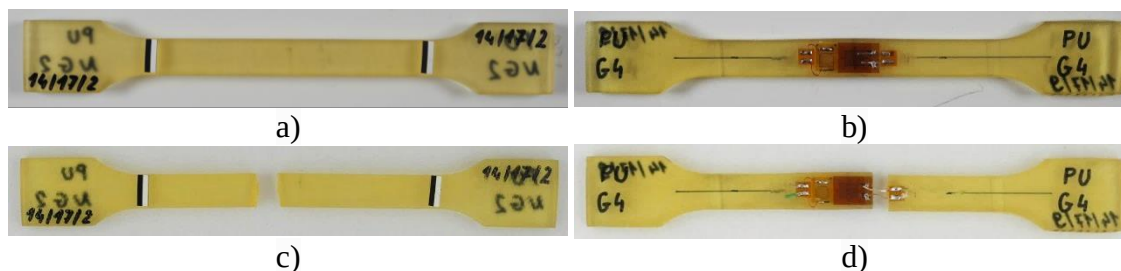
Rys. 5.5 Porównanie danych ze statycznej próby rozciągania dla próbek z i bez czujników tensometrycznych, a) charakterystyka siły względem przemieszczenia b) charakterystyka naprężenia względem odkształcenia



Rys. 5.6 Porównanie parametrów wytrzymałościowych próbek EP z i bez czujnika tensometrycznego, a) naprężenia maksymalne, b) odkształcenia przy naprężeniu maksymalnym, c) moduł sprężystości wzdłużnej

Wartość naprężenia niszczącego uzyskanego w trakcie badań dla próbek bez czujnika tensometrycznego jest zbieżna z wartością dostępną w nocie katalogowej materiału i przyjmuje ona wartość 56 MPa. Producent określił ją na podstawie badań wykonanych zgodnie z normą ASTM D 638.

Metoda przygotowania próbek, realizacji badań oraz wyznaczania parametrów i wielkości dla próbek wykonanych z PU były identyczne jak dla materiału EP (rys. 5.7). Z uwagi na niższą sztywność PU, po wstępnym utwardzeniu materiału część próbek dotwardzono w temperaturze podwyższonej w komorze grzewczej przez 1.5 h w 70°C, w celu porównania zmian ich własności. Dodatkowo, z uwagi na skład chemiczny PU i znaczny skurcz objętościowy, próbki odlewano etapowo w celu uzyskania przekroju poprzecznego o pożądanej wartości. Wyniki przedstawiono w tabeli 3 oraz na rys. 5.8.



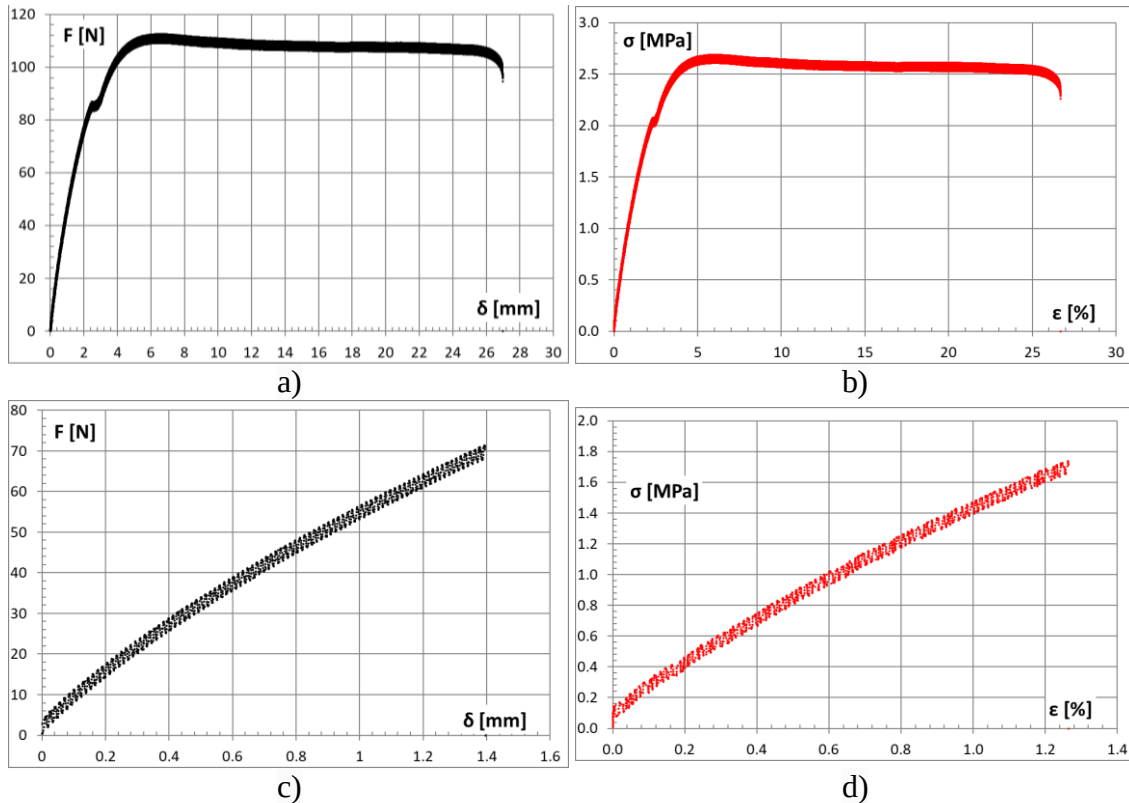
Rys. 5.7 Widok próbki poliuretanowej przygotowanej do badań,
a) przed zniszczeniem ze znacznikami wideoekstensometru;
b) przed zniszczeniem z dodatkowym czujnikiem tensometrycznym;
c) i d) te same próbki po zerwaniu

Tabela 3 Wyniki badań wytrzymałościowych dla próbek PU

	Numer próbki	F_m [N]	σ_m [MPa]	δ_m [mm]	$\epsilon_{m,VE}$ [%]	$\epsilon_{f,VE}$ [%]	$E_{t,VE}$ [MPa]
Utwardzane w temp. pok.	1	116.7	2.7	12.73	12.6	16.6	146
	2	112.5	2.7	6.65	6.1	26.7	137
	3*	71.4	1.7	1.39	1.3	1.3	229
	4*	85.1	2.1	1.82	1.6	1.6	237
Utwardzane 1,5h@70°C	5	135.3	3.3	6.51	5.9	18.9	165
	6	136.5	3.5	6.05	5.4	18.9	177
	7*	73.1	1.7	1.23	1.1	1.1	176
	8*	85.6	2.0	1.63	1.5	1.5	170

* na zielono oznaczono próbki z zainstalowanym czujnikiem tensometrycznym

Podobnie jak w przypadku badań wykonanych przy wykorzystaniu próbek wytworzonych z materiału EP, charakterystyki otrzymane dla próbek z czujnikami tensometrycznymi odznaczają się brakiem strefy nieliniowych odkształceń plastycznych, i zrywają się przy niższej wartości naprężenia i wydłużenia. Jest to zjawisko niezależne od temperatury utwardzania próbki. Obecność czujnika tensometrycznego nie ma znacznego wpływu na wartość modułu Younga oraz współczynnika Poissona dla próbek utwardzanych w temperaturze podwyższonej. W przypadku próbek utwardzanych w temperaturze pokojowej, zauważono znaczne różnice w wartości modułu Younga dla próbek bez i z zainstalowanym czujnikiem tensometrycznym. Wartość naprężenia maksymalnego dla próbek bez tensometrów odznacza się wyższą wartością dla materiału utwardzanego w temperaturze podwyższonej, przy jednoczesnym zmniejszeniu wydłużenia przy zerwaniu.



**Rys. 5.8 Porównanie danych ze statycznej próby rozciągania dla próbek bez (a, b) oraz z czujnikami tensometrycznymi (c, d),
a) i c) charakterystyka siły względem przemieszczenia
b) i d) charakterystyka naprężenia względem odkształcenia.**

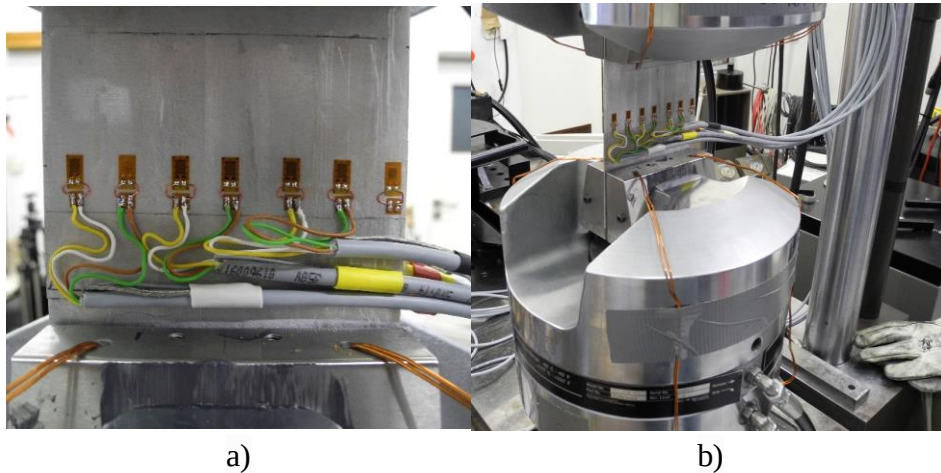
Materiał PU charakteryzuje się niższą wytrzymałością na rozciąganie, modułem Younga, ale znacznie wyższą wartością wydłużenia przy zerwaniu niż żywica EP. Niższa wytrzymałość może mieć wpływ na trwałość czujnika drabinkowego, choć nie zaobserwowano takiego zjawiska w przypadku badań wstępnych. Lecz już znacznie wyższa wartość wydłużenia przy zerwaniu, może być potencjalną przyczyną wskazań fałszywie negatywnych czujnika. W badaniach wstępnych wystąpił przypadek, gdy rzeczywista długość uszkodzenia struktury była znacznie wyższa, niż wskazywał czujnik drabinkowy na podkładzie izolacyjnym w PU. Dodatkowo wyższą wartość modułu Younga dla żywicy EP może sugerować, że właśnie ten materiał jest lepszym do zastosowania jako warstwa izolacyjna nowych czujników drabinkowych.

5.1.2. Badania wpływu grubości warstwy izolacyjnej na odkształcenia powierzchni zewnętrznej

Niniejsze badanie stanowi rozszerzenie badań mechanicznych materiałów izolacyjnych. Na podstawie obserwacji z badań wstępnych nowych czujników drabinkowych postawiono założenie, że brak wykrycia pęknięcia przez siatkę pomiarową

może być powiązany z grubością warstwy izolacyjnej, na którą nakładana jest farba elektroprzewodząca. Intuicyjnie można stwierdzić, że grubość izolacji powinna być możliwie jak najmniejsza, by bezstratnie transferować odkształcenia ze struktury na siatkę pomiarową. Jednak takie aspekty jak: ograniczenia technologii wytwarzania cienkich folii z materiałów polimerowych, rezystancja izolacji tych warstw, odporność polimeru na związki chemiczne zawarte w farbie elektroprzewodzącej, czy wytrzymałość czujnika m. in. w trakcie instalacji determinują minimalną dopuszczalną grubość tej powłoki. Z uwagi na nieliniowe własności mechaniczne zastosowanych materiałów, wykazane w poprzednim podrozdziale, oszacowanie rozkładu odkształceń względem grubości warstwy izolacyjnej jest zadaniem nietrywialnym. Badacze zajmujący się zagadnieniem np. połączeń adhezyjnych dostrzegają trudności również w modelowaniu realizowanym przy wykorzystaniu metody elementów skończonych MES warstw polimerowych, ponieważ uwzględnienie jej grubości pociągałoby konieczność stworzenia siatki o dużej liczbie węzłów i elementów, w celu uzyskania dobrze uwarunkowanych rozwiązań [24] [45].

Aby sprawdzić wpływ grubości warstwy izolacyjnej na poziom odkształceń w jej warstwie zewnętrznej, przeprowadzono statyczne i dynamiczne badania eksperymentalne. Przygotowano próbkę w postaci panelu aluminiowego o szerokości $b = 100$ mm i przekroju $A = 100$ mm² z nałożonymi warstwami materiałów EP oraz PU o różnych grubościach w postaci izolowanych odcinków o długości ok. 70 mm i szerokości 15 mm (rys. 5.9). Po utwardzeniu odcinków materiału, na każdy naklejono czujnik tensometryczny przeznaczony do realizacji pomiaru odkształceń w kierunku działania sił głównych w układzie ćwierć-mostka z dodatkowym czujnikiem kompensacyjnym. Dla porównania, co najmniej jeden z czujników tensometrycznych był umieszczony bezpośrednio na powierzchni próbki, bez dodatkowej warstwy izolacyjnej. Próbkę zamontowano na maszynie wytrzymałościowej i poddano działaniu sił rozciągających zgodnie z przygotowanym harmonogramem badań. Przed ich realizacją każda próbka została poddana cyklicznym, niskoamplitudowym obciążeniom, w celu relaksacji wstępnych naprężeń wewnętrznych warstwy materiału izolacyjnego oraz ustabilizowania wskazań czujników tensometrycznych. Po tej czynności, wykonano kalibrację czujników tensometrycznych i zerowanie kanałów pomiarowych.



Rys. 5.9 Widok próbki do badania wpływu grubości warstwy izolacyjnej
a) próbka przygotowana do badań
b) próbka zainstalowana na maszynie wytrzymałościowej

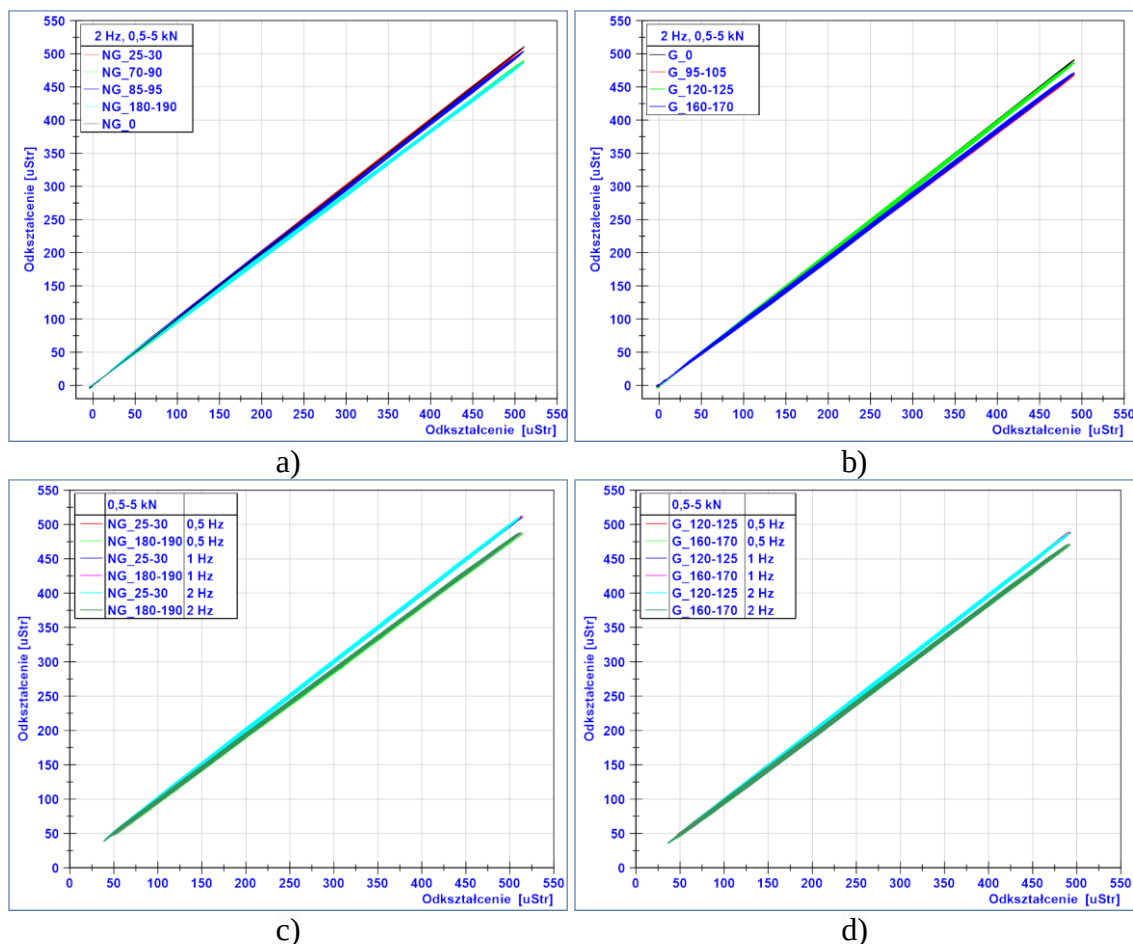
Badania obejmowały swym zakresem obciążenie próbek siłami rozciągającymi w ramach:

- części dynamicznej badań– realizacja po 200 cykli obciążeń m. in. w zakresie $0,5 \div 5$ kN przy częstotliwości wymuszenia 2, 1 oraz 0.5 Hz;
- części statycznej badań– sukcesywne obciążenie z wytrzymaniem wartości siły w zakresie $1 \div 10$ kN z krokiem 0.5 kN w kierunku narastającym i opadającym.

Na rys. 5.10 przedstawiono wyniki pomiarów, pochodzących z części dynamicznej testu dla warstw wykonanej z materiału EP. Badania wykonano dla warstw utwardzonych w temperaturze pokojowej (oznaczone jako „NG”) oraz utwardzonych w temperaturze podwyższonej w komorze grzewczej, przez 2 h w 70°C (oznaczone jako „G”). Zakres liczbowy przy oznaczeniu określa grubość warstwy izolacyjnej wyrażonej w $[\mu\text{m}]$.

Pomiary odkształceń z czujników tensometrycznych dla poszczególnych grubości zobrazowano względem wartości zmierzonych bezpośrednio na powierzchni aluminiowej próbki. Dla obciążeń w zakresie $0.5 \div 5$ kN przy częstotliwości wymuszenia 2 Hz, niezależnie od temperatury utwardzania warstwy izolacyjnej, można zaobserwować bardzo wysoki stopień transferu poziomu odkształceń dla grubości warstwy izolacyjnej nawet powyżej $100 \mu\text{m}$. Jedynie dla najgrubszej powłoki powyżej $150 \mu\text{m}$, widoczny jest spadek zmierzonego odkształcenia w porównaniu do powierzchni struktury, lecz różnice nie przekraczają 5%. Co istotne w aspekcie eksploatacyjnym, warstwy EP pracują bardzo stabilnie w trakcie obciążeń dynamicznych, i w ich przypadku nie zaobserwowano istotnych zmian wartości odkształceń w trakcie kolejnych cykli obciążeń. Dodatkowo, materiał ten wykazuje znikomą pętlę histerezy w ramach

odpowiedzi na zadane cykliczne wymuszenie oraz praktycznie zerowe przesunięcie wartości spoczynkowej odkształcenia po ustaniu obciążeń. Świadczy to o czysto sprężystym charakterze pracy materiału w zakresie obciążeń realizowanych w trakcie niniejszych badań.

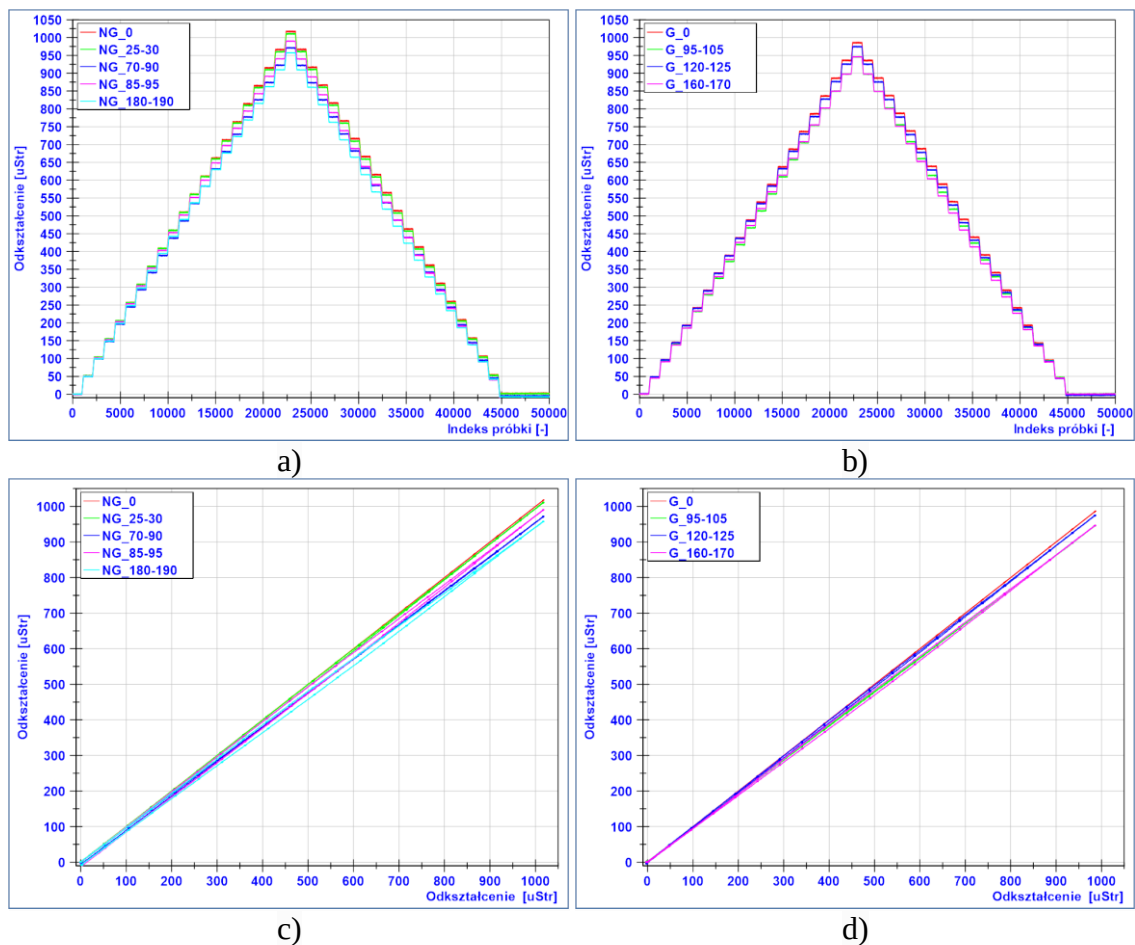


Rys. 5.10 Wyniki pomiarów odkształceń części dynamicznej badania dla warstw z EP
a) utwardzanych w temperaturze pokojowej, częstotliwość obciążenia 2 Hz,
b) utwardzanych w temperaturze podwyższonej, częstotliwość obciążenia 2 Hz,
c) utwardzanych w temperaturze pokojowej, dla różnych częstotliwości obciążenia,
d) utwardzanych w temperaturze podwyższonej, dla różnych częstotliwości obciążenia.

Tworzywa polimerowe, takie jak żywica epoksydowa, to materiały lepkosprężyste [124], co oznacza, że ich charakterystyki $\sigma = \sigma(\epsilon)$ zależą od prędkości odkształcania, a naprężenia i odkształcenia od czasu działania obciążenia. Z tego powodu w trakcie analizy badań porównano odpowiedzi odkształceń z czujników tensometrycznych dla tej samej grubości warstwy EP, lecz dla różnych częstotliwości obciążenia. Przebiegi dla dwóch grubości (w tym największej) zilustrowano na rys. 5.10c-d. W tym przypadku, również nie zaobserwowano znaczących różnic pomiędzy wartościami odkształceń

maksymalnych, które zmierzono dla wszystkich trzech rozpatrywanych prędkości wymuszenia.

Wyniki części statycznej badania warstw izolacyjnych zilustrowano na rys. 5.11. Górne wykresy przedstawiają wartości odkształceń zmierzonych dla poszczególnych grubości warstw izolacyjnych, w ramach realizacji skokowej zmiany obciążeń w zakresie 0÷10 kN z krokiem 0.5 kN i utrzymaniu go przez 30 sekund. Badanie wykonano w pełnym zakresie zarówno dla narastających, jak i zmniejszających się wartości sił, co pozwoliło na wyznaczenie pętli histerezy względem wartości mierzonych przez czujnik zainstalowany bezpośrednio na próbce (rys. 5.11c-d).



Rys. 5.11 Wyniki pomiarów części statycznej badania dla warstw EP

Podsumowując, zastosowana żywica epoksydowa EP ujawniła wysoką stabilność w trakcie niniejszego badania. Pomiar odkształceń wykazał brak istotnych zmian w trakcie utrzymania obciążenia na danym poziomie, mieszczących się w zakresie pojedynczych μStr . Różnice w wartości odkształcenia dla poziomu 5 kN dla poszczególnych grubości pomiędzy częścią statyczną (w kierunku narastania obciążenia) i dynamiczną testu nie przekraczały 1%. Pętla histerezy odkształceń dla poziomów

0.5 kN oraz 5 kN oraz dryf punktu „0” po badaniu wykazuje niewielkie różnice dla grubości warstw do 100 μm , które nie przekraczają 3 μStr , niezależnie od sposobu utwardzania żywicy. Różnice zaobserwowano natomiast dla najgrubszych warstw powyżej 150 μm , które dla poziomu 5 kN wynoszą odpowiednio -16 μStr dla NG_180-190 oraz -12 μStr dla G_160-170. Przy czy dryf punktu „0” niweluje się dla warstwy utwardzanej w temperaturze podwyższonej, by dla warstwy utwardzanej w temperaturze pokojowej wynieść -5 μStr .

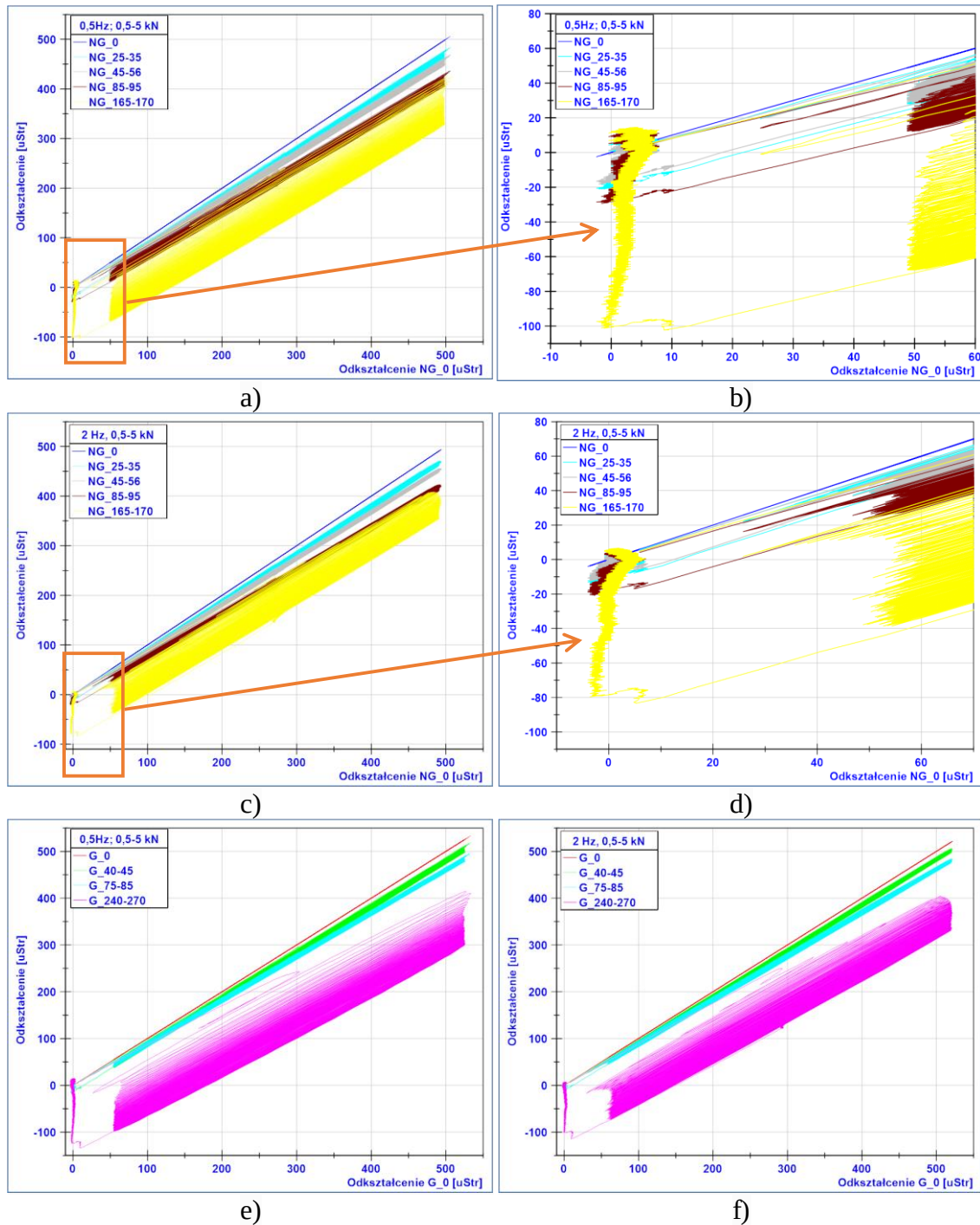
Powyższy program badań powtórzono dla izolatora w postaci lakieru PU. Dane z testów dynamicznych zilustrowano na rys. 5.12 oraz rys. 5.13. Lakier PU już na etapie mechanicznych badań wytrzymałościowych charakteryzował się odmiennymi własnościami: o ponad rząd wielkości niższym naprężeniem niszczącym i prawie 10-krotnie wyższym wydłużeniem przy zerwaniu. W ramach realizacji niniejszego harmonogramu, również wykazuje odmienne zachowanie cienkich warstw w porównaniu do żywicy EP.

Dla lakieru PU ujawniła się wyraźna zależność pomiędzy grubością warstwy a zdolnością transferu odkształceń z powierzchni próbki. Zaobserwowano również silne własności lepkosprężyste materiału. Dla zakresu obciążeń 0.5÷5 kN, można zauważyć obniżenie wartości maksymalnej odkształceń mierzonych przez czujniki tensometryczne względem powierzchni próbki. Dla warstw utwardzanych w temperaturze pokojowej, zmniejszenie wartości odkształceń maksymalnych wynosi odpowiednio ok. 4.5 %, 7.5 %, 14 % oraz 16.5%.

Dodatkowo, obserwuje się stopniowe obniżenie wartości odkształceń dla poszczególnych warstw wraz ze zwiększaniem liczby cykli obciążeń. Występuje silna różnica w wartości odkształceń pomiędzy pierwszymi a ostatnimi cyklami, która dla największej grubości warstwy osiąga -100 μStr , dla wymuszenia o częstotliwości 0.5 Hz. Dodatkowo, różnica w wartości początkowej i końcowej zależy również od częstotliwości wymuszenia, co jest widoczne przez porównanie rys. 5.12b oraz rys. 5.12d, gdzie dla najgrubszej warstwy przesunięcie pomiędzy początkiem a końcem testu jest mniejsze i wyniosło -80 μStr . Dla grubości warstwy izolacyjnej poniżej 50 μm , różnice te osiągają wartość odpowiednio ok. -20 μStr oraz -15 μStr dla częstotliwości wymuszenia równego 0.5 Hz oraz 2 Hz.

Dodatkowo przeprowadzone badania wykazały, że obniżenie wartości odkształceń w funkcji liczby cykli nie jest skutkiem pełzania o charakterze plastycznym, ponieważ przesunięcie punktu „0” nie ma charakteru trwałego. Po ustaniu obciążenia, wartość

odkształcenia dla poszczególnych warstw stopniowo powraca do wartości początkowej, co świadczy o pracy w zakresie sprężystym.

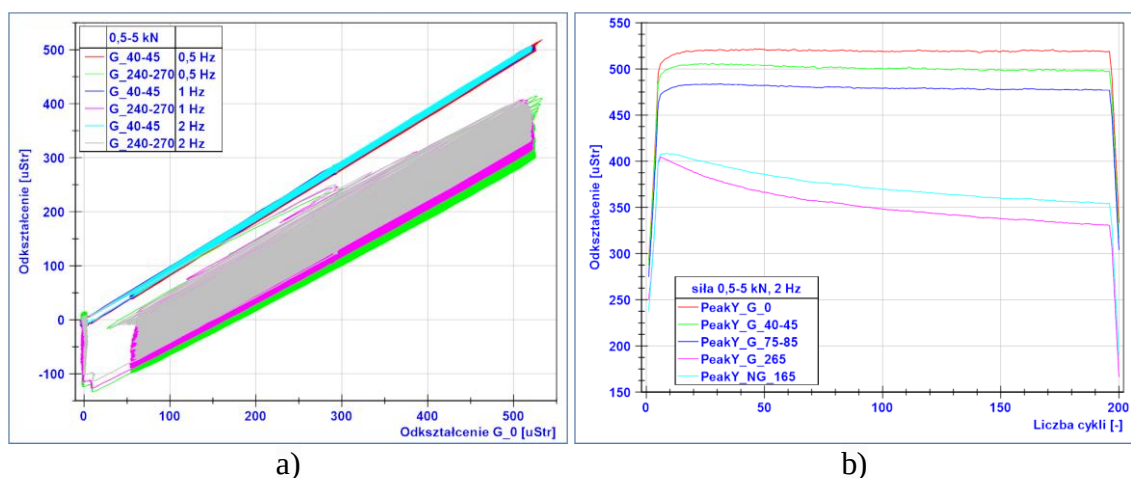


Rys. 5.12 Wyniki pomiarów odkształceń części dynamicznej badania dla warstw z PU

Podobne zjawisko dotyczące obniżenia wartości odkształceń wraz ze wzrostem grubości powłoki jak i zależność ich wartości maksymalnej od liczby cykli obciążeń widoczne jest dla warstw utwardzanych w temperaturze podwyższonej (rys. 5.12e-f). Przy czym utwardzanie w temperaturze podwyższonej doprowadziło do umocnienia

powłoki (potwierdziły to badania wytrzymałościowe) i zwiększenia jej sztywności, ponieważ skala redukcji transferu odkształceń dla rozpatrywanych grubości 25-35 μm oraz 75-85 μm wyniosła odpowiednio ok. 3% oraz ok. 7%. Dryf początkowy punktu „0” po ustaniu obciążenia również był niższy niż dla warstw utwardzanych w temperaturze pokojowej, i dla ww. grubości wyniósł ok. -15 μStr . Na rys. 5.13a) porównano wartości odkształceń dla dwóch skrajnych grubości powłoki wykonanej z materiału PU w trakcie cyklicznego obciążania z różnymi częstotliwościami wymuszenia. Zarówno dla najcieńszej, jak i najgrubszej warstwy widoczny jest szerszy zakres zmian wartości odkształceń w funkcji liczby cykli obciążeń. Dla najgrubszej powłoki, dodatkowe przesunięcie dryfu początkowego poziomu „0” wynosi odpowiednio -15 μStr oraz -26 μStr przy częstotliwości wymuszenia 1 Hz oraz 0.5 Hz w porównaniu do wartości otrzymanych po teście dla 2 Hz. Dodatkowo, można zaobserwować wyraźnie wyższe amplitudy dla pierwszych cykli obciążeń wykonanych z częstotliwością 0.5 Hz dla obu rozpatrywanych grubości. Nie zauważono tego zjawiska dla pozostałych dwóch częstotliwości wymuszenia.

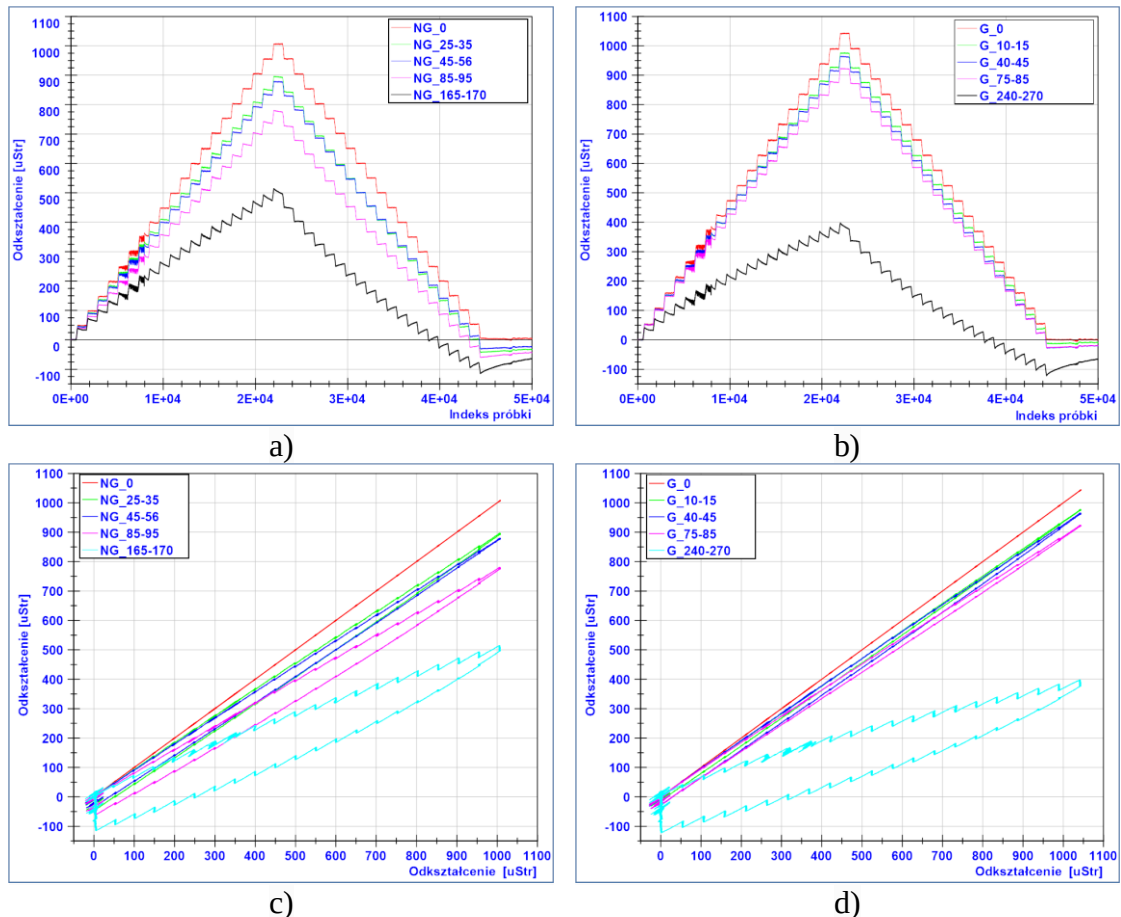
W celu unaocznienia spadku wartości maksymalnej odkształceń w trakcie kolejnych cykli obciążeń, na rys. 5.13b) zobrazowano wyniki zmierzone przez czujniki tensometryczne dla wybranych grubości lakieru PU. Spadek amplitudy ma charakter nieliniowy, i jego największa skala przypada na pierwsze 25% liczby cykli. Dodatkowo warto zauważyć na przykładzie najgrubszych warstw, że w ramach zrealizowanych 200 cykli, obciążeń nie osiągnięto wartości stabilnej. Zatem wydłużenie czasu trwania obciążeń dynamicznych doprowadziłoby do zwiększenia różnic pomiędzy wartościami odkształceń pomiędzy początkiem, a końcem dynamicznej części testu.



Rys. 5.13 Porównanie wartości odkształceń dla wybranych grubości warstwy izolacyjnej
a) przy obciążeniu dla różnych częstotliwości wymuszenia mechanicznego
b) charakterystyka wartości maksymalnych dla kolejnych cykli obciążenia

Wyniki części statycznej badania warstw izolacyjnych zilustrowano na rys. 5.14. Górne wykresy przedstawiają wartości odkształceń zmierzonych dla poszczególnych grubości warstwy PU, w ramach realizacji skokowej zmiany obciążeń w zakresie 1÷10 kN z krokiem 0.5 kN i utrzymanego przez 30 sekund. Badanie wykonano w pełnym zakresie zarówno dla narastających, jak i zmniejszających się wartości sił, co pozwoliło na wyznaczenie pętli histerezy względem wartości mierzonych przez czujnik zainstalowany bezpośrednio na próbce (rys. 5.14c-d).

Badanie statyczne potwierdziło wnioski z wyżej przedstawionych badań dynamicznych, że grubsza warstwa lakieru PU ogranicza transfer odkształceń w powierzchni próbki. Dodatkowo, dla powłok utwardzanych w temperaturze pokojowej oraz najgrubszej utwardzanej w temperaturze podwyższonej, widoczne jest stopniowe, często znaczne obniżenie wartości odkształcenia w czasie utrzymania stabilnego poziomu wymuszenia. Skala tego zjawiska wydaje się być proporcjonalna do grubości powłoki. Poziom odkształceń warstw charakteryzuje się znaczną histerezą, która dla poziomu obciążenia 5 kN wynosi co najmniej $-50 \mu\text{Str}$ dla grubości do $100 \mu\text{m}$, a dla najgrubszej warstwy dochodzi do $-150 \mu\text{Str}$.



Rys. 5.14 Wyniki pomiarów części statycznej badania dla warstw PU

Zdecydowanie stabilniejsze wyniki oraz mniejsze dysproporcje pomiędzy odkształceniem warstwy izolacji i próbki uzyskano dla lakieru PU utwardzanego w temperaturze podwyższonej. Dla obciążenia maksymalnego wynoszącego 10 kN, zmiana wartości odkształcenia w czasie utrzymania siły jest znikoma i nie przekracza 3 μ Str. Jednak z uwagi na wystąpienie tych spadków w trakcie kierunku narastania obciążenia i ich kumulacji dla kolejnych poziomów wartości siły, obserwuje się wystąpienie pętli histerezy nie przekraczającej -25 μ Str dla grubości poniżej 100 μ m. Ujawnia się to również w dryfie początkowym punktu „0”, który ustępuje po niespełna 15 minutach od momentu odciążenia próbki, niezależnie od grubości izolatora i sposobu jego utwardzania.

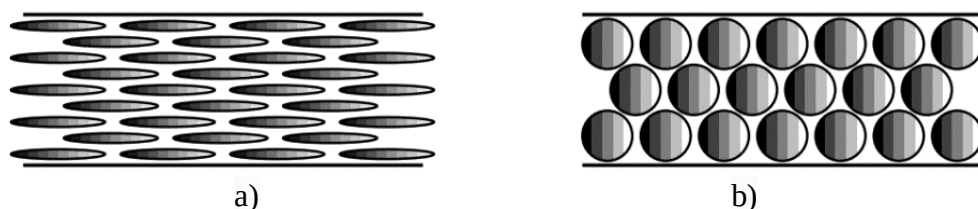
Na podstawie niniejszych badań wykonanych przy wykorzystaniu lakieru PU, możliwe jest wyjaśnienie zjawisk zaobserwowanych w trakcie badań wstępnych nowych czujników drabinkowych, realizowanych w ramach pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu PZL-130 TCII Orlik. Zaobserwowano wtedy nieznaczny, lecz stopniowy wzrost napięcia mierzonego przez układ pomiarowy czujnika po każdym uruchomieniu testu, oraz obniżanie wartości sygnału o podobnym charakterze po jego zatrzymaniu. Wstępnie uznano, że przyczyną tego zjawiska może być dryf temperaturowy farby elektroprzewodzącej. Jednak w obliczu powyższych badań, dobowe zmiany napięcia czujnika drabinkowego, które nie były skutkiem propagacji pęknięcia, wynikały z własności lepkośćprężystych lakieru PU utwardzanego w temperaturze pokojowej.

Porównując oba materiały izolacyjne przeznaczone do zastosowania w nowych czujnikach drabinkowych, zdecydowanie stabilniej i bardziej przewidywalnie zachowuje się żywica epoksydowa. Charakteryzuje się ona niewielkim wpływem grubości warstwy (do 120 μ m) na zdolność przenoszenia odkształceń ze struktury oraz znikomą pętlą histerezy pod wpływem statycznych i dynamicznych obciążeń. Badania wykonane zgodnie z przedstawionym harmonogramem nie wykazały znaczących różnic dla materiału EP w zależności od sposobu jego utwardzania.

5.1.3. Badania własności elektrycznych farby elektroprzewodzącej

Kolejnym etapem badań było wyznaczenie wybranych własności elektrycznych farby elektroprzewodzącej, która została zastosowana do wykonania siatki pomiarowej nowych czujników drabinkowych. Jej nazwa handlowa to Pelco® 16031, i jest produkowana przez firmę Ted Pella, Inc. Jest to dyspersja srebra koloidalnego,

rozpuszczonego w mieszaninie związków organicznych, głównie eteru metylowego, glikolu propylenowego, toluenu, octanu etylu, skażonego etanolu oraz izopropanolu z dodatkiem nitrocelulozy i kamfory. Zawartość cząstek stałych w farbie, które mają postać płatków o niewielkich wymiarach ok. 1 μm wynosi ok. 60%. Cząstki przewodzące w postaci płatków są częściej wykorzystywane np. w klejach elektroprzewodzących w porównaniu do cząstek sferycznych, z uwagi na wyższy stopień proporcji wymiarowej oraz objętości efektywnej i powierzchniowy kontakt międzycząsteczkowy (rys. 5.15) [15][19][127]. Cząstki srebra są na chwilę obecną najczęściej wykorzystywanym wypełniaczem farb i klejów elektroprzewodzących, z uwagi na wysoką przewodność (także w postaci utlenionej) oraz stabilność chemiczną i czasową.



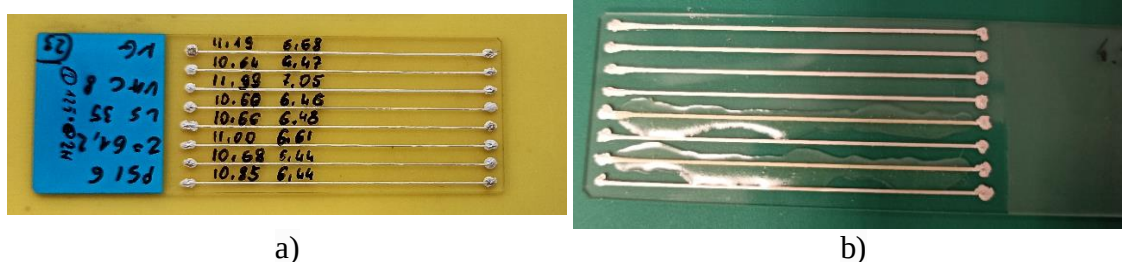
Rys. 5.15 Porównanie kształtu cząstek elektroprzewodzących a) płatki, b) kule [144]

Realizacja badań wybranych własności elektrycznych zastosowanej farby elektroprzewodzącej miała na celu określenie parametrów przydatnych w trakcie przyszłej eksploatacji nowych czujników drabinkowych, oraz zweryfikowanie obserwacji poczynionych podczas testów wstępnych przedstawionych w poprzednim rozdziale. Dla eksperymentów długotrwałych realizowanych poza laboratorium zaobserwowano, m. in. obniżenie wartości mierzonej napięcia z czujników w początkowej fazie użytkowania (np. rys. 4.11, rys. 4.13).

Wybrana farba elektroprzewodząca zgodnie z deklaracją producenta, może być utwardzana w temperaturze pokojowej, uzyskując pełne własności elektryczne i mechaniczne po niespełna 24h od aplikacji. Utwardzanie w temperaturze podwyższonej w zakresie temperatur 120÷200°C wymaga wygrzewania przez 30 minut. W celu potwierdzenia deklaracji producenta, zrealizowano badania mające określić wartość rezystancji ścieżki elektroprzewodzącej w zależności od temperatury jej utwardzania oraz stabilność tego parametru w czasie. W tym celu przygotowano zestaw próbek, w postaci szkieł mikroskopowych, na których wykonano linie z wybranej farby poddanej utwardzaniu w temperaturze pokojowej i podwyższonej zgodnie z podanym cyklem cieplnym (rys. 5.16) [153]. Następnie przeprowadzono pomiary rezystancji każdej

ze ścieżek w układzie 4-przewodowym przy użyciu źródła mierzącego Keithley SMU 2614B. Wyniki przedstawiono na rys. 5.17. Na wykresie rys. 5.17a zestawiono pomiary rezystancji dla łącznie 15 ścieżek elektroprowadzących:

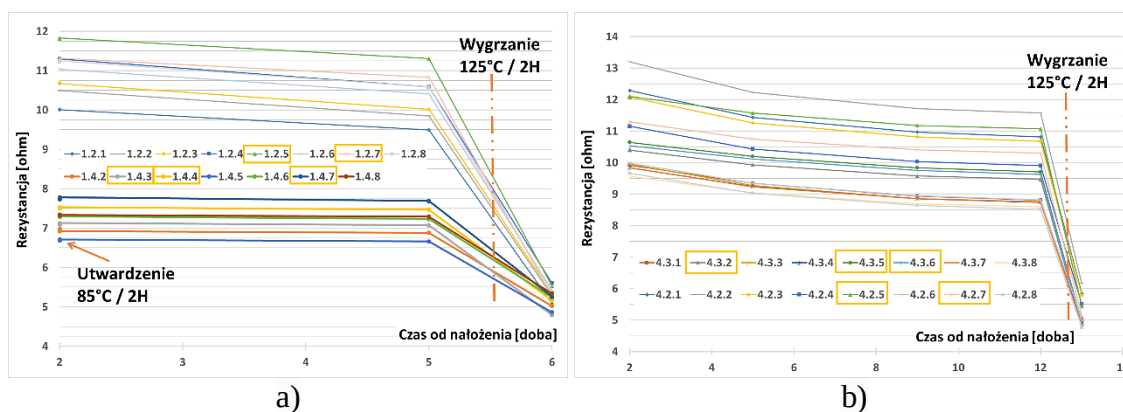
- oznaczenia 1.2.x – ścieżki utwardzane w temperaturze pokojowej, pomiar rezystancji w 2 i 5 dobie od aplikacji, następnie wygrzane w temperaturze 125°C przez 2h;
- oznaczenia 1.4.x – ścieżki utwardzane w temperaturze 85°C przez 2h, pomiar rezystancji w 2 i 5 dobie od aplikacji, następnie wygrzane w temperaturze 125°C przez 2h.



Rys. 5.16 Próbki do badań własności elektrycznych farby elektroprowadzącej, a) próbka bez warstwy izolacyjnej, b) wybrane ścieżki z warstwą izolacyjną EP

Dodatkowo podczas badań, sprawdzono wpływ obecności warstwy zabezpieczającej w postaci żywicy epoksydowej w trakcie utwardzania. Dla tych pomiarów serie danych oznaczono linią koloru pomarańczowego.

Z uwagi na zauważalny spadek wartości rezystancji ścieżek utwardzanych w temperaturze pokojowej dla pomiarów wykonanych w 2 i 5 dobie od aplikacji, na wykresie rys. 5.17b zilustrowano zmianę tego parametru dla kolejnych 16 ścieżek do 12 doby od aplikacji, które następnie utwardzono w temperaturze 125°C przez 2h.



Rys. 5.17 Wyniki zmiany rezystancji pojedynczych ścieżek elektroprowadzących a) porównanie wartości dla różnych temperatur utwardzania, b) zmiana rezystancji w czasie dla ścieżek utwardzanych w temperaturze pokojowej

Powyższe wyniki pomiarów rezystancji wskazują, że ścieżki utwardzane w temperaturze pokojowej, charakteryzują się wyższą wartością rezystancji w 2 dobie w stosunku do ścieżek utwardzanych w temperaturze podwyższonej. Dodatkowo, spadek rezystancji ścieżek, zmierzony w 5 dobie w porównaniu do wartości z 2 doby od aplikacji, wynosi odpowiednio ok. $5\div 6\%$ oraz ok. $3\div 4\%$ dla linii bez oraz z warstwą izolacyjną wykonaną z żywicy EP. W tym samym czasie, zmiana wartości rezystancji dla linii utwardzanych w temperaturze 85°C przez 2h wyniosła poniżej 1%, niezależnie od obecności warstwy zabezpieczającej z EP. Jednocześnie zaobserwowano, że najwyższe wartości rezystancji ścieżek w ramach populacji zmierzono dla tych, które zostały dodatkowo pokryte warstwą EP. Dodatkowe wygrzanie w temperaturze 125°C przez 2h rozpatrywanych na wykresie Rys. 5.17a) linii farby elektroprzewodzącej doprowadziło do dalszego, znacznego obniżenia mierzonej rezystancji. Zmiany wartości oporu elektrycznego dla odpowiednich konfiguracji w porównaniu do pomiaru z 2 doby wyniosły:

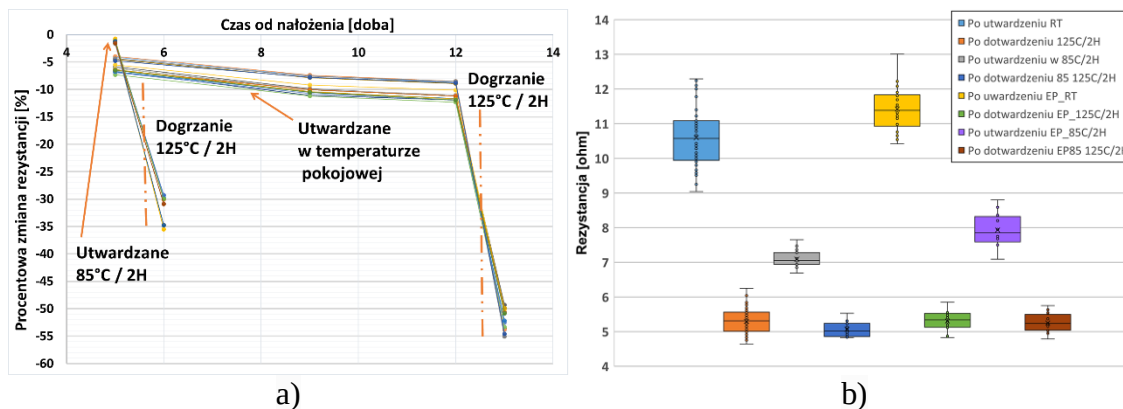
- ścieżki utwardzane w temperaturze pokojowej bez warstwy EP – ok. 50 %;
- ścieżki utwardzane w temperaturze pokojowej z warstwą EP – 53 %;
- ścieżki utwardzane w temperaturze 85°C przez 2h bez warstwy EP – 27,5 %;
- ścieżki utwardzane w temperaturze 85°C przez 2h z warstwą EP – 32 %;

Dodatkowo można zaobserwować, że po wygrzaniu w temperaturze 125°C przez 2h, rozbieżność wartości zmierzonej rezystancji wszystkich rozpatrywanych ścieżek znacząco się zmniejszyła i nie sposób powiązać skali spadku oporu z obecnością lub brakiem warstwy EP lub cyklem pierwotnego utwardzania. Większy procentowy spadek wartości parametru dla ścieżek z warstwą EP wynika z wyższej wartości początkowej rezystancji zmierzonej w 2 dobie od aplikacji.

Z uwagi na zauważalny spadek wartości oporu elektrycznego w czasie dla linii utwardzanych w temperaturze pokojowej, zweryfikowano to zjawisko w ponad dwukrotnie dłuższym horyzoncie czasowym. Dane z kolejnych pomiarów zestawiono na rys. 5.18b. Porównując wartości rezystancji zmierzone w 2, 5, 9 oraz 12 dobie po aplikacji można zauważyć postępujące obniżenie tego parametru elektrycznego, zwłaszcza w pierwszym okresie po utwardzeniu. W 9 dobie, spadek osiąga średnio około $10.5\div 11\%$ dla linii bez warstwy izolacyjnej, oraz ok. $7.5\div 8\%$ dla linii z nałożoną warstwą EP (rys. 5.18a). Uzyskane rezultaty z dużym prawdopodobieństwem wyjaśniają przyczynę obserwacji w trakcie wstępnych badań nowych czujników drabinkowych.

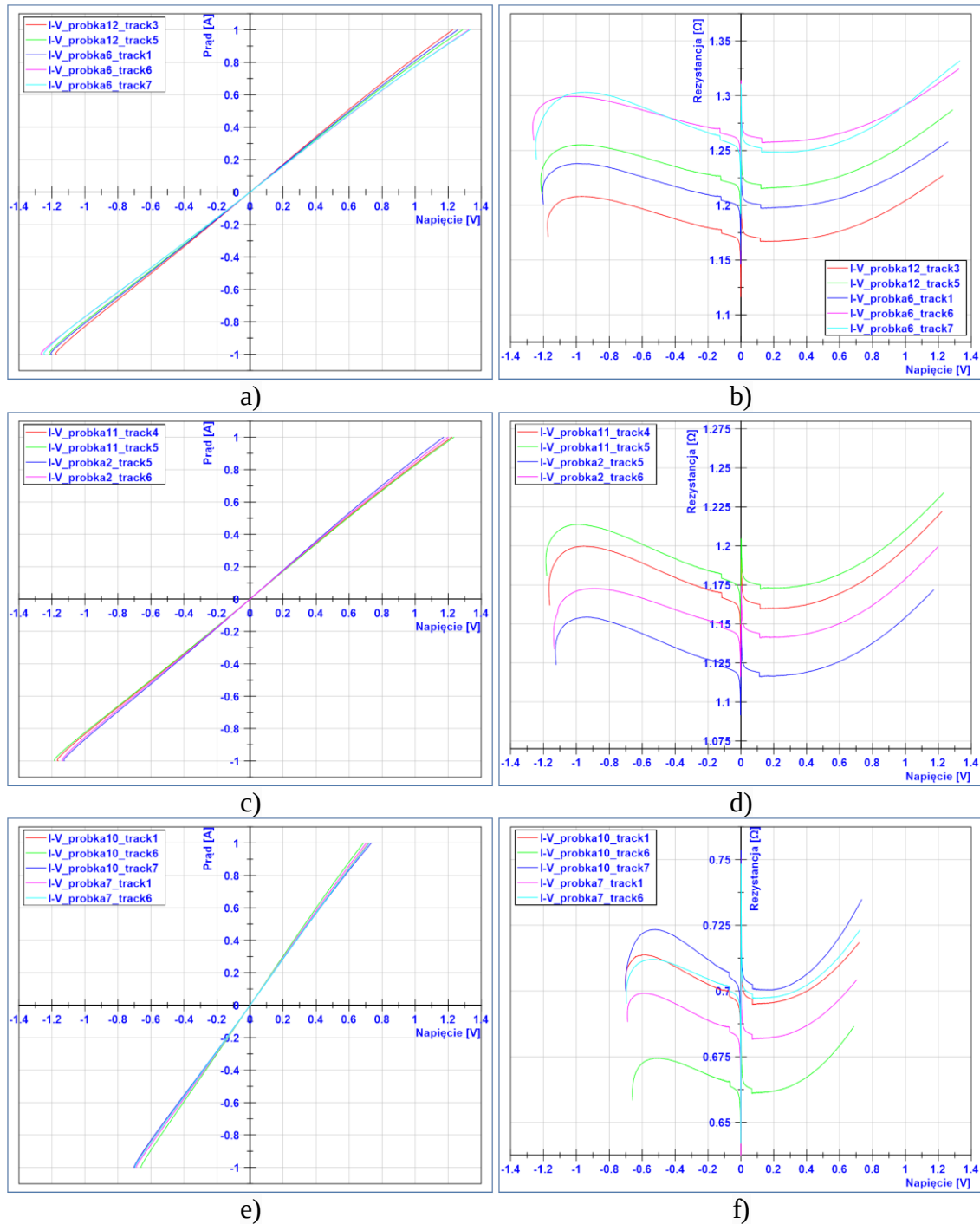
Obniżenie wartości mierzonego napięcia dla czujników wykorzystanych w trakcie badań długotrwałych wykazały spadek wartości napięcia mierzonego w początkowym okresie użytkowania. Najprawdopodobniej, zmiana ta była przyczyną utwardzania siatki pomiarowej wykonanej z farby elektroprowadzącej w temperaturze pokojowej. Zatem podniesienie temperatury utwardzania lub sezonowanie wykonanego czujnika przez określony czas wpłynie na podniesienie stabilności wskazań pozyskanych przy pomocy nowych czujników drabinkowych w początkowym okresie użytkowania.

Podsumowując, na rys. 5.18b zestawiono zmiany rezystancji dla dużej (łącznie ponad 100 sztuk) populacji ścieżek elektroprowadzących, w zależności od cyklu utwardzania w ujęciu statystycznym. Niezależnie od temperatury utwardzania, zawsze warstwa izolacyjna z EP powoduje wyższą początkową wartość mierzonego oporu elektrycznego. Utwardzanie początkowe w temperaturze 85°C przez 2h bez warstwy EP skutkuje znaczącym zmniejszeniem rozbieżności wartości rezystancji dla kolejnych ścieżek. Dotwardzanie ścieżek w temperaturze 125°C przez 2h, niezależnie od sposobu utwardzania, odstępu czasowego od utwardzania pierwotnego i obecności warstwy izolacji EP, prowadzi do uzyskania zbliżonej ostatecznej wartości rezystancji ścieżek z dokładnością do 10%.



Rys. 5.18 a) Procentowa zmiana wartości rezystancji ścieżek w czasie, b) Ujęcie statystyczne zmiany rezystancji ścieżek w zależności od cyklu cieplnego

Kolejnym etapem harmonogramu badań było sprawdzenie charakterystyk prądowo-napięciowych (charakterystyki I-V) ścieżek elektroprowadzących. Badania zrealizowano w trybie zmiany prądu wymuszenia w zakresie $-1 \div 1$ A DC z jednoczesnym pomiarem napięcia. Dla większości typowych przewodników, zależność ta jest liniowa, zgodnie z prawem Ohma. Podobnie przy badaniach rezystancji, weryfikacje przeprowadzono na podkładzie ze szkła dla ścieżek utwardzanych w 3 temperaturach: pokojowej oraz 2 podwyższonych w zakresie 70÷125°C (rys. 5.19).



Rys. 5.19 Charakterystyki I-V oraz R-V dla ścieżek elektroprowadzących utwardzanych w a) i b) temperaturze pokojowej, c) i d) temperaturze 70°C przez 2h, e) i f) temperaturze 125°C przez 2h

W trakcie przeprowadzonych badań otrzymano liniowe charakterystyki I-V dla wszystkich ścieżek, utwardzanych zgodnie z przedstawionymi cyklami cieplnymi. Ponownie można zaobserwować, że ścieżki utwardzane w najwyższej temperaturze odznaczają się najwyższym współczynnikiem kierunkowym funkcji liniowej. Skala zmiany dla ścieżek utwardzanych w temperaturze 70°C jest niższa niż zmiana rezystancji

ścieżek utwardzanych w 125°C, co świadczy o silnej zależności temperatury jej utwardzania na końcową rezystancję ścieżki. Z drugiej strony, rozważając zmiany rezystancji w ramach charakterystyki R-V, widoczny jest jej szerszy zakres liniowy dla ścieżek utwardzanych w najniższej temperaturze do ok. 0.3÷0.4 V. Oznacza to, że przynajmniej krótkookresowo ścieżki te są bardziej odporne na wyższe moce elektryczne. Jednak zakres prądu do 200 mA dla ścieżek utwardzanych w najwyższej temperaturze jest zapasem wystarczający do aplikacji, ponieważ pobierany prąd w badaniach wstępnych ustalono na 50 mA. Strefa nieliniowa na brzegach charakterystyk R-V świadczy, że prąd płynący przez ścieżkę powoduje jej samonagrzewanie, co prowadzi do niestabilnych wskazań oraz przyspieszonej degradacji ścieżki.

Istotnym aspektem eksploatacyjnym z punktu widzenia stabilności i wiarygodności wskazań nowych czujników drabinkowych jest podatność zmiany własności elektrycznych pod wpływem fluktuacji temperatury. W celu sprawdzenia tej zależności w przypadku farby elektroprzewodzącej wykorzystano układ pomiarowy oraz próbki utwardzane w temperaturze pokojowej oraz podwyższonej w 70°C, przygotowane do badań charakterystyki I-V. Zależność rezystancji od temperatury jest dla większości metali w przybliżeniu liniowa i dla szerokiego przedziału temperatur prawdziwy jest wzór [52]:

$$R_T = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T), \quad (5.5)$$

gdzie:

R_T – rezystancja w temperaturze T [Ω];

R_0 – rezystancja w temperaturze odniesienia T_0 [Ω];

α – temperaturowy współczynnik rezystancji (TWR) [K^{-1}];

ΔT – zmiana temperatury równa $T - T_0$ [K].

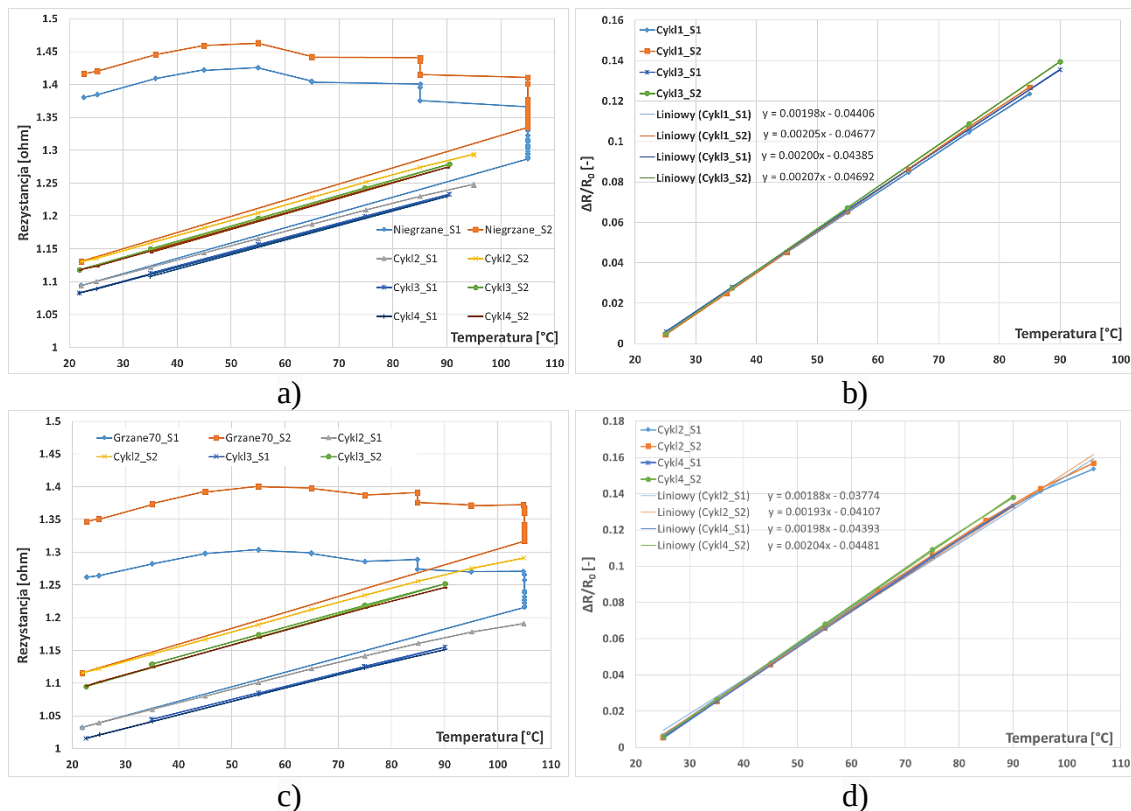
Współczynnikiem określającym względną zmianę rezystancji przewodnika przy zmianie temperatury o 1 K, jest zastosowany we wzorze parametr α (zwany również TWR). Przekształcając wzór 5.5, parametr α będzie wyrażał się zależnością:

$$\alpha = \frac{(R_T - R_0)}{R_0 \cdot \Delta T} = \frac{\Delta R}{R_0} \cdot \frac{1}{\Delta T}. \quad (5.6)$$

Na rys. 5.20a oraz rys. 5.20c zilustrowano wartości zmiany rezystancji w kolejnych cyklach pomiarowych. Zauważono, że pierwszy cykl pomiarowy dla prezentowanych ścieżek prowadzi do ich dotwardzenia, co skutkuje znaczącymi zmianami oporu

elektrycznego. Dla obu trybów utwardzania, przy stosunkowo niskiej temperaturze poniżej 45°C występuje nieliniowa zależność mierzonego parametru od temperatury. Przyczyną tego zjawiska jest zapewne odparowanie organicznych związków chemicznych, które składają się na rozpuszczalnik farby elektroprowadzącej. W konsekwencji, zmniejszona została separacja pomiędzy cząstkami srebra, co prowadzi do spadku rezystancji.

Po przeprowadzeniu pierwszego cyklu cieplnego do 105°C i wykonaniu grzania izotermicznego trwającego 1.5 h, zrealizowano kolejne cykle cieplne, w celu wyznaczenia parametru TWR, względem temperatury odniesienia 22°C±0.5°C. Otrzymane charakterystyki $\Delta R/R_0 = f(T)$ dla kolejnych cykli cieplnych wykazują silnie liniowy trend, o zbliżonym i powtarzalnym współczynniku kierunkowym funkcji (rys. 5.20b i rys. 5.20d). Wartość średnia TWR uzyskana dla ostatniego cyklu pomiarowego wynosi $2.02 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ i jest niższa w porównaniu do czystego srebra, dla którego wynosi ona $3.80 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ [51][129].

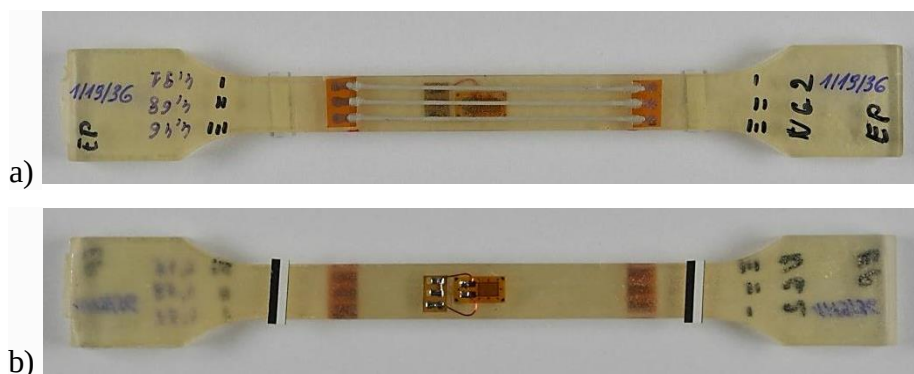


Rys. 5.20 Wyniki zmiany rezystancji w funkcji temperatury otoczenia w kolejnych cyklach pomiarowych dla ścieżek elektroprowadzących
 a) utwardzanych w temperaturze pokojowej b) wyznaczone równania regresji
 c) utwardzanych w temperaturze podwyższonej d) wyznaczone równania regresji

Można jednak zaobserwować nieznacznie niższe wartości TWR dla drugiego cyklu, co również dostarczyło dodatkowej informacji mającej wpływ na przyszłą technologię wykonania czujnika. Dla przebiegów *Cykl2_S1* oraz *Cykl2_S2* na rys. 5.20b i rys. 5.20d, widoczne jest odejście linii od trendu przy najwyższych temperaturach, tzn. przy wartości 95°C dla ścieżek utwardzanych w temperaturze pokojowej, oraz 95°C i 105°C dla ścieżek utwardzanych w temperaturze podwyższonej. Ta zależność pozwala na sformułowanie ogólnego wniosku, że aby zachować liniowy charakter względnej zmiany rezystancji od temperatury (TWR), farba elektroprowadząca powinna być utwardzana w temperaturze o ponad 10°C wyższej od przewidywanej maksymalnej temperatury pracy czujnika.

5.1.4. Badania własności elektromechanicznych farby elektroprowadzącej

Badanie własności elektromechanicznych farby elektroprowadzącej miało na celu określenie wpływu odkształcenia mechanicznego ścieżki na zmianę napięcia mierzonego. Zostały one przeprowadzone w sposób analogiczny do tych, przedstawionych w części 5.1.1. Na próbce wiosełkowej z żywicy epoksydowej naniesiono linie z farby elektroprowadzącej w obszarze objętym przez znaczniki wideoekstensometru (rys. 5.21).

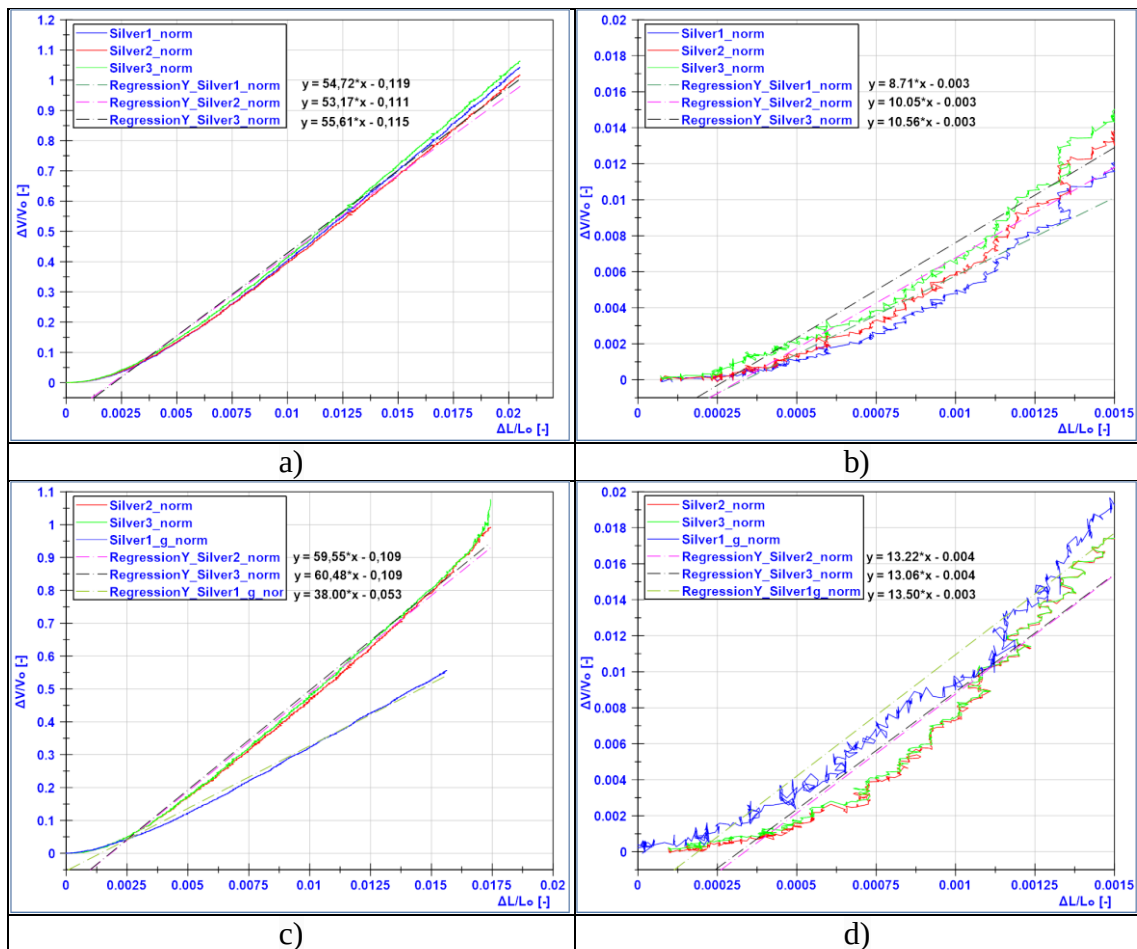


Rys. 5.21 Przykład próbki do badań własności elektromechanicznych farby elektroprowadzącej a) strona ze ścieżkami z farby, b) strona ze znacznikami wideoekstensometru

Aby zapewnić precyzję pomiaru niskich zmian rezystancji, wykorzystano układ w postaci mostka Wheatstone'a, gdzie w jedno z ramion szeregową włączono ścieżkę elektroprowadzącą. Układ ten został przedstawiony w części 5.2.1. Wyniki dla łącznie sześciu linii zilustrowano na rys. 5.22, dla których wartość $\Delta L/L_0$ stanowi względną zmianę odkształcenia próbki wiosełkowej na podstawie wskazań wideoekstensometru.

Badanie wykazało, że wartość odkształcenia względnego ma wpływ na tempo zmiany napięcia mierzonego z układu pomiarowego, zależnego od rezystancji ścieżki elektroprzewodzącej. Zaobserwowano, że zmiany te są znacząco różne dla niskich (poniżej 0.2 %) i wyższych wartości odkształcenia. Dla $\Delta L/L_0 > 0.0025$ (0.25%), występuje liniowy trend, o względnie podobnej wartości współczynnika kierunkowego. O ponad 40 % niższą wartość współczynnika kierunkowego wykazuje jedynie ścieżka *Silver_1_g* dla próbki 2, która została wykonana z dwóch warstw farby elektroprzewodzącej. Przy odkształceniach powyżej 0.015, dla próbki 2 rozpoczyna się obszar niestabilny, objawiający się zwiększoną zmiennością napięcia mierzonego utrzymującą się do zniszczenia próbki przy odkształceniu $< 2\%$.

Natomiast dla niskich odkształceń poniżej 0.2% (rys. 5.22b i rys. 5.22d), współczynniki kierunkowe funkcji liniowych dla wszystkich rozpatrywanych ścieżek są znacząco niższe, nawet dla linii *Silver_1_g* wykonanej z dwóch warstw przewodnika.



Rys. 5.22 Wyniki badań zmiany napięcia mierzonego ścieżki względem odkształcenia
 a) próbka 1 do $\Delta L/L_0 = 2\%$, b) próbka 1 do $\Delta L/L_0 = 0.15\%$ c) próbka 2 do $\Delta L/L_0 = 2\%$, b) próbka 2 do $\Delta L/L_0 = 0.15\%$

Niniejsze wyniki wskazują, że odkształcenie podłoża może znacząco wpłynąć na zmianę napięcia mierzonego dla ścieżki elektroprzewodzącej (nawet 100% przy odkształceniu $1.75 \pm 2\%$). Jednak zważywszy na wykorzystanie nowych czujników drabinkowych głównie do konstrukcji wykonanych z metali, to dla zakresu sprężystego większości tych materiałów, fluktuacja $\Delta V/V_0$ nie powinna przekroczyć 2%.

Różnice w tempie zmiany napięcia (w wyniku zmiany rezystancji ścieżki) dla mniejszych i większych wartości rozpatrywanego zakresu odkształceń, wynikają zapewne z początkowym silniejszym oddziaływaniem sił Van der Waalsa oraz płatkowej budowy cząstek srebra. Sieć przewodząca zbudowana z takich elementów wykazuje większą efektywną powierzchnię kontaktu. Wraz ze zwiększeniem odkształcenia podłoża, zwiększają się odległości między cząsteczkami, zmniejsza się pole kontaktu sąsiadujących cząstek, a także zmienia się charakter dominujący przewodnictwa, na tunelowe.

5.1.5. Badania adhezji zastosowanych materiałów

Jedną z istotnych cech mających wpływ na skuteczność działania czujników drabinkowych jest niezawodność ich przytwierdzenia do podłoża struktury badanej. Materiały zastosowane do wytworzenia nowych czujników, muszą więc charakteryzować się wysokim stopniem przylegania. W celu weryfikacji tej własności, przeprowadzono badania jakościowe z wykorzystaniem metody siatki nacięć, zgodnie z normą PN-EN ISO 2409 dla materiału izolacyjnego EP (rys. 5.23b) oraz farby elektroprzewodzącej odlanych na płycie z aluminium 7075.

Badanie to służy do oceny odporności powłok na oderwanie od podłoża lub w międzywarstwie. Polega na nacięciu powłoki w formie siatki przy użyciu specjalnych, wieloostrzowych noży o zdefiniowanej separacji ząbków. Typ noża dopierany jest w zależności od grubości powłoki (rys. 5.23a). Po wykonaniu nacięcia, powierzchnię oczyszcza się z drobnych pozostałości materiału przy pomocy pędzla, następnie przykleja się na nacięcie fragment dedykowanej taśmy klejącej, a w końcowym etapie odrywa zgodnie z instrukcją. Jakość przyczepności materiału do podłoża podlega ocenie jakościowej, i zależnie od wielkości ubytku nadaje się ocenę od 0 (bez ubytku) do 5 (ubytek ponad 65% powierzchni). W podejściu klasycznym, ocenę wykonuje operator przy użyciu lupy. W celu zapewnienia lepszej powtarzalności oceny, autor wykorzystał

mikroskop wraz z oprogramowaniem do analizy obrazu, w celu określenia wielkości ubytków.

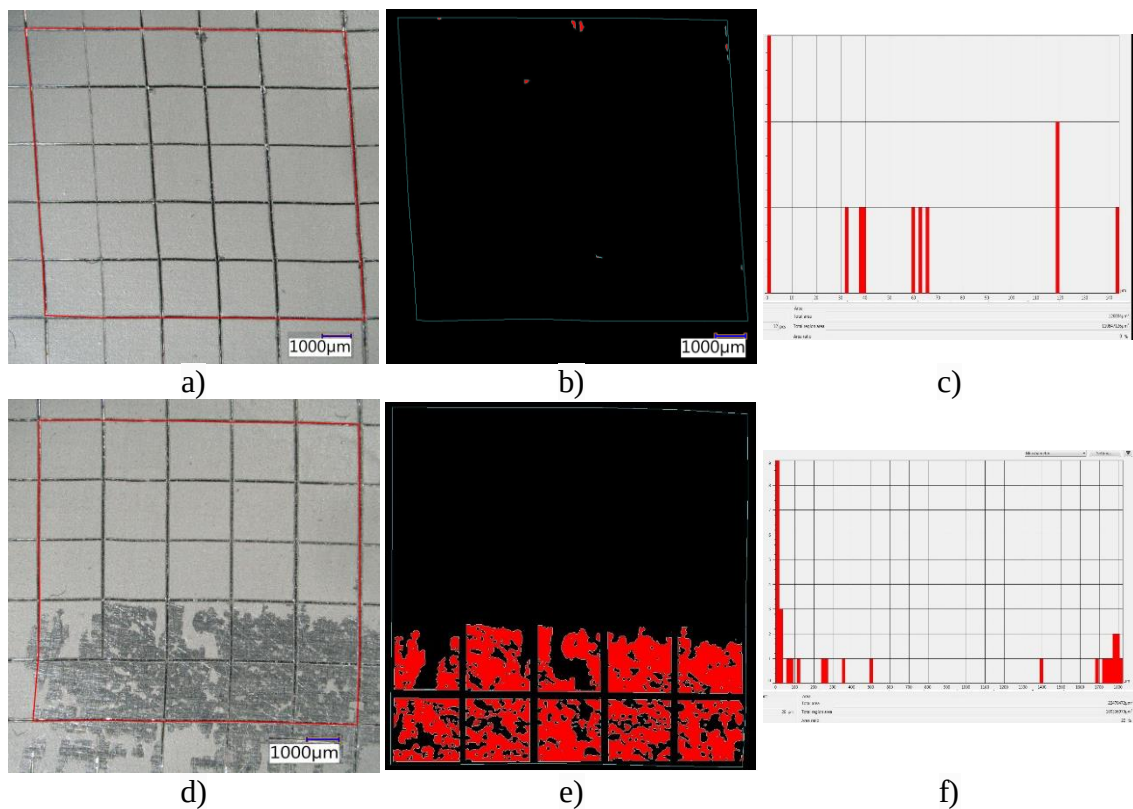


Rys. 5.23 Przygotowanie do badania adhezji,
a) Zestaw do badania przyczepności powłoki metodą siatki nacięć,
b) próbka do badania przyczepności żywicy epoksydowej

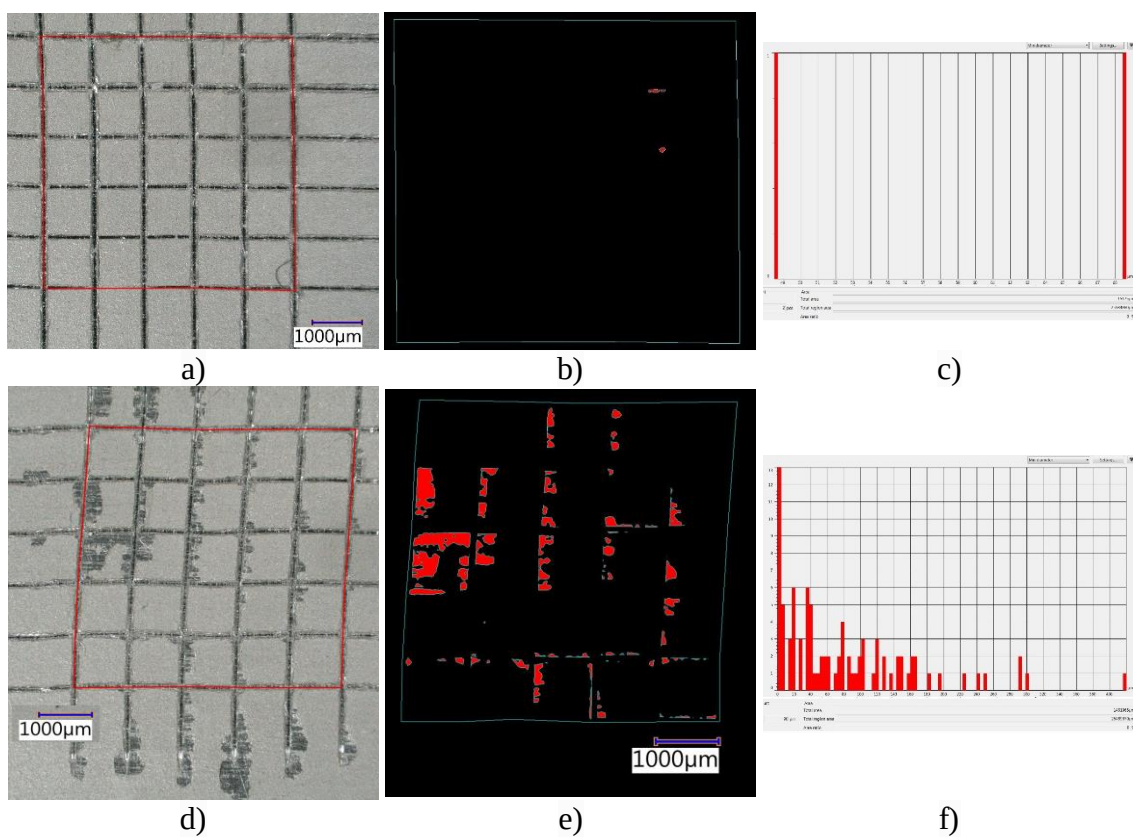
Poniżej na rys. 5.24 oraz rys. 5.25 zobrazowano wyniki badania przeprowadzonego dla farby elektroprowadzącej. Grubość powłoki mieściła się w zakresie $15 \div 20 \mu\text{m}$. Choć dla podłoża aluminiowego i tej grubości nałożonej warstwy, norma zaleca wykorzystanie noża o separacji ostrzy 1 mm, dla porównania weryfikację przeprowadzono dla dwóch typów noża. Na poniższych rysunkach, oprócz widoku fragmentu pokrycia po teście, pokazano wynik ekstrakcji ubytków przy użyciu analizy obrazu (obraz środkowy) oraz histogram wielkości i ilości wykrytych ubytków. Przedstawione wyniki obrazują zarówno typowy jak i najgorszy wynik przeprowadzonej weryfikacji przyczepności powłoki.

Łącznie, przeprowadzono badania na 30 fragmentach warstwy farby elektroprowadzącej, na których wykonano:

- 16 nacięć nożem o rozstawie ostrzy 1 mm, z czego 12 nie wykazało żadnego ubytku lub był on minimalny, spełniając wymagania dla klasy 0 lub 1 (ubytek $< 5\%$):
- 14 nacięć nożem o separacji ostrzy 2 mm, z czego 10 nie wykazało żadnego ubytku lub był on minimalny, spełniając wymagania dla klasy 0 lub 1.



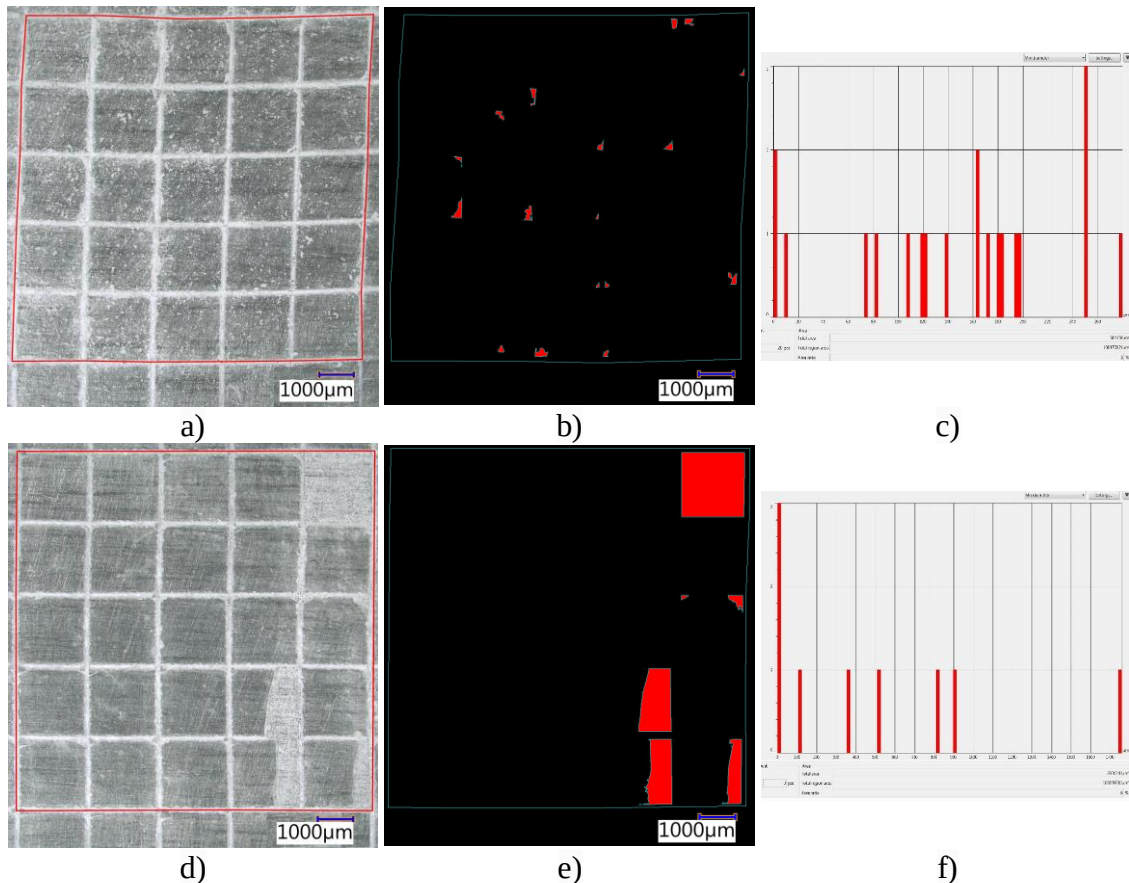
Rys. 5.24 Wyniki badania przyczepności farby elektroprowadzącej nożem 2 mm



Rys. 5.25 Wyniki badania przyczepności farby elektroprowadzącej nożem 1 mm

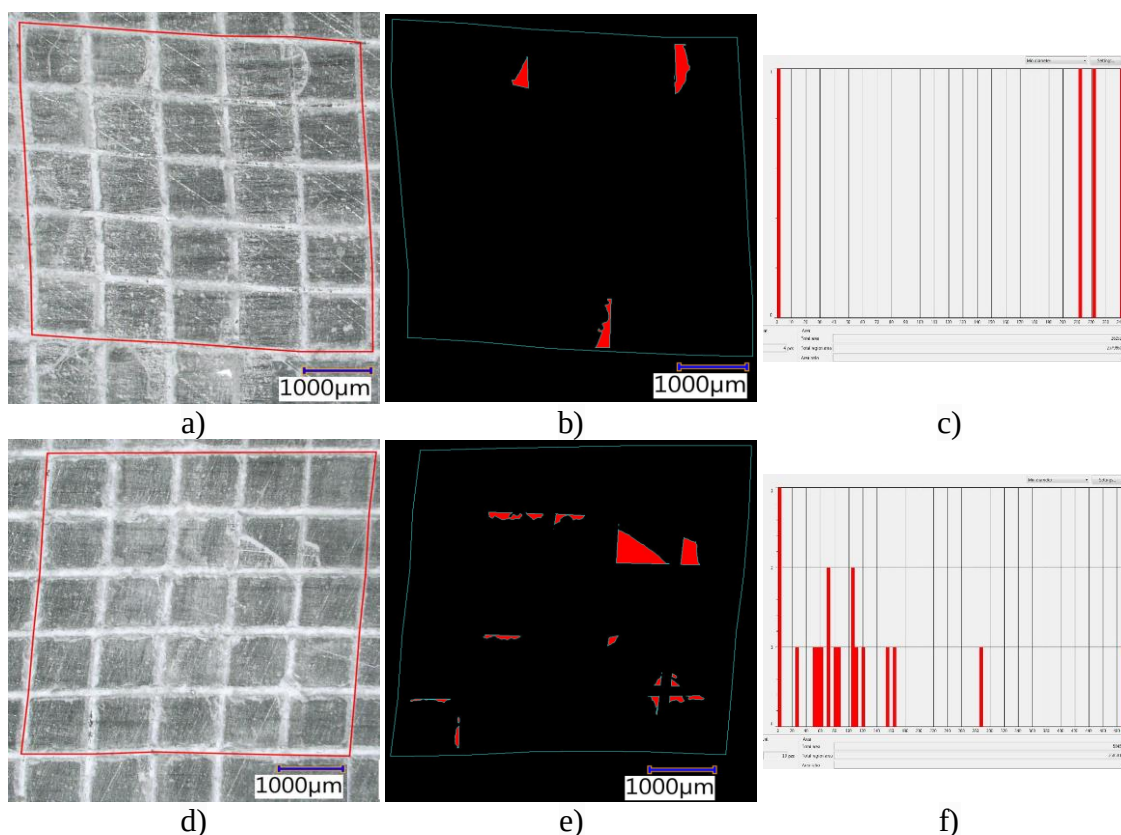
Zważywszy na fakt, że statystycznie ok. 75% badanych próbek wykazało po badaniu minimalny ubytek, uznaje się że farba elektroprowadząca wykazuje bardzo dobrą przyczepność do stopu 7075. Charakter większych ubytków był lokalny i prawdopodobnie ma związek z miejscowym pogorszeniem jakości przygotowania powierzchni płyty aluminiowej przed nałożeniem powłoki.

Przebieg badań powtórzono dla materiału izolacyjnego EP, lecz powłoki zróżnicowano pod względem grubości w zakresie 40-50 μm do 120-130 μm . Łącznie zbadano 11 powłok o grubości powyżej 61 μm przy użyciu noża o separacji ostrzy 2 mm, oraz 6 powłok o grubości ≤ 60 μm przy zastosowaniu noża 1 mm. Wyniki badań zobrazowano na rys. 5.26 oraz rys. 5.27. Większość próbek wykazała minimalne ubytki mieszczące się w klasie 0 lub 1



Rys. 5.26 Wyniki badania przyczepności żywicy EP dla grubości powyżej 61 μm .

Na rys. 5.26d-f przedstawiono jeden z gorszych wyników badania wykonany dla grubości powłoki w przedziale 100÷120 μm . Podobnie jak dla farby elektroprowadzącej, znaczne ubytki mają lokalny charakter, co może mieć związek z przygotowaniem powierzchni płyty. Badania zrealizowane dla grubości ≤ 60 μm , z nacięciami o separacji 1 mm mogą zostać sklasyfikowane do 1 klasy przyczepności.



Rys. 5.27 Wyniki badania przyczepności żywicy EP dla grubości $\leq 60 \mu\text{m}$.

Podsumowując, przeprowadzone badania przyczepności farby elektroprowadzącej oraz żywicy epoksydowej do płyty aluminiowej 7075 w większości wykazują dobrą lub bardzo dobrą adhezyjność. Lokalne zwiększenie powierzchni ubytków jest skutkiem przygotowania powierzchni płyty przed nałożeniem materiału, co potwierdza znaczący wpływ tej czynności na skuteczność i poprawność działania połączenia adhezyjnego. Zatem należy rozważyć dodatkowe czynności, wpływające na polepszenie własności adhezyjnych powierzchni metodami klasycznymi (np. trawienie, nałożenie *primera*) lub nowszymi, które często nie wymagają zastosowania środków chemicznych (np. zastosowanie oczyszczania i aktywacji powierzchni plazmą atmosferyczną).

5.1.6. Badania własności cieplnofizycznych zastosowanych materiałów

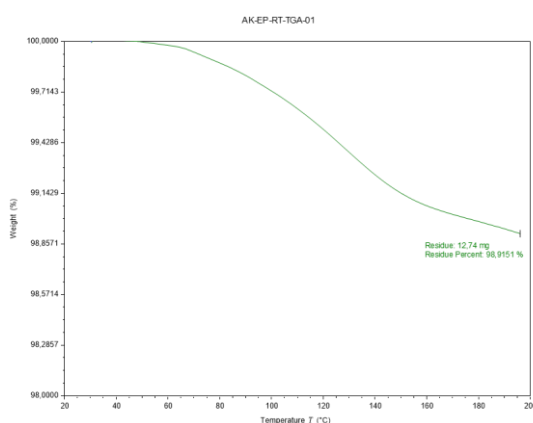
Badania własności cieplnofizycznych przeprowadzono, w celu weryfikacji stabilności materiałów pod wpływem oddziaływania na nie temperatury oraz określenia charakterystycznych obszarów ich przejść fazowych [116].

Analiza termogravimetryczna (TGA) umożliwiła zbadanie stabilności termicznej materiałów wybranych do wytworzenia nowych czujników drabinkowych. Pomiary TGA przeprowadzono za pomocą urządzenia TGA 5500 firmy TA Instruments. Urządzenie

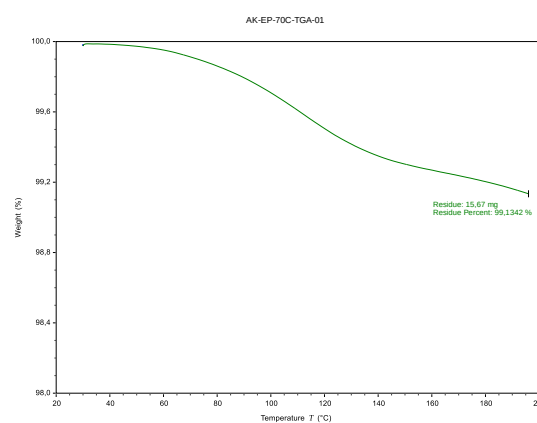
zostało wyposażone w platynowe tygielki odporne na utlenianie. Próbkę wycięto z odlanego materiału, a ich masa mieściła się w zakresie od 10 do 20 mg. Procedurę realizacji testu jest zawarta w tabeli 4. Zmianę masy próbek monitorowano podczas cyklu ogrzewania z rozdzielczością 0,001 mg. Wyniki badania TGA dla żywicy epoksydowej, lakieru poliuretanowego oraz farby elektroprzewodzącej zobrazowano odpowiednio na rys. 5.28, rys. 5.29 oraz rys. 5.30. Badania przeprowadzono dla materiału utwardzonego w temperaturze pokojowej i podwyższonej.

Tabela 4 Warunki realizacji analizy termograwimetrycznej (TGA)

Procedura testu	Prędkość grzania	10 °C/min
	Zakres grzania	RT → 200°C
Maksymalna temperatura [°C]	200	
Rodzaj gazu oraz przepływ [ml/min]	Suche powietrze	25

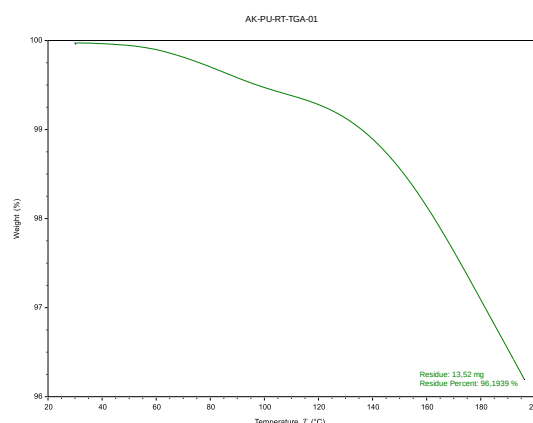


a)

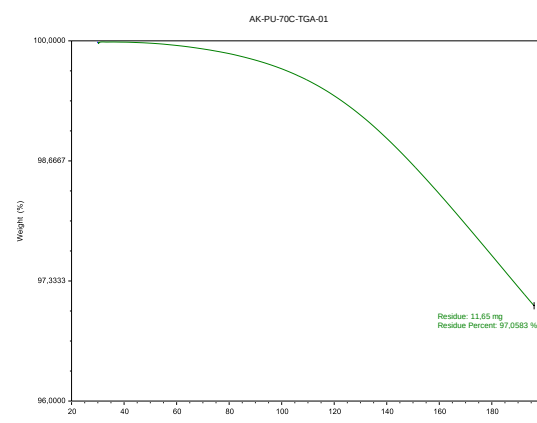


b)

Rys. 5.28 Wyniki TGA dla żywicy EP a) utwardzanej w temperaturze pokojowej, b) utwardzanej w temperaturze podwyższonej 70°C

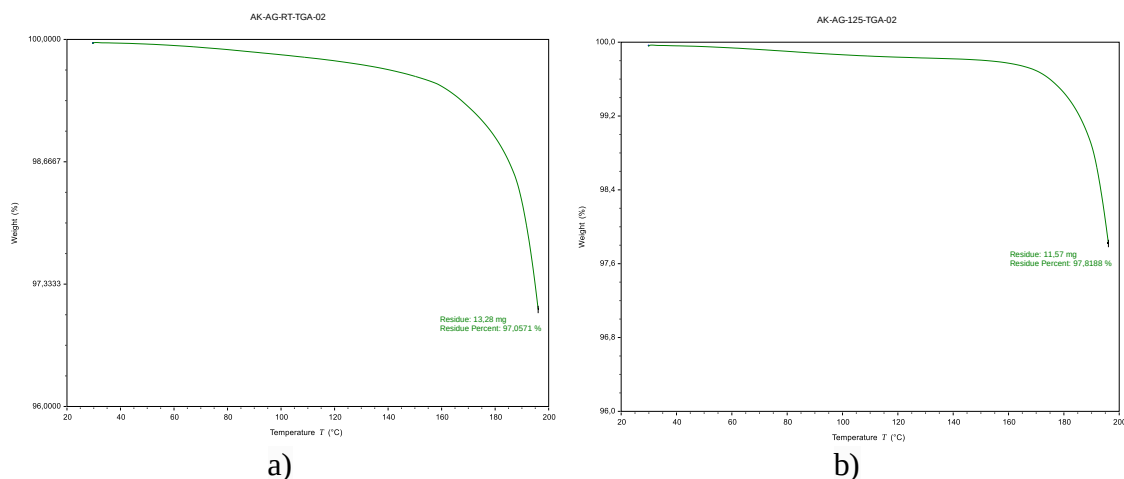


a)



b)

Rys. 5.29 Wyniki TGA dla lakieru PU a) utwardzanej w temperaturze pokojowej, b) utwardzanej w temperaturze podwyższonej 70°C



Rys. 5.30 Wyniki TGA dla farby elektroprowadzącej
a) utwardzanej w temperaturze pokojowej,
b) utwardzanej w temperaturze podwyższonej 125°C

Zmianę masy próbki dla wszystkich testowanych materiałów zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5 Porównanie ubytku masy w trakcie analizy TGA dla żywicy EP, lakieru PU i farby elektroprowadzącej

	EP_RT	EP_70°C	PU_RT	PU_70°C	farba_RT	farba_125°C
Masa próbki przed badaniem [mg]	12.87	15.81	14.05	12.00	13.68	11.83
Masa próbki po badaniu [mg]	12.74	15.67	13.52	11.65	13.28	11.57
Zmiana masy [%]	1.08	0.87	3.81	2.94	2.94	2.18

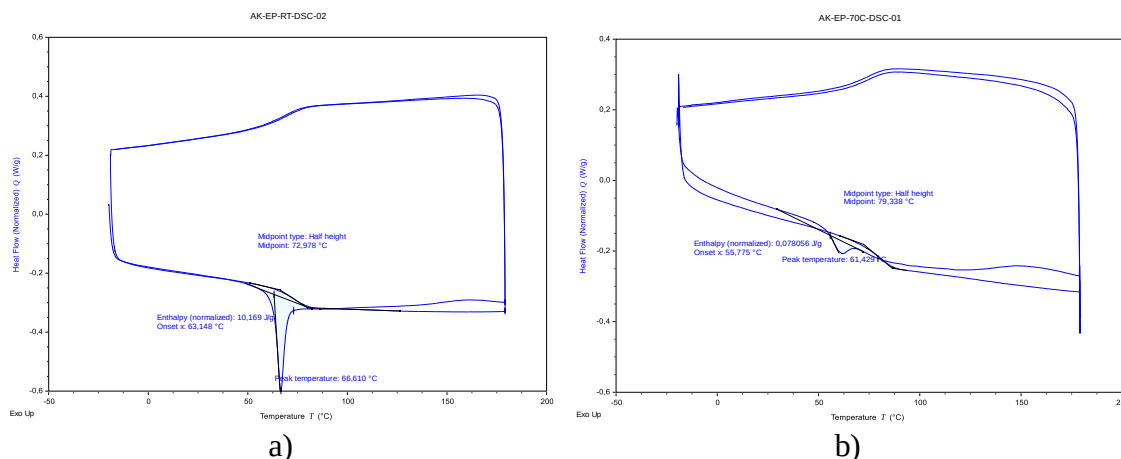
Analiza TGA wykazała, że spośród materiałów izolacyjnych, wyższą odporność na podwyższoną temperaturę wykazuje żywica epoksydowa. W zakresie do 200°C, utrata masy wyniosła odpowiednio 1.08 % dla próbki utwardzanej w temperaturze pokojowej oraz 0.87 % dla próbki utwardzanej w temperaturze podwyższonej. Zgodnie z wynikami innych badań, utrata masy jest głównie spowodowana desorpcją wody i uwalnianiem fenolu, CO i CH₄ [92][147]. Niższa procentowa strata masy dla próbki utwardzanej w temperaturze podwyższonej, może być spowodowana parowaniem związków lotnych w trakcie procesu utwardzania. Podobną zależność dla próbek utwardzanych w temperaturze pokojowej i podwyższonej zaobserwowano dla lakieru PU oraz farby elektroprowadzącej. Oba ww. materiały zawierają wysoką zawartość związków lotnych, stąd spadek masy jest zauważalnie wyższy niż dla żywicy EP.

Badania przemian termicznych zachodzących w materiałach po podgrzaniu przeprowadzono metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC). Pomiary

wykonano przy użyciu urządzenia DMA Q2000 firmy TA Instruments. Próbkę pocięto na kawałki ważące około 5 mg, a następnie zamknięto w aluminiowym tygielku. Jako próbkę odniesienia zastosowano pusty tygiel aluminiowy. Warunki realizacji badania przedstawia tabela 6. Z kolei, wyniki badań DSC odpowiednio dla żywicy epoksydowej, lakieru poliuretanowego oraz farby elektroprowadzącej zobrażowano na rys. 5.31 i tabeli 7, rys. 5.32 i tabeli 8 oraz rys. 5.33 i tabeli 9.

Tabela 6 Warunki realizacji badania metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC)

Procedura testu	Cykl grzania 1	
	Prędkość grzania	10 °C/min
	Zakres grzania	-20°C → 180°C → -20°C
	Cykl grzania 2	
	Prędkość grzania	10 °C/min
	Zakres grzania	-20°C → 180°C → -20°C
Maksymalna temperatura [°C]	180	
Rodzaj gazu oraz przepływ [ml/min]	azot	50



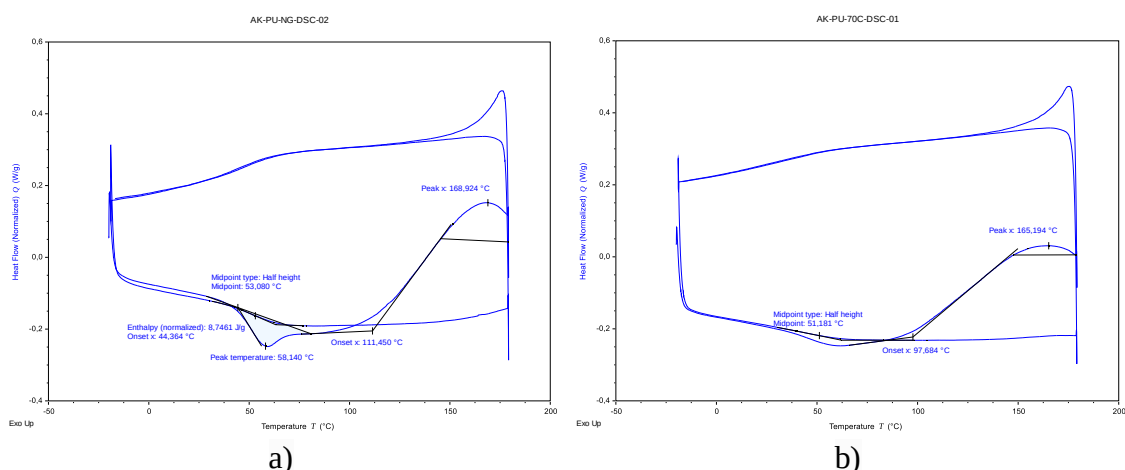
Rys. 5.31 Wyniki DSC dla żywicy EP a) utwardzana w temperaturze pokojowej, b) utwardzana w temperaturze podwyższonej 70°C

Tabela 7 Porównanie parametrów charakterystycznych z badań DSC dla żywicy EP

	EP_RT	EP_70°C
Temperatura zeszklenia [°C]	72.98 (w cyklu 2)	79.34 (w cyklu 2)
Początek relaksacji entalpii [°C]	63.15 (w cyklu 1)	55.77 (w cyklu 1)
Pik temperatury relaksacji entalpii [°C]	66.61 (w cyklu 1)	61.43 (w cyklu 1)

Badania DSC wykazały, że utwardzanie żywicy EP w temperaturze podwyższonej powoduje obniżenie piku relaksacji entalpii (przemiany endotermicznej) w pierwszym

cyklu grzania oraz podniesienie temperatury zeszklenia wyznaczonej w drugim cyklu. Wskazuje to na wzrost gęstości usieciowienia struktury materiału utwardzanego w temperaturze podwyższonej, co skutkuje zwiększoną odpornością materiału np. na czynniki środowiskowe i zmniejszoną chłonność wilgoci. Podniesienie temperatury zeszklenia powoduje, że później (pod względem wartości temperatury) materiał przejdzie w fazę mięknięcia o zwiększonej mobilności łańcuchów polimerowych. W obu przypadkach dla wyższych temperatur, krzywe przemian egzotermicznych świadczące o dotwardzaniu lub krystalizacji mają nieznaczny zakres.



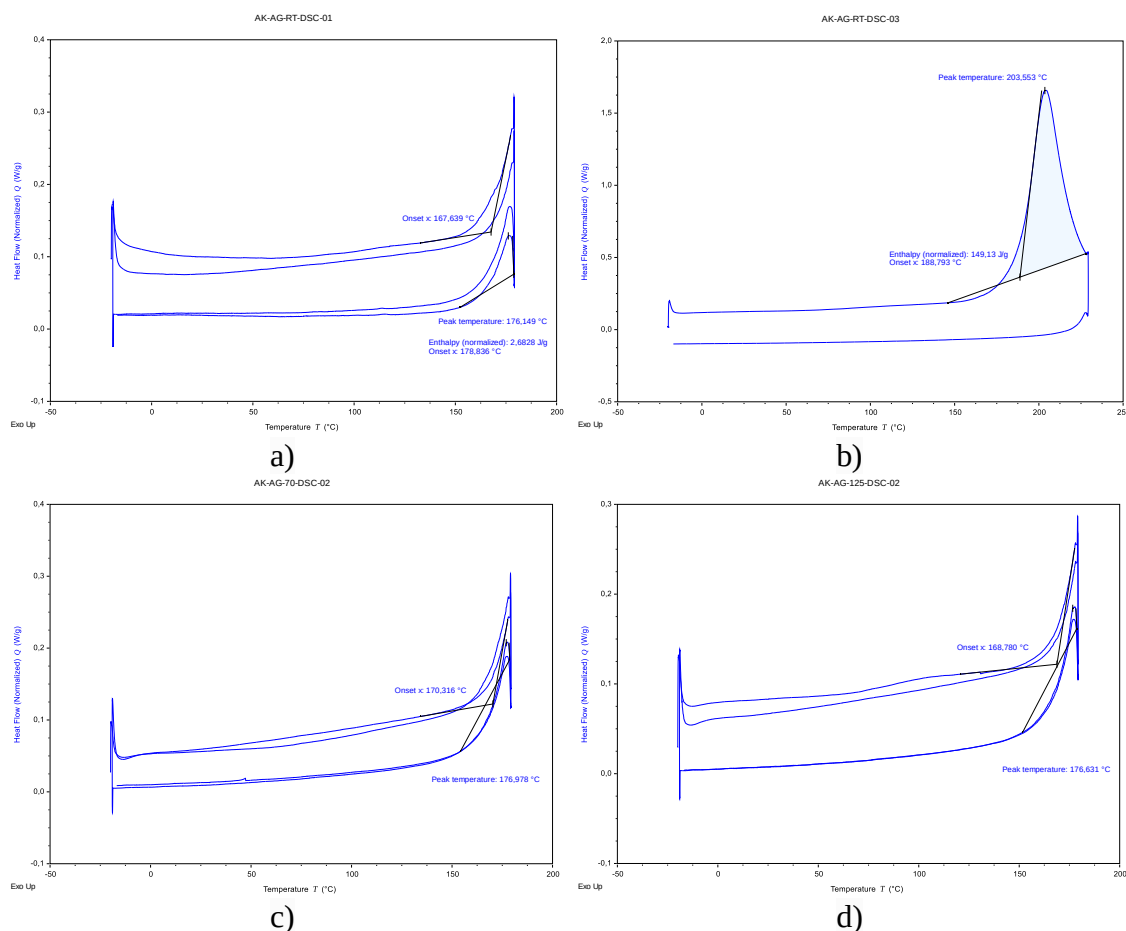
Rys. 5.32 Wyniki DSC dla lakieru PU a) utwardzana w temperaturze pokojowej, b) utwardzana w temperaturze podwyższonej 70°C

Tabela 8 Porównanie parametrów charakterystycznych z badań DSC dla lakieru PU

	PU_RT	PU_70°C
Temperatura zeszklenia [°C]	53.08 (w cyklu 2)	51.18 (w cyklu2)
Początek relaksacji entalpii [°C]	44.36 (w cyklu1)	Nie określono
Pik temperatury relaksacji entalpii [°C]	58.14 (w cyklu1)	Nie określono
Początek szczytu zimnej krystalizacji [°C]	111.45 (w cyklu1)	97.68 (w cyklu1)
Maksimum szczytu zimnej krystalizacji [°C]	168.92 (w cyklu1)	165.19 (w cyklu1)

Dla lakieru PU, jedynie dla próbki utwardzanej w temperaturze pokojowej zaobserwowano w 1 cyklu przemianę endotermiczną w postaci piku relaksacji entalpii. Dla obu próbek, powyżej temperatury 100°C występuje wyraźna przemiana egzotermiczna, występująca zarówno w fazie nagrzewania, jak i studzenia, mogąca świadczyć o zachodzącym procesie krystalizacji.

Przemiany zachodzące w ramach badania DSC mogą świadczyć, że lakier PU utwardzany w temperaturze pokojowej wykazuje strukturę amorficzną, która w wysokich temperaturach przekształca się w półkryształiczną. Potwierdzeniem tego założenia może być fakt, że w drugim cyklu nagrzewania możliwe jest wyznaczenie temperatury zeszklenia, ale przemiana egzotermiczna nie występuje.



Rys. 5.33 Wyniki DSC dla farby elektroprowadzącej
a) utwardzana w temperaturze pokojowej, b) 3 etap nagrzewania dla próbki 230°C,
c) utwardzana w temperaturze podwyższonej 70°C,
d) utwardzana w temperaturze podwyższonej 125°C

Tabela 9 Porównanie parametrów charakterystycznych z badań DSC dla farby elektroprowadzącej

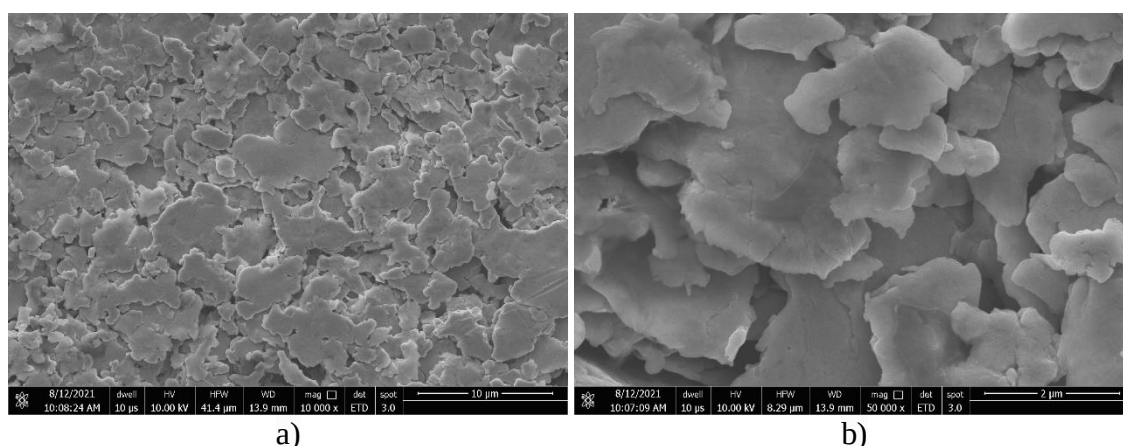
	farba_RT	farba_RT (3 raz)	farba_70°C	farba_125°C
Początek szczytu zimnej krystalizacji [°C]	167.64 (w cyklu1)	187.21 (w cyklu1)	170.32 (w cyklu1)	168.78 (w cyklu1)
Maksimum szczytu zimnej krystalizacji [°C]	176.15 (w cyklu1)	203.55 (w cyklu1)	176.98 (w cyklu1)	176.63 (w cyklu1)

Dla farby elektroprowadzącej zaobserwowano jedynie reakcję egzotermiczną w obu cyklach cieplnych niezależną od temperatury utwardzania. Wystąpienie jej zarówno w trakcie nagrzewania jak i chłodzenia, świadczy o niedokończonym charakterze przemiany fazowej w zakresie procedury testu do temperatury 180°C. Zwiększenie zakresu dodatkowego cyklu cieplnego dla próbki wstępnie utwardzanej w temperaturze pokojowej, pozwoliło na dokończenie procesu zimnej krystalizacji i określenie jej szczytu przy temperaturze ponad 200°C. Badania DSC dowiodły, że dla farby elektroprowadzącej nie zachodzą nagle przemiany fazowe w temperaturze do 150°C.

5.1.7. Badania morfologii powierzchni farby elektroprowadzącej

Podczas analizy wyników badań własności elektrycznych farby elektroprowadzącej zaobserwowano znaczną zmianę rezystancji ścieżek elektroprowadzących, w zależności od temperatury utwardzania. Zmniejszenie parametru oporu elektrycznego spowodowane jest intensywniejszym odparowaniem rozpuszczalnika w temperaturze podwyższonej, a w konsekwencji skróceniem odległości pomiędzy cząsteczkami srebra i ich lepsze sprzężenie w ramach łańcucha przewodnictwa.

Badania morfologii powierzchni farby elektroprowadzącej z wykorzystaniem zobrazowania ze skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) umożliwiły w dużym powiększeniu obserwację cząstek srebra. Na rys. 5.34÷5.36 przedstawiono powierzchnie próbek wykonanych z farby utwardzanej w temperaturze pokojowej i podwyższonej do 70°C przez 2 h.

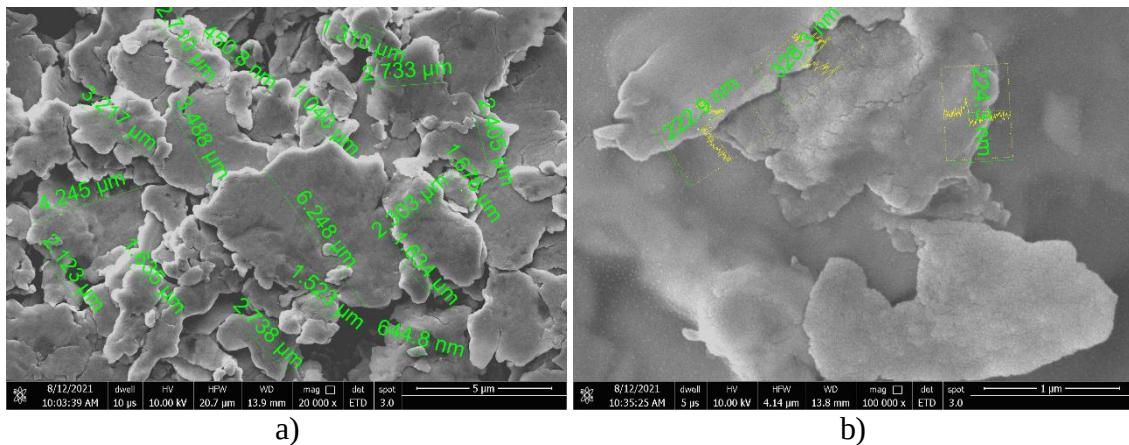


Rys. 5.34 Obrazy SEM farby utwardzanej w temperaturze 70°C

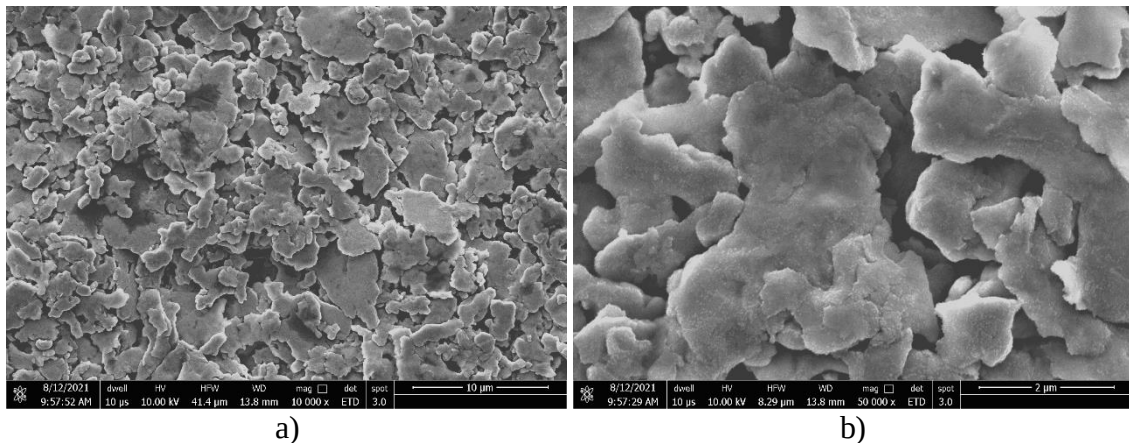
Niezależnie od temperatury utwardzania, obrazy SEM ukazują cząstki srebra farby elektroprowadzącej w postaci płasko ułożonych płatków, tworzących relatywnie dobrze

zwartą i połączoną powierzchnię. Spowodowane jest to wysoką zawartością cząstek elektroprowadzących na poziomie 60%. Warstwa farby elektroprowadzącej utwardzanej w temperaturze podwyższonej wykazuje mniej ciemnych obszarów, które są charakterystyczne dla nieciągłości i rejonów bogatych w pozostałości materiału nośnika dyspersji. Sugeruje to lepsze zagęszczenie fazy elektroprowadzącej w jednostce objętości warstwy.

Na rys. 5.35 przedstawiono wymiary płatków srebra oraz odległość wertykalną pomiędzy ułożeniem sąsiadujących warstw. Większość cząstek mierzy powyżej $2\ \mu\text{m}$, choć występują również znacznie mniejsze mające wymiar ok. $0.5\ \mu\text{m}$. Konfiguracja łańcucha elektroprowadzącego, złożonego z większych i mniejszych elementów, pozwala efektywnie zwiększyć przewodność elektryczną, i ograniczyć zmiany orientacji cząstek, a także topologii sieci np. pod wpływem odkształceń. Na podstawie wymiarów określonych na rys. 5.35b można stwierdzić, że płatki charakteryzują się wysokim współczynnikiem kształtu, ponieważ ich grubość mieści się w granicach $0.2\div 0.3\ \mu\text{m}$.



Rys. 5.35 Obrazy SEM z wymiarami cząstek dla farby elektroprowadzącej



Rys. 5.36 Obrazy SEM farby utwardzanej w temperaturze pokojowej

Na podstawie przedstawionych badań SEM można stwierdzić, że lepsze własności w aplikacji nowych czujników drabinkowych będzie miała farba elektroprowadząca utwardzana w temperaturze podwyższonej. Mniej obszarów stanowiących pozostałości płynnego nośnika farby wpływa na lepszy kontakt międzycząsteczkowy, co skutkuje uzyskaniem lepszego łańcucha przewodności elektrycznej. Wysoka zawartość cząstek srebra zapewni przewagę elektronowego charakteru przewodnictwa nawet pod wpływem odkształceń mechanicznych.

5.2. Badania autorskich czujników drabinkowych

Wyniki realizacji badań materiałowych, przedstawionych w podrozdziale 5.1, pozwoliły wyjaśnić przyczyny wystąpienia większości obserwacji ze wstępnych badań weryfikacyjnych autorskich czujników drabinkowych. W oparciu o te dane, wprowadzono nieznaczne modyfikacje w technologii obróbki zastosowanych materiałów i wytwarzania nowych czujników oraz układzie akwizycji danych. Następnie przeprowadzono dalsze zmęczeniowe badania eksperymentalne, w celu ostatecznego potwierdzenia skuteczności działania nowych czujników drabinkowych przeznaczonych do detekcji i monitorowania pęknięć. Plan badań obejmował między innymi zastosowanie rzeczywistego widma obciążeń eksploatacyjnych oraz wysokocyklowe badania stabilności działania czujników bez propagacji pęknięcia.

5.2.1. Modyfikacje metody względem badań wstępnych

Jednym z wniosków wyciągniętych z badań materiałowych, jest zależność sposobu utwardzania farby elektroprowadzącej na wartość nominalną rezystancji pojedynczej ścieżki, a także stabilność czasowa tego parametru. W trakcie badań wstępnych (rozdział 4) zaobserwowano stopniowe obniżenie wartości napięcia mierzonego z układu pomiarowego w początkowym okresie użytkowania czujnika. Przyczyną było utwardzanie siatki pomiarowej w temperaturze pokojowej, oraz rozpoczęcie akwizycji danych na kilka dni od aplikacji. Na podstawie badań przedstawionych w rozdziale 5.1.3. zaobserwowano, że ścieżki z farby elektroprowadzącej, utwardzane w temperaturze pokojowej, wykazują obniżenie wartości rezystancji o nawet 10 %, do 12 dni od aplikacji. W tym samym czasie, rezystancja ścieżki utwardzanej w temperaturze podwyższonej 85°C przez 2 h spadła zaledwie o 1 %. Dlatego wymaganą zmianą w technologii wykonania autorskiego czujnika drabinkowego, jest sezonowanie siatki pomiarowej

po aplikacji przez co najmniej 12 dni, lub jeśli to możliwe, utwardzać ją w temperaturze podwyższonej. W przypadku użytkowania czujnika w warunkach o zmiennej temperaturze otoczenia, siatkę pomiarową utwardzać w temperaturze co najmniej 10°C wyższej niż maksymalna temperatura pracy czujnika, by zachować stabilność parametru rezystancji w temperaturze pokojowej.

Z kolei brak widocznej zmiany mierzonego napięcia dla czujników drabinkowych, pomimo postępującej propagacji pęknięcia elementu, mógł wynikać z zastosowanego materiału na warstwę izolacyjną w postaci lakieru poliuretanowego PU. Badanie wpływu grubości warstwy izolacyjnej na możliwość przenoszenia odkształceń z monitorowanej struktury dowiodły, że lakier PU charakteryzuje się znacznym współczynnikiem strat w tym zakresie. Zaobserwowano, że już dla grubości warstwy PU 25 μm , poziom odkształceń jest o 4÷5 % niższy, niż na powierzchni elementu, i ten trend jest kontynuowany wraz ze wzrostem wartości tego wymiaru. Dodatkowo, badania mechaniczne wykazały ponad 15 % wydłużenie próbki przy zerwaniu. Utwardzenie warstwy PU w temperaturze podwyższonej prowadzi o zmniejszenia elastyczności tego materiału. Niemniej jednak, pomimo wygody zastosowania lakieru PU jako komponentu 1-składnikowego do wytworzenia warstwy izolacyjnej czujnika drabinkowego, należy ograniczyć jej stosowanie do tego celu. Możliwe jest wykorzystanie tego materiału do wytworzenia warstwy izolacyjnej do 50 μm tylko po utwardzenia w temperaturze podwyższonej 70°C przez 2 h.

W celu wytworzenia warstwy izolacyjnej, rekomendowane jest wykorzystanie scharakteryzowanej żywicy EP. W trakcie badań wykazała się ona wysoką stabilnością pracy, znikomą pętlą histerezy odkształceń oraz brakiem pełzania warstwy (co również jest znaczącym czynnikiem negatywnym zastosowania dla warstwy PU). Z założenia, grubość warstwy izolacyjnej powinna być możliwie mała, lecz dla tego materiału nie zaobserwowano negatywnego wpływu na przenoszenie odkształceń nawet przy wymiarach powyżej 100 μm , niezależnie od sposobu utwardzania. Cieńsza warstwa izolacyjna przekłada się na wyższą elastyczność i promień zginania czujnika, co podnosi jego własności użytkowe. W ramach badań przedstawionych w części 5.2.3, sprawdzono czujniki drabinkowe wykonane bezpośrednio na badanym elemencie, jak i prefabrykowane na folii antyadhezyjnej i przyklejone do próbki.

Zmiana wprowadzona po wykonaniu badań wstępnych dotyczyła również układu pomiarowego, który wykorzystano przy realizacji dalszych testów. Jedną z obserwacji po badaniach przedstawionych w rozdziale 3 była relatywnie niewielka separacja

poziomów stabilnych po przerwaniu kolejnych ścieżek siatki pomiarowej (przykład zbioru danych *czujnik1_dolny* na rys. 4.13). W badaniach wstępnych wykorzystano układ dzielnika napięcia do pomiaru sygnału z czujników drabinkowych, który zorganizowano tak, by zachować wartość prądu płynącego w układzie poniżej progu samonagrzewania się ścieżki i rezystora kompletującego dzielnik. Lepszym rozwiązaniem dla pomiaru małych napięć będzie umieszczenie drugiego dzielnika napięcia równolegle do dzielnika, w którym znajduje się czujnik. Jeżeli oba dzielniki są zaprojektowane tak, że bez czujnika oba dają takie samo napięcie (stan zrównoważenia), to po zmianie rezystancji w jednym ramieniu mostka, różnica między wyjściami pary dzielników jest sygnałem zależnym tylko od wielkości mierzonej. Taki układ jest nazywany mostkiem Wheatstone’a i cechuje go możliwość zwiększenia czułości pomiarowej w stosunku do wcześniej stosowanego układu [59]. Dodatkowo jest podatny na kompensację, np. wpływu temperatury, i pozwala na redukcję niektórych zakłóceń zewnętrznych. Jest to typowy układ stosowany np. przy pomiarach odkształceń za pomocą czujników tensometrycznych [56].

Dla klasycznego mostka Wheatstone’a, bez dodatkowej szeregowej rezystancji R_{SENSOR} , stan zrównoważenia zachodzi gdy spełniony jest warunek $k=1$:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} = k, \quad (5.7)$$

gdzie $R_1 \div R_4$ to wartości rezystancji w kolejnych ramionach mostka.

Zatem wyznaczając napięcie wyjściowe z mostka otrzymamy:

$$V_{PR1} = V_1 \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) = 0, \quad (5.8)$$

gdzie V_{PR1} to napięcie wyjściowe z układu mostka, a V_1 wartość napięcia zasilania mostka.

Po włączeniu czujnika drabinkowego do układu (rys. 5.37), równanie (5.8) zmieni swoją postać do:

$$V_{PR1} = V_1 \left(\frac{R_{2+SENSOR}}{R_1 + R_{2+SENSOR}} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right), \quad (5.9)$$

gdzie:

$$R_{2+SENSOR} = R_2(1 + x) = R_2 + R_{SENSOR} \quad (5.10)$$

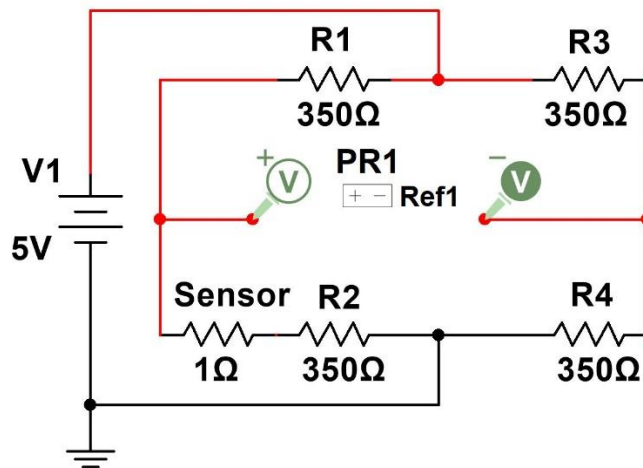
W równaniu (5.10) x jest wartością względną zmiany rezystancji w ramieniu mostka, a $R_{2+SENSOR}$ bieżącą wartością rezystancji. Przy założeniu, że rezystancje mostka spełniają

warunek (5.7) oraz $R_1 = R_4$, po podstawieniu równania (5.10) do (5.9) i wyznaczeniu parametru x otrzymamy:

$$x = 4 \frac{V_{PR1}}{V_1} * \frac{1}{1 - 2 \frac{V_{PR1}}{V_1}} \quad (5.11)$$

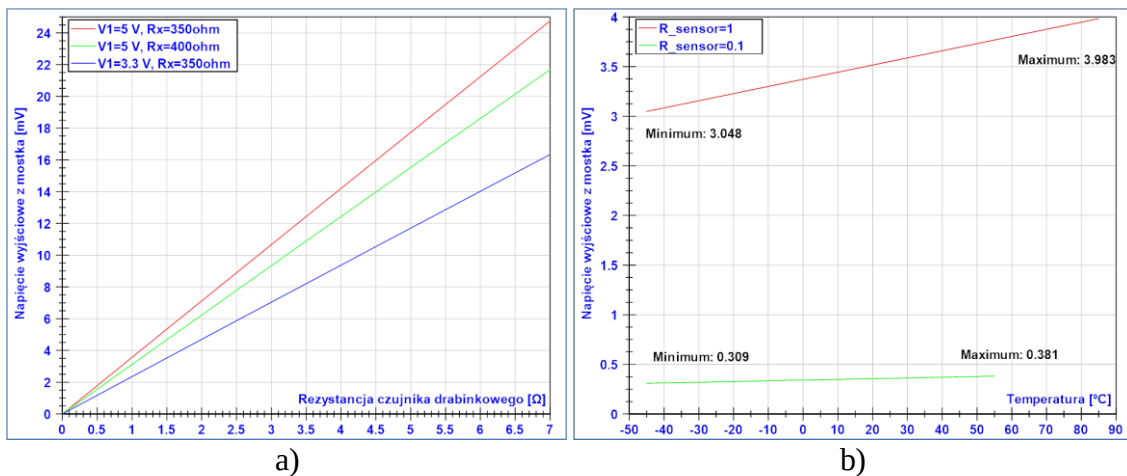
Do wyznaczenia bieżącej wartości rezystancji czujnika drabinkowego R_{SENSOR} , można wykorzystać zależność:

$$R_{SENSOR} = x * R_2 \quad (5.12)$$



Rys. 5.37 Układ mostka Wheatstone'a z włączonym czujnikiem drabinkowych

Przy wykorzystaniu pakietu oprogramowania NI MultiSim, przygotowano model symulacyjny układu mostka Wheatstone'a służący do przeprowadzenia oceny zmian napięcia wyjściowego układu w zależności od rezystancji czujnika drabinkowego. Dodatkowo, na podstawie współczynnika temperaturowego rezystancji (Rys. 5.20), sprawdzono wpływ zmiany temperatury czujnika na sygnał wyjściowy z układu mostka.



Rys. 5.38 Zmiana napięcia wyjściowego mostka Wheatstone'a
a) przy zmianie rezystancji czujnika drabinkowego dla wybranych parametrów układu
b) przy zmianie temperatury otoczenia dla dwóch wartości rezystancji czujnika

Na podstawie przedstawionych symulacji można stwierdzić, że czułość układu mostka na zmianę rezystancji czujnika drabinkowego zależy od parametrów układu, tj. wartości napięcia zasilania mostka oraz rezystorów kompletujących $R_1 \div R_4$. (na rys. 5.38a oznaczonych wspólnie jako R_X). Czułość układu wzrasta wraz z napięciem zasilania układu oraz zmniejszeniem wartości rezystancji elementów kompletujących mostek. Zastosowana w symulacji wartość rezystancji $R_X = 350 \Omega$ w układzie mostka jest typową wartością wykorzystywaną przy pomiarach tensometrycznych, więc czujnik drabinkowy może być wprost zastosowany dla kanałów pomiarowych tego rodzaju.

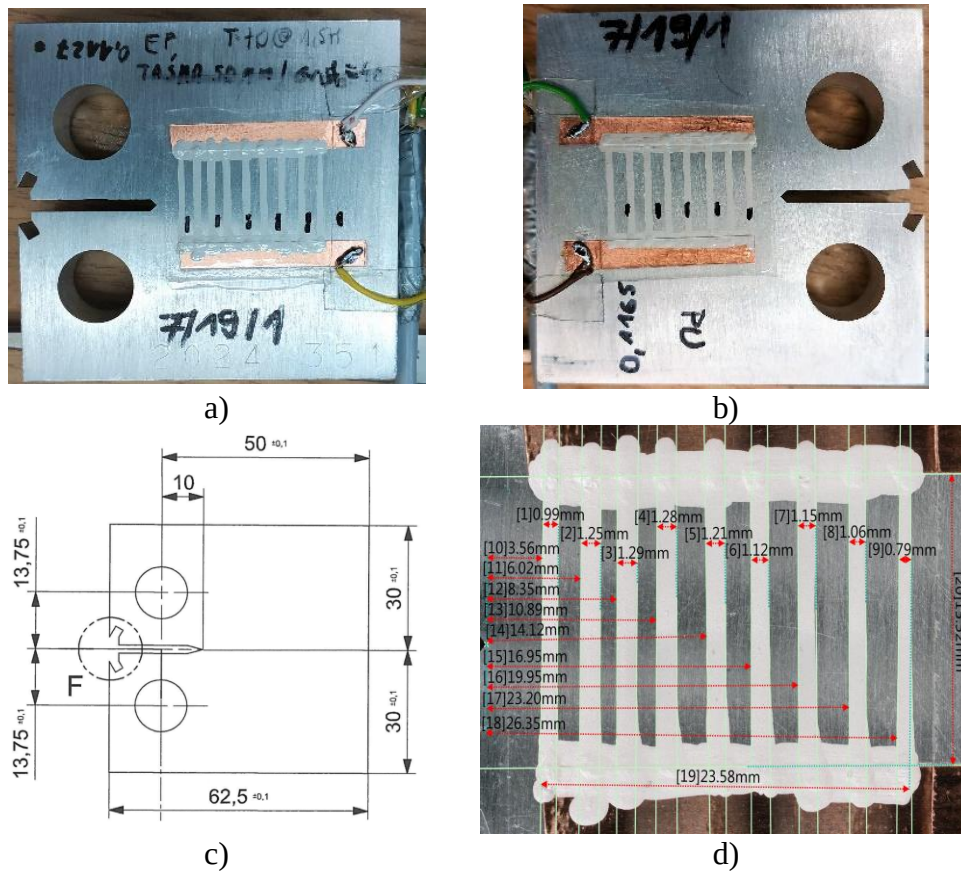
Dodatkowo na rys. 5.38b przedstawiono zmianę napięcia wyjściowego mostka dla znanej wartości rezystancji czujnika drabinkowego. W symulacji wykorzystano współczynnika TWR z wcześniej przeprowadzonych badań (pkt. 5.1.3), zakładając jego liniową ekstrapolację w rozpatrywanym zakresie temperatur. Przyjęto wartość rezystorów kompletujących układ na poziomie $R_X = 350 \Omega$ oraz napięcie zasilania mostka $V_I = 5 \text{ V}$. Zmiana rezystancji czujnika drabinkowego przy wartości nominalnej 1Ω wyniosła 0.075 mV na każde 10°C różnicy temperatury. Przy projektowaniu siatki pomiarowej należy więc zapewnić, by separacja kolejnych stabilnych poziomów dla czujnika była większa niż fluktuacje spowodowane zmianą temperatury otoczenia.

5.2.2. Badania na próbce CT

Mając na względzie wyniki przeprowadzonych badań materiałowych, wprowadzone modyfikacje w układzie pomiarowym oraz technologię wykonania nowych czujników drabinkowych, przeprowadzono ponownie ich badania weryfikacyjne. Jednym z etapów testów było wykorzystanie próbki kompaktowej CT (z ang. Compact Tension), jak na rys. 5.39 wykonanej z aluminium EN AW-2024 T351, która standardowo stosowana jest w badaniach tempa propagacji pęknięcia [76]. Czujniki wykonywano warstwowo bezpośrednio na próbce, jako warstwę izolacyjną stosując żywicę epoksydową po jednej (rys. 5.39a) oraz lakier poliuretanowy po drugiej stronie elementu (rys. 5.39b). Po wykonaniu pierwszych warstw czujnika z użyciem rakli i taśmy maskującej, utwardzono je w piecu grzewczym w temperaturze 70°C przez 90 minut. Uzyskana grubość warstw izolacyjnych to około $40 \mu\text{m}$.

Siatkę pomiarową wykonano z farby elektroprzewodzącej Pelco® 16031 nakładaną przy użyciu rapidografu oraz cienkiej taśmy miedzianej stanowiącej elektrody boczne i punkty lutownicze dla przewodów pomiarowych. Warstwę pomiarową utwardzano

w temperaturze otoczenia przez co najmniej 72 godziny przed nałożeniem warstwy zabezpieczającej w postaci lakieru PU.



Rys. 5.39 Próbkę CT wykorzystana do badań

- a) strona z czujnikiem drabinkowym na warstwie epoksydowej,
 b) strona z czujnikiem drabinkowym na warstwie poliuretanowej,
 c) schemat z wymiarami próbki, d) wymiary siatki pomiarowej dla czujnika EP [76].

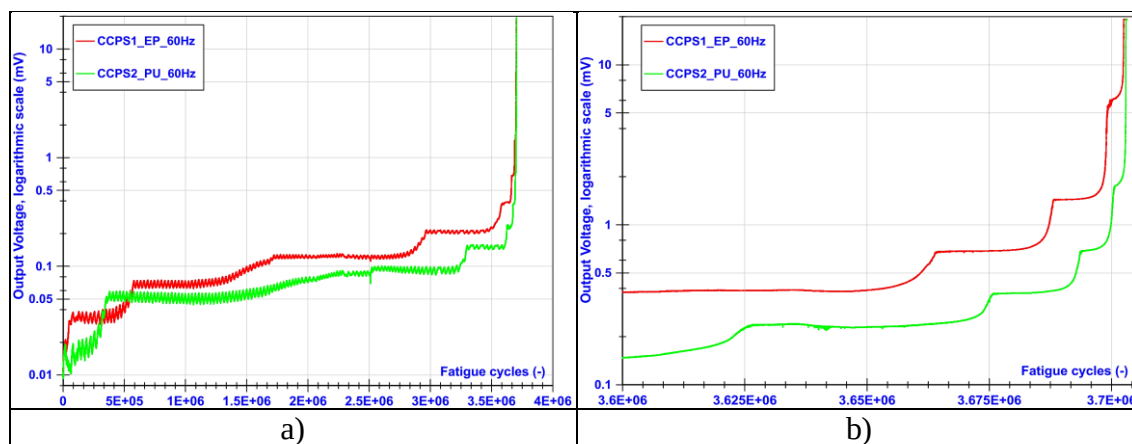
Do określenia wymiarów siatki pomiarowej oraz kontroli jakości wykonanych warstw czujnika wykorzystano mikroskop cyfrowy Keyence VHX-6000 [67]. Czujniki drabinkowe w układzie mostka Wheatstone'a podłączono do kanałów różnicowo-napięciowych modułu pomiarowego V-Link200 firmy Lord MicroStrain® [103]. Dane z czujników próbkowano z częstotliwością 64 Hz, a następnie poddano obróbce z wykorzystaniem trój-punktowego medianowego filtra wygładzającego oraz repróbkowania do częstotliwości 60 Hz w celu lepszej synchronizacji danych z czujników i maszyny zmęczeniowej.

Próbie zmęczeniową przeprowadzono zgodnie z normą ASTM E647-15e1 dotyczącą wyznaczenia tempa propagacji pęknięcia wykorzystując serwohydrauliczną maszynę wytrzymałościową Landmark MTS 370.10. System pomiarowy był wyposażony w czujnik COD (z ang. crack opening displacement), w celu dodatkowego pomiaru długości pęknięcia próbki w oparciu o metodę zgodności.

Test tego typu standardowo podzielony jest na dwie części, w których obciążenie realizowane z częstotliwością $f_s = 30$ Hz przy współczynniku asymetrii cyklu $R = 0.1$ jest dostosowane do spełnienia kolejno następujących warunków:

- stopniowe zmniejszanie współczynnika intensywności naprężeń do wartości minimalnej (ok. 2.5 miliona cykli w bieżącym teście);
- realizacja obciążenia ze stałą amplitudą siły aż do zerwania próbki.

Przebieg napięć mierzonych w układzie pomiarowym dla czujników drabinkowych przedstawiono na rys. 5.40. Ze względu na dużą wartość tempa wzrostu pęknięcia w końcowej fazie testu, dane z ostatnich 100 000 cykli wyodrębniono na rys. 5.40b by uwidocznić działanie czujników drabinkowych w tym obszarze testu. W trakcie jego trwania, nie zaobserwowano nieprawidłowego działania czujników. Można zauważyć wyraźną, pseudo-skokową charakterystykę występującą dla obu czujników z okresami o stabilnych wskazaniach pomiędzy przerywaniem kolejnych ścieżek siatki pomiarowej. Początkowo, zmiana poziomów stabilnych na skutek pęknięcia ścieżki czujnika jest niewielka, lecz różnice te rosną wraz z liczbą przerywanych elementów siatki pomiarowej. Wahania sygnału, obserwowane głównie na początkowym etapie badania, spowodowane są dryfem temperaturowym, a w przypadku czujnika z izolacją PU również nieznacznym pełzaniem materiału warstwy nośnej z uwagi na jej własności lepko-sprężyste.

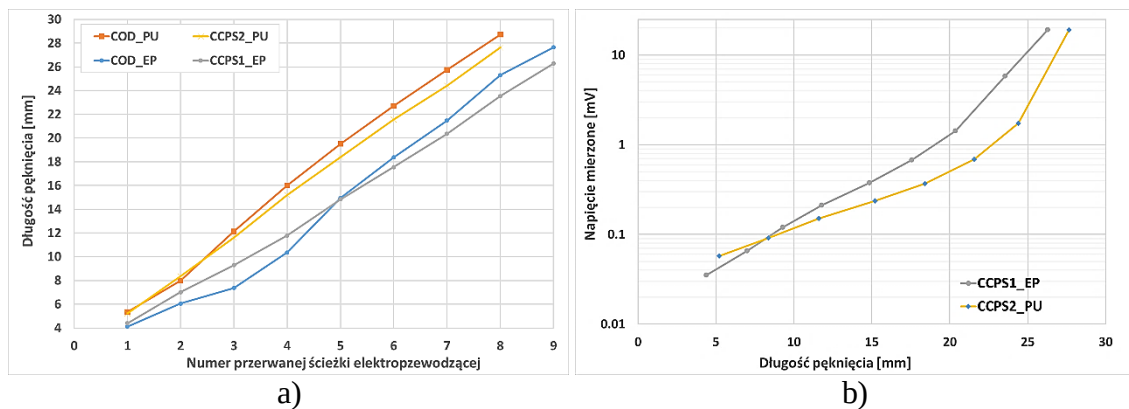


Rys. 5.40 Przebieg napięcia z czujników drabinkowych, w trakcie badania próbki CT, a) dane z całego testu, b) końcowa faza testu.

O prawidłowości działania czujników drabinkowych w trakcie niniejszego testu świadczy też charakter zmian sygnału mierzonego w stanach przejściowych. Powolne narastanie wartości napięcia o trendzie wykładniczym sugeruje, że ścieżka elektroprzewodząca przerywa się stopniowo wraz z powierzchnią próbki, a nie jedynie w kilku cyklach, jak miało to miejsce przy czujnikach fabrycznych.

Przeprowadzone badanie potwierdziło również zasadność wprowadzonej modyfikacji dotyczącej układu akwizycji danych. Pomimo niewielkiej początkowej rezystancji siatek pomiarowych (około 0.1Ω), zależnej m.in. od geometrii przewodnika oraz liczby równoległe połączonych ścieżek, kolejne poziomy napięcia po przerwaniu elementu przewodzącego są dobrze odseparowane i umożliwiają śledzenie propagacji pęknięcia.

Dodatkowo, na rys. 5.41 przedstawiono charakterystyki wyznaczone na podstawie pomiarów geometrii siatek pomiarowych czujników drabinkowych przy wykorzystaniu mikroskopu cyfrowego, wartości napięcia mierzonego z czujników drabinkowych oraz długości pęknięcia wyznaczonego przy zastosowaniu czujnika COD. Za długość pęknięcia z czujnika COD przyjęto wartość odczytaną w chwili ustabilizowania się napięcia z czujnika drabinkowego po stanie przejściowym (całkowitym przerwaniu danej ścieżki).



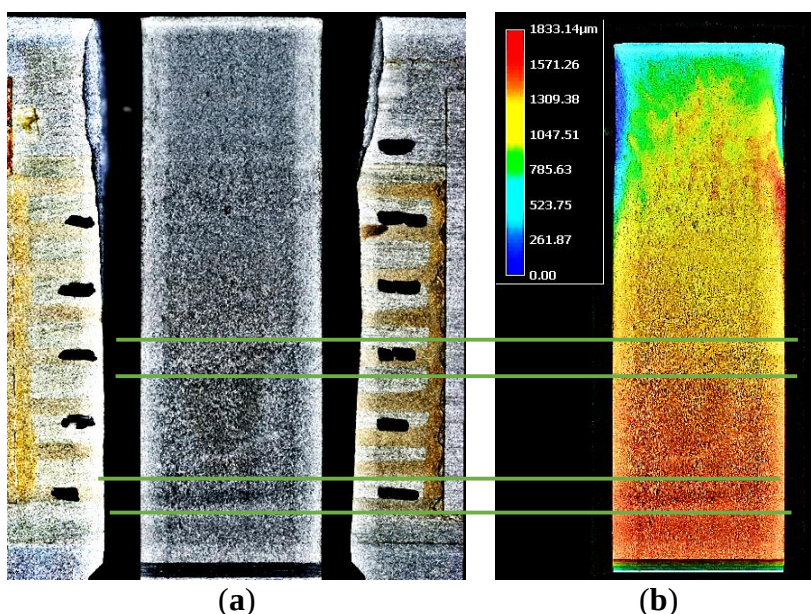
Rys. 5.41 Charakterystyki uzyskane w trakcie badania

- a) porównanie długości pęknięcia zmierzonego przez czujniki drabinkowe i COD
 b) wartość napięcia mierzonego względem długości pęknięcia dla czujników drabinkowych

Na powyższych charakterystykach można zaobserwować nieznaczne różnice we wskazaniach długości pęknięcia z czujników drabinkowych oraz czujników COD. Dla czujnika *CCPS2_PU*, są one pomijalnie małe do czasu przerwania 3 ścieżki siatki pomiarowej, by w dalszej części testu wynieść ok. $1 \div 1.5$ mm. Natomiast dla czujnika *CCPS1_EP*, widoczne są rozbieżności dla pierwszych 4 ścieżek wynoszące odpowiednio 0.27, 0.96, 1.90 oraz 1.42 mm. Następnie już dla kolejnej ścieżki numer 5, różnice te niwelują się.

Zaobserwowane różnice w wyznaczonej długości pęknięcia nie są jednak wynikiem niepoprawnego działania czujników drabinkowych, np. na skutek delaminacji czujnika od powierzchni próbki lub opóźnień w przerywaniu siatki pomiarowej sensorów z uwagi na grubość warstwy izolacyjnej. Przyczyną tego zjawiska jest nierówna propagacja

pęknięcia w badanej próbce względem jej grubości, co ujawniła analiza przełomu po zakończeniu badania (rys. 5.42). W takim przypadku, linia czoła pęknięcia nie jest prostopadła do powierzchni bocznych obiektu badań, co skutkuje niejednakową rzeczywistą długością uszkodzenia po obu stronach próbki. Na rys. 5.42a zaznaczono liniami koloru zielonego obszary, w których front pęknięcia (obraz ciemniejszy) znajduje się wyżej przy prawej krawędzi próbki (od strony czujnika *CCPS1_EP*). Oznacza to, że rzeczywista długość pęknięcia próbki była większa po prawej stronie, a siatka pomiarowa czujnika *CCPS1_EP* przerywała się szybciej. Należy podkreślić, że wskazania długości pęknięcia pochodzące z czujnika COD, oparte są na pomiarze rozwarcia szczeliny uszkodzenia i mają charakter uśredniony względem grubości próbki. Jest to więc prawdopodobna przyczyna rozbieżności wskazań długości pęknięcia, pomiędzy czujnikiem drabinkowych a czujnikiem COD.



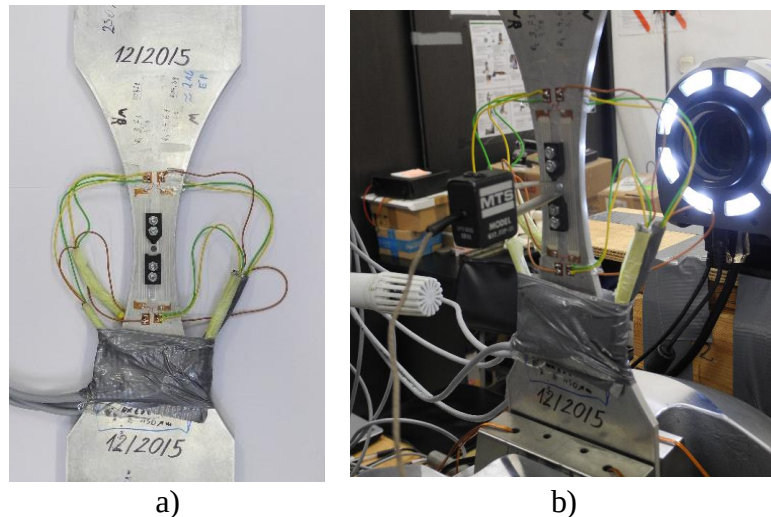
Rys. 5.42 Obraz z mikroskopu próbki po badaniu
a) połączony widok fragmentu czujnika *CCPS2_PU* (z lewej), powierzchni przełomu, oraz czujnika *CCPS1_EP* (z prawej),
b) profil wysokości 3D powierzchni przełomu.

5.2.3. Badania przy rzeczywistym widmie obciążeń eksploatacyjnych

Poprawność działania oraz skuteczność detekcji pęknięcia przez nowe czujniki drabinkowe została również potwierdzona w trakcie badań zmęczeniowych z wykorzystaniem rzeczywistego widma obciążeń eksploatacyjnych. W tym celu wykorzystano próbkę, przygotowaną jako ekwiwalent fragmentu dźwigara samolotu PZL-130 TCII Orlik (rys. 5.43). Poddano ją działaniu sekwencji wymuszeń, które występują w trakcie lotu tego statku powietrznego. W celu zapewnienia możliwie

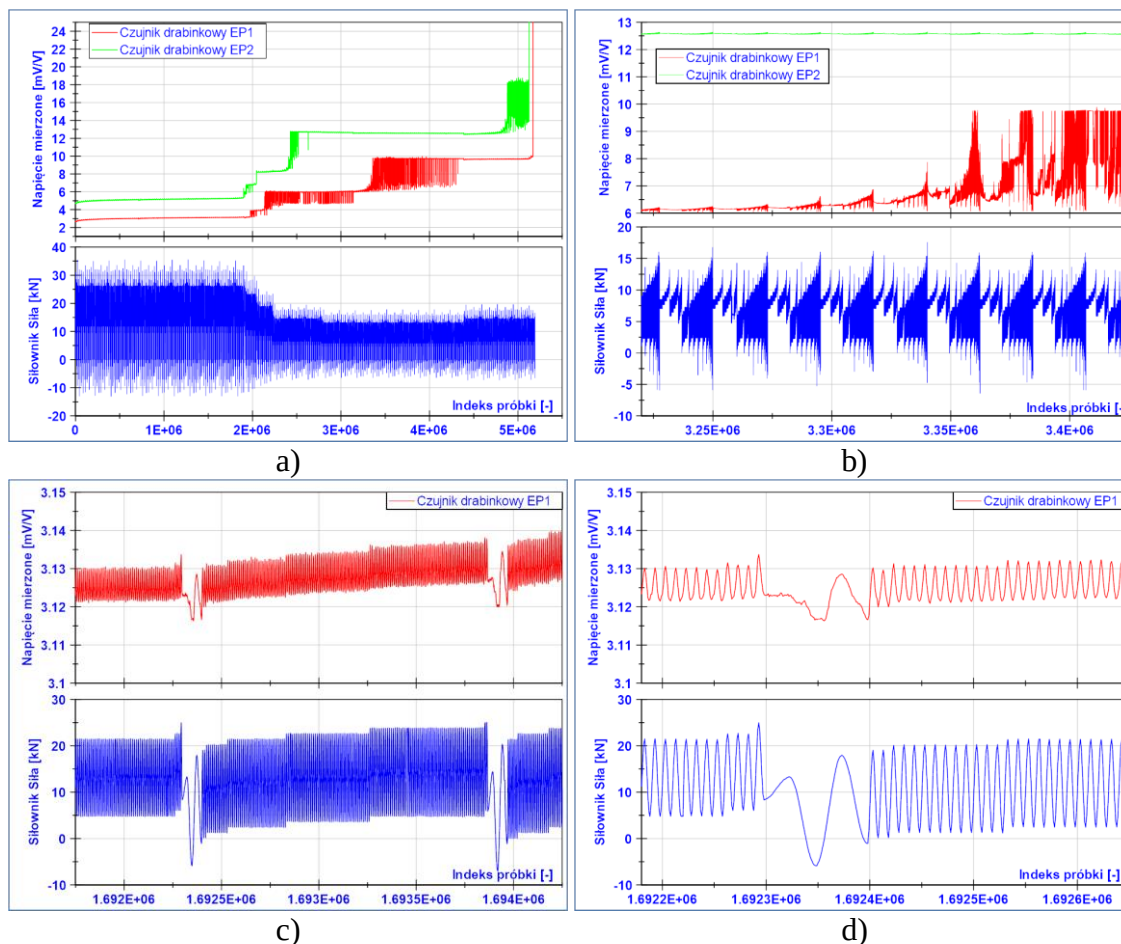
długiej propagacji pęknięcia w sposób zmęczeniowy, widmo bazowe było dostosowywane do bieżącego stanu zaawansowania uszkodzenia. Dostosowanie polegało na przeskalowaniu wartości sił przy zachowaniu jego charakteru. Wyniki badań przedstawiono w funkcji indeksu próbki zamiast np. liczby cykli, z uwagi na niejednorodną częstotliwość wymuszeń realizowanych przez maszynę oraz możliwość zaobserwowania odpowiedzi czujników drabinkowych na dłuższe cykle przeciążenia, występujące w widmie obciążeń.

Na rys. 5.44 przedstawiono dane zmierzone dla dwóch czujników drabinkowych z warstwą izolacyjną EP o grubości ok. 150 μm , utwardzaną w temperaturze pokojowej. Czujniki wykonano warstwowo bezpośrednio na próbce. Siatki pomiarowe czujników EP1 i EP2 składały się odpowiednio z czterech i pięciu ścieżek elektroprowadzących (rys. 5.45).

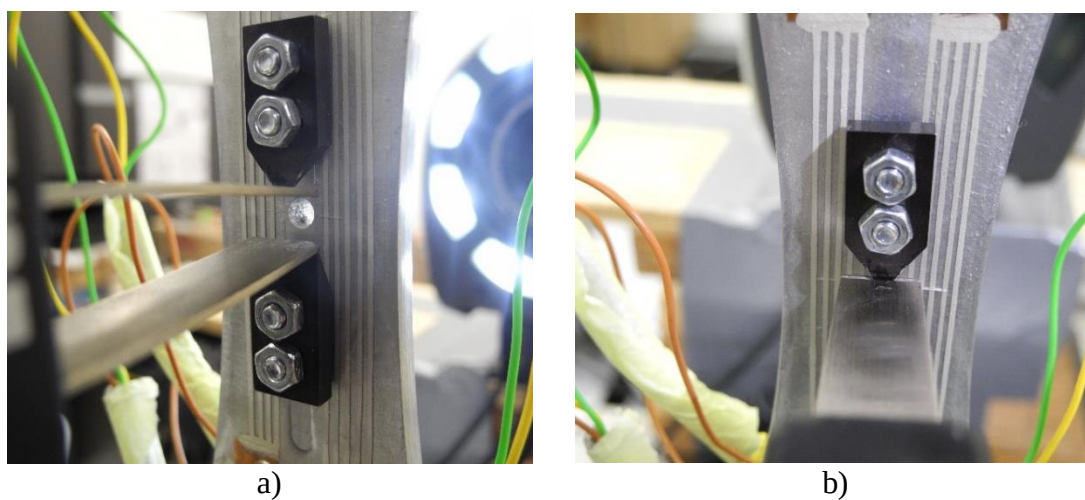


Rys. 5.43 Przykład próbki poddanej badaniu z wykorzystaniem rzeczywistego widma obciążeń eksploatacyjnych
a) przed badaniem b) w trakcie badania na maszynie z widokiem na czujnik drabinkowy

Czujniki drabinkowe również podczas tego eksperymentu badawczego wykazały się poprawnością i stabilnością działania. Siatki pomiarowe przerywały się równo z elementem poddanym zmiennym obciążeniom, na co wskazuje charakter stanów przejściowych w postaci stopniowo wzrastającego napięcia mierzonego (rys. 5.44b). Pomiedzy stanami przejściowymi, wartości sygnałów z czujników utrzymywały się na stabilnym poziomie. Choć na rys. 5.44c-d można zaobserwować fluktuacje napięcia mierzonego dla czujnika drabinkowego pod wpływem zmian obciążenia, to mają one znikomy zakres w porównaniu do amplitudy sił realizowanych przez maszynę zmęczeniową.

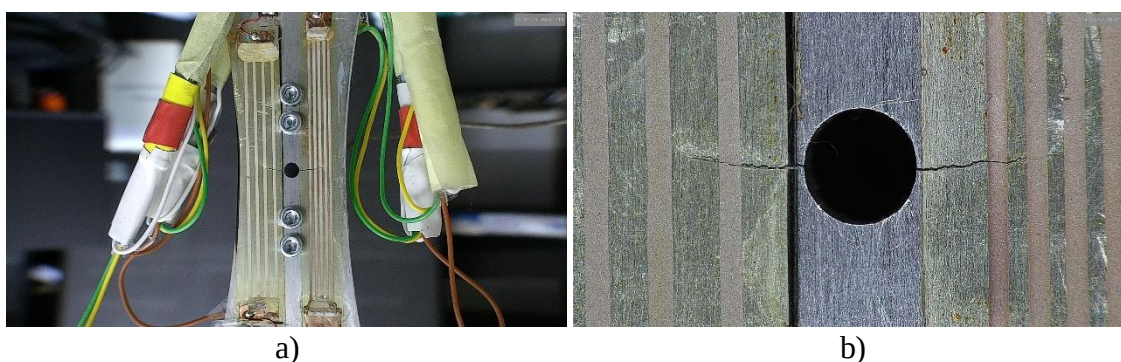


Rys. 5.44 Dane zmierzone w trakcie badania a) przebieg całej próby, b) fragment obrazujący przyrost pęknięcia i charakter zmiany wskazań czujnika drabinkowego , c) fragment obrazujący wskazania czujnika EP1 przy zmianę obciążenia próbki, d) fragment obrazujący wskazania czujnika EP1 przy przeciążeniu;



Rys. 5.45 Widok pęknięcia próbki a) oraz czujnika drabinkowego EP2 b) oraz czujników drabinkowych EP1 i EP2

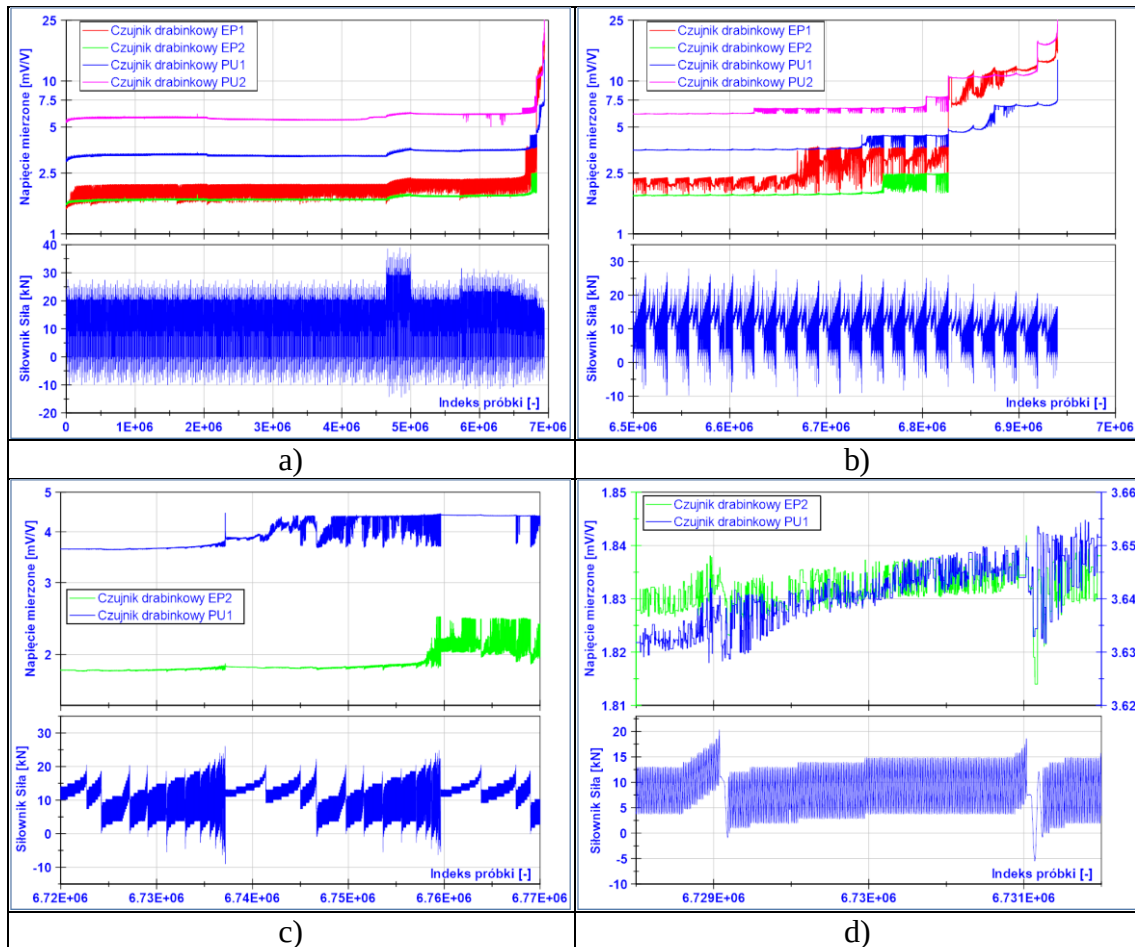
W ramach tej samej serii badań, sprawdzono działanie czujników prefabrykowanych o kształcie dostosowanym do elementu, które następnie przyklejonego do próbki po obu jej stronach. W trakcie niniejszego badania wykorzystano po dwa czujniki, zarówno przygotowane na warstwie izolacyjnej EP jak i PU. Zastosowano widmo o identycznym charakterze jak przedstawiono powyżej, lecz dostosowane pod względem amplitudy cyklicznych wymuszeń, by zapewnić propagację pęknięcia o odpowiednich rozmiarach. Na rys. 5.46 przedstawiono próbkę wykorzystaną w badaniu w trakcie propagacji pęknięcia. Na rys. 5.46b można zaobserwować zgodność zakresu pęknięcia próbki i przerwania czujnika drabinkowego.



Rys. 5.46 Przykład próbki z czujnikami prefabrykowanymi do badań zmęczeniowych z wykorzystaniem rzeczywistego widma obciążeń eksploatacyjnych
a) w trakcie badania na maszynie z widokiem na czujniki drabinkowe,
b) zbliżenie na propagujące pęknięcie próbki i czujników drabinkowych

Na podstawie danych pokazanych na rys. 5.47, nie zaobserwowano rozbieżności w działaniu czujników prefabrykowanych i przyklejonych do próbki, a czujników wykonywanych bezpośrednio na elemencie badanym. Z uwagi na długi okres inicjacji pęknięcia, po którym tempo propagacji uszkodzenia znacząco przyspieszyło, na rys. 5.47b wydzielono fragment końcowej fazy badania, do zerwania próbki. Wartość napięcia mierzonego dla czujników wykazuje się ogólną stabilnością, i znikomymi fluktuacjami pod wpływem sił działających na próbkę (rys. 5.47d). Jedynie czujnik EP1 wykazuje wyższy poziom zmienności wskazań pod wpływem cyklicznych obciążeń, lecz zmiana poziomu sygnału na skutek przerwania ścieżki siatki pomiarowej jest wyraźna.

Charakter zmiany napięcia w trakcie przerywania ścieżki czujnika (stan przejściowy) jest przeważnie wykładniczy. Nieliczne obserwowane zmiany skokowe są skutkiem przeciążeń występujących jako składnik widma realizowanego przez maszynę zmęczeniową (rys. 5.47c, czujnik PU1).



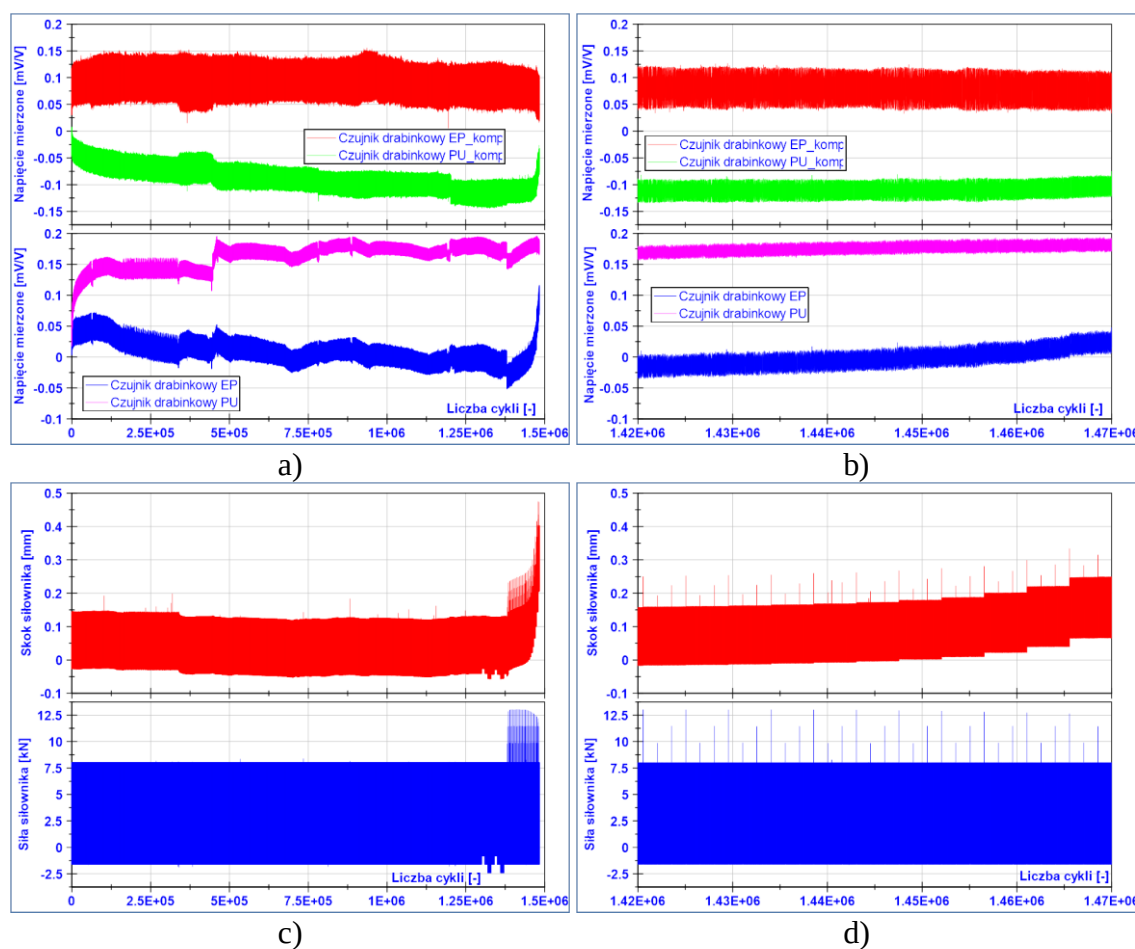
Rys. 5.47 Dane zmierzone w trakcie badania a) przebieg całej próby, b) fragment obrazujący intensywny przyrost pęknięcia w końcowej fazie próby, c) fragment obrazujący przyrost pęknięcia i charakter zmiany wskazań czujników drabinkowych PU1 i EP2, d) fragment obrazujący wskazania czujników PU1 i EP2 przy zmianie obciążenia próbki

Podsumowując, nowe czujniki drabinkowe wykazały się poprawnością działania w trakcie badań zmęczeniowych próbki poddanej oddziaływaniu sił rzeczywiście obciążających element konstrukcji lotniczej. Zarówno czujniki wykonywane warstwowo bezpośrednio na elemencie, jak i prefabrykowane i następnie przyklejone do obiektu badań, wykazały skuteczność w detekcji pęknięcia.

5.2.4. Badania stabilności działania nowych czujników drabinkowych

Czujniki mogące mieć zastosowanie w systemach SHM powinny charakteryzować się nie tylko czułością na obecność pęknięcia, ale również stabilnością wskazań przy braku obecności takiego uszkodzenia elementu konstrukcyjnego. W celu weryfikacji poprawności działania nowych czujników drabinkowych przy braku obecności pęknięcia propagującego w monitorowanej strukturze, przeprowadzono wysokocyklowe badania

całego testu, osobno dla czujników skompensowanych o podwójnej siatce pomiarowej (*EP_komp*, *PU_komp*) i poniżej dla czujników o siatce pojedynczej. Widmo obciążeń realizowanych przez maszynę zmęczeniową w postaci zapisów siły i skoku siłownika zilustrowano na rys. 5.49c. Badanie zakończono na skutek wystąpienia pęknięcia próbki propagującego na granicy jej mocowania do maszyny zmęczeniowej. Objawiło się to stopniowym wzrostem wartości skoku siłownika, widocznej w końcowej fazie zapisu. Dane dla tego fragmentu badania zmierzone z czujników drabinkowych wraz z parametrami obciążenia z maszyny przedstawiono odpowiednio na rys. 5.49b oraz rys. 5.49d.



Rys. 5.49 Dane zmierzone w trakcie badań stabilności czujników drabinkowych

- a) przebieg całego testu ,
- b) fragment końcowej fazy testu przy wzrastającym skoku siłownika
- c) zapis skoku i siły siłownika maszyny zmęczeniowej w trakcie całego testu
- d) zapis skoku i siły siłownika maszyny zmęczeniowej w końcowej fazie testu.

Badanie dowiodło, że pod wpływem cyklicznie występujących sił o względnie znacznej wartości, czujniki drabinkowe działały prawidłowo, a zakres mierzonego napięcia utrzymywał się w wąskim przedziale zmienności. Zrealizowano ponad 1.5 mln cykli zmęczeniowych, w trakcie których nie zaobserwowano znaczących zmian wartości

napięcia dla żadnego z czujników drabinkowych. Dane pod względem statystycznym przedstawia tabela 10.

Tabela 10 Wyniki stabilności wskazań nowych czujników drabinkowych w trakcie testu

	Czujnik drabinkowy			
	PU_komp	PU	EP	EP_komp
Wartość minimalna	-0.1447	0.0179	-0.0517	0.0056
Wartość maksymalna	0.0079	0.1962	0.1164	0.1555
Średnia arytmetyczna	-0.0817	0.1547	0.0125	0.0919
Średnia kwadratowa	0.0840	0.1559	0.0197	0.0934
Mediana	-0.0781	0.1485	0.0131	0.0925
Zakres	0.1526	0.1784	0.1682	0.1498
Odchylenie standardowe	0.0196	0.0187	0.0153	0.0166
Standardowy błąd	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Wariancja	0.0004	0.0004	0.0002	0.0003

Porównanie stabilności wskazań dla czujników skompensowanych i nieskompensowanych dało niejednoznaczne rezultaty. Dla czujników skompensowanych, składających się z dwóch siatek pomiarowych, nie zaobserwowano okresowych fluktuacji lub zmian poziomów napięcia mających skokowy charakter, jak dla czujników nieskompensowanych. Biorąc pod uwagę zakres wspomnianych fluktuacji oraz wyniki badań dotyczących wyznaczenia temperaturowego współczynnika rezystancji, za prawdopodobną przyczynę tych wahań należy uznać zmiany temperatury otoczenia oraz efekt piezorezystywny.

Jednakże, chwilowy zakres zmienności pojawiający się na skutek realizacji cykli obciążeń jest wyższy właśnie dla czujników skompensowanych. Jedną z przyczyn tego zjawiska może być nakładanie się efektu piezorezystywnego pochodzącego z obu siatek pomiarowych, co będzie przedmiotem przyszłych prac związanych z tą metodą detekcji pęknięć.

5.3. Wnioski i spostrzeżenia z przeprowadzonych badań

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki badań zastosowanych materiałów, dedykowanych do budowy autorskiego czujnika drabinkowego przeznaczonego do detekcji i monitorowania pęknięć oraz przeprowadzono weryfikację działania zaproponowanego rozwiązania. Badania materiałowe miały na celu wyjaśnienie zjawisk

zaobserwowanych w trakcie wstępnych badań koncepcji nowego czujnika drabinkowego. W konsekwencji pozwoliło to na wypracowanie zmian w technologii wytwarzania tych czujników i poprawę ich działania, co udowodniono na drodze eksperymentalnej.

Analiza danych na podstawie zrealizowanego, multidyscyplinarnego planu badań materiałowych, pozwoliła na wyciągnięcie następujących wniosków odnośnie przedstawionych materiałów izolacyjnych:

- żywica epoksydowa wykazuje ponad 15-krotnie wyższy moduł Younga i prawie 20-krotnie wyższą wartość naprężenia przy zerwaniu, od lakieru PU,
- grubość lakieru PU wykazuje istotne znaczenie na poziom odkształceń przenoszonych z powierzchni próbki już od 25 μm ,
- lakier PU na tendencję do pękania w trakcie oddziaływania obciążeń mechanicznych, a skala tego zjawiska zależy od częstotliwości wymuszenia,
- żywica epoksydowa charakteryzuje się wysoką stabilnością pracy, wysokim współczynnikiem transferu odkształceń z powierzchni próbki dla grubości warstwy powyżej 100 μm pod wpływem obciążeń mechanicznych,
- wyższą odporność na podwyższoną temperaturę wykazuje żywica epoksydowa, dla której utrata masy w zakresie do 200°C wyniosła około 1 %, a dla lakieru poliuretanowego 3÷4%, zależnie od temperatury utwardzania,
- zastosowana żywica epoksydowa charakteryzuje się również wyższą temperaturą zeszklenia niż lakier PU, co sugeruje większą gęstość usieciowienia struktury materiału, a to prowadzi do zwiększonej odporności materiału np. na czynniki środowiskowe i zmniejszoną chłonność wilgoci,
- badania adhezji żywicy epoksydowej do powierzchni aluminium 7075 za pomocą metody siatki nacięć potwierdziły bardzo dobre własności materiału w tym zakresie, o ile zapewnione będzie należyte przygotowanie powierzchni.

Z kolei, w aspekcie wykorzystanej farby elektroprowadzącej z mikrocząsteczkami srebra, można stwierdzić, że:

- utwardzanie jej w temperaturze pokojowej skutkuje znacznie dłuższym od deklarowanego przez producenta czasem stabilizacji wartości rezystancji dla wykonanej ścieżki, co wpływa na jej obniżenie nawet o 10% w ciągu 12 dni od aplikacji,

- utwardzanie ścieżki w temperaturze podwyższonej prowadzi do szybszej stabilizacji jej rezystancji, oraz znacznego obniżenia wartości tego parametru, która wyniosła około 50 % dla cyklu 125°C/2h,
- czas od aplikacji do ewentualnego dotwardzania w temperaturze podwyższonej nie ma znaczącego wpływu na końcową rezystancję ścieżek elektroprzewodzących, zarówno dla tych pokrytych warstwą izolacyjną, jak i bez niej,
- aby utrzymać stabilną wartość rezystancji ścieżki w temperaturze pokojowej, konieczne jest utwardzanie farby w temperaturze o co najmniej 10°C wyższej niż przewidywana maksymalna temperatura pracy czujników,
- powyższe jest skutkiem wysokiej zawartości związków lotnych, których temperatura wrzenia zaczyna się już od 60°C, co wpływa na utratę masy w granicach 2.2÷3 % w zakresie do 200°C (utrata masy 0.2÷0.33 % w zakresie do 120°C),
- w trakcie badań metodą różnicowej kalorymetrii skaningowej nie zaobserwowano przemian fazowych w zakresie planowanej stosowności czujników drabinkowych,
- temperaturowy współczynnik rezystancji farby zastosowanej w badaniu wynosi $2.02 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$, co jest wartością znacznie niższą dla czystego srebra ($3.80 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$),
- zastosowana farba elektroprzewodząca wykazuje własności piezorezystywne, lecz w zakresie stosowności czujników drabinkowych nie wpływają one na interpretację uzyskanych danych, a fluktuacje na skutek odkształceń nie powinny przekroczyć 2 % ,
- cząstki elektroprzewodzące farby po aplikacji mają postać płasko ułożonych płatków, tworzących zwartą i połączoną powierzchnię, zwłaszcza po jej utwardzaniu w temperaturze podwyższonej.

Przeprowadzona weryfikacja działania autorskich czujników drabinkowych zainstalowanych na próbkach poddanych badaniom zmęczeniowym, wykazała efektywność zaproponowanej metody w detekcji i monitorowaniu pęknięć. Zmiana technologii obróbki materiałów i wytwarzania czujników, oparta o wnioski ze zrealizowanych badań materiałowych, pozwoliła na uzyskanie stabilnych i wiarygodnych wyników, również pod wpływem rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych występujących dla dźwigara samolotu w trakcie lotu.

Czujniki drabinkowe poprawnie reagowały na przyrost długości pęknięcia. Zmiana wartości mierzonego napięcia z układu pomiarowego wykazywała charakter wykładniczy w stanie przejściowym, gdy ścieżka siatki pomiarowej stopniowo przerywała się wraz z elementem. Natomiast gdy wierzchołem pęknięcia znajdował się pomiędzy kolejnymi fragmentami warstwy czulej czujnika, wartość napięcia utrzymywała się na stabilnym poziomie.

Badanie wysokocyklowe bez propagacji pęknięcia, umożliwiło sprawdzenie działania czujników pod wpływem długotrwałego oddziaływania zmiennych obciążeń mechanicznych. Nie zaobserwowano zmian wartości mierzonych napięć dla poszczególnych czujników, które wskazywałyby na degradację siatek pomiarowych i mogłyby być źródłem fałszywie pozytywnych alarmów z systemu monitorowania. Dodatkowo, w ramach tego badania sprawdzono również działanie czujników drabinkowych w układzie skompensowanym, analogicznym do pomiarów tensometrycznych w układzie pół-mostka. Wyniki pomiarów wykazały, że chwilowy zakres zmienności sygnału z tych czujników był wyższy, niż dla układu z pojedynczą siatką pomiarową. Jednak zauważono potencjał w ograniczeniu fluktuacji mierzonego sygnału spowodowanego zmianami temperatury otoczenia dla układu podwójnego.

WNIOSKI KOŃCOWE

Celem rozprawy doktorskiej było opracowanie efektywnej metody do lokalnej detekcji i kwantyfikacji długości pęknięć elementów struktury statku powietrznego, przy użyciu zintegrowanej sieci rezystancyjnych czujników drabinkowych. Został on osiągnięty na podstawie zrealizowanego, wieloetapowego programu badań eksperymentalnych działania komercyjnie dostępnych czujników tego typu oraz zaproponowanych w rozprawie nowych czujników, wykonanych w technologii elektroniki elastycznej.

Podczas pierwszego etapu, zaprojektowano układ pomiarowy do współpracy z komercyjnie dostępnymi czujnikami drabinkowymi oraz zrealizowano szereg badań zmęczeniowych: na próbkach o nieskomplikowanych kształcie, na lotniczym elemencie konstrukcyjnym oraz w trakcie realizacji pełnoskalowej próby zmęczeniowej samolotu PZL 130 TCII Orlik. Metoda wykazała się skutecznością w detekcji i monitorowaniu długości pęknięcia oraz poprawnością i stabilnością działania. Potwierdzono, że zgodnie ze swoimi ograniczeniami, może być wykorzystana jako element systemu monitorowania stanu technicznego. Główne zaobserwowane ograniczenia dotyczą między innymi czułości czujników komercyjnych na propagację pęknięcia w z góry określonym kierunku, relatywnie wysokiego poziomu odkształceń progowych do przerywania ścieżki siatki elektroprzewodzącej oraz zdefiniowanego kształtu siatki pomiarowej. Zwłaszcza to ostatnie, często uniemożliwiało wykorzystanie czujników komercyjnych w trakcie badań na rzeczywistych elementach konstrukcyjnych statków powietrznych.

Opracowanie i weryfikacja nowych czujników drabinkowych pozwoliła na zwiększenie podatności użytkowej i eksploatacyjnej tej metody detekcji i monitorowania propagacji pęknięć, w porównaniu do czujników komercyjnych. Wykonanie warstwy czulej czujnika przy użyciu farby elektroprzewodzącej, już na wstępnym etapie weryfikacji zaproponowanej koncepcji, umożliwiło adaptację kształtu siatki pomiarowej do skutecznego monitorowania pęknięć w konkretnej lokalizacji na strukturze, uwzględniając obecność naturalnie występujących elementów konstrukcyjnych, takich jak nity i otwory. Realizacja krótko- i długotrwałych wstępnych weryfikacyjnych badań zmęczeniowych, potwierdziła poprawność działania nowych czujników. Jednocześnie ujawniły się zjawiska, mogące mieć potencjalnie negatywny wpływ na przyszłe działanie tej metody w warunkach operacyjnych.

Na podstawie analiz i wniosków, opracowano i zrealizowano multidyscyplinarny program badań materiałowych, ukierunkowany na zrozumienie zjawisk zaobserwowanych w trakcie badań wstępnych oraz zmierzający do poprawy działania autorskich czujników drabinkowych. W konsekwencji, wprowadzono poprawki w technologii obróbki zastosowanych materiałów i wytwarzania czujnika, między innymi określono ograniczenia dotyczące maksymalnej grubości warstwy izolacyjnej oraz skalę wpływu temperatury utwardzania farby elektroprzewodzącej na stabilność i wartość nominalną rezystancji siatki pomiarowej. Wyniki badań wskazały również jednoznacznie, że z pośród przebadanych materiałów izolacyjnych, preferowane jest zastosowanie żywicy epoksydowej, z uwagi na jej stabilną i przewidywalną pracę w warunkach oddziaływania obciążeń mechanicznych i zmiennej temperatury otoczenia w planowanym zakresie użytkowania czujników drabinkowych.

W ostatniej części pracy przedstawiono wyniki zmęczeniowych badań eksperymentalnych, ostatecznie potwierdzających skuteczność działania nowych czujników drabinkowych przeznaczonych do detekcji i monitorowania pęknięć. Plan badań obejmował między innymi zastosowanie rzeczywistego widma obciążeń eksploatacyjnych oraz wysokocyklowe badania stabilności działania czujników bez propagacji pęknięcia. Na ich podstawie potwierdzono czułość autorskich czujników drabinkowych na propagację pęknięcia, a otrzymane charakterystyki zmian napięcia mierzonego przez układ pomiarowy były stabilne i odpowiadały bieżącemu rozmiarowi uszkodzenia.

Tym samym, udowodniono tezę naukową oraz osiągnięto założony cel postawiony w ramach rozprawy doktorskiej, ponieważ:

- **eksperymentalnie potwierdzono, że czujniki drabinkowe są efektywną metodą do detekcji i kwantyfikacji długości pęknięć,**
- czujniki wykazały się poprawnością działania w trakcie badań laboratoryjnych oraz długotrwałych, pod wpływem rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych konstrukcji lotniczej,
- nowe czujniki wykonane przy użyciu farby elektroprzewodzącej oraz plastycznych materiałów izolacyjnych pozwalają na **dostosowanie kształtu siatki pomiarowej** do konkretnej lokalizacji na konstrukcji, co zwiększa podatność użytkową tej metody monitorowania pęknięć,

- wystarczającym wskaźnikiem do określenia rozmiarów pęknięcia przy wykorzystaniu przedstawionej metody jest powiązanie geometrii siatki pomiarowej oraz z charakterystyką zmian rezystancji czujnika na skutek przerwania kolejnych ścieżek elektroprzewodzących.

Zgodnie z treścią rozprawy, zastosowanie czujników drabinkowych jest dedykowane do monitorowania stanu technicznego elementów konstrukcji statku powietrznego, lecz nie wyklucza to możliwości ich użycia w innych obszarach.

ELEMENTY ORYGINALNE PRACY

W rozprawie zaprezentowano koncepcję, opracowanie i wykonanie autorskich czujników drabinkowych z wykorzystaniem farby elektroprzewodzącej oraz plastycznych materiałów izolacyjnych. Przy użyciu tych czujników, możliwa jest zarówno detekcja, jak i kwantyfikacja długości pęknięcia propagującego w monitorowanej konstrukcji. Kształt czujnika może być dostosowany do lokalizacji na strukturze, a wyznaczenie rozmiaru uszkodzenia powiązane jest z geometrią siatki pomiarowej i jednokrotnie określonymi własnościami rezystancyjnymi materiału. Eliminuje to konieczność realizacji dodatkowych testów, po każdorazowym wprowadzeniu zmiany kształtu czujnika drabinkowego. Zgodnie z treścią rozdziału 1 niniejszej pracy, dotychczas opublikowane prace bazujące na zbliżonej zasadzie działania odnośnie detekcji pęknięcia, pozwalały albo na uzyskanie informacji dwu-stanowej (obecność lub brak pęknięcia) bez śledzenia przyrostu uszkodzenia, lub wykorzystywały siatki pomiarowe o odmiennych cechach, dla których określenie rozmiarów pęknięcia jest oparte o równania empiryczne, dedykowane do konkretnej geometrii czujnika.

Za oryginalny element rozprawy uznaje się również opracowanie i realizację multidyscyplinarnego programu badań materiałowych, który był ukierunkowany na wyjaśnienie zjawisk mogących mieć potencjalnie negatywny wpływ na poprawność działania nowych czujników. Scharakteryzowano zastosowane materiały między innymi pod kątem ich własności mechanicznych, elektrycznych, adhezyjnych oraz cieplno-fizycznych, i na podstawie tej zbiorczej informacji określono ostateczne ograniczenia konstrukcyjne i technologię wytwarzania czujników.

Dodatkowo, zaplanowano i przeprowadzono wieloczęściowy program badań eksperymentalnych, w trakcie których potwierdzono skuteczność działania opracowanych czujników drabinkowych, o polepszonych własnościach użytkowych

względem komercyjnych odpowiedników. Zakres większości dostępnych prac i wyników badań nad metodami i sposobami detekcji uszkodzeń zgodnych z koncepcją SHM, jest ograniczona do krótkookresowych badań laboratoryjnych na próbkach o nieskomplikowanym kształcie. Jak zaprezentowano w niniejszej rozprawie, badania wykonane na elementach konstrukcyjnych, długookresowa weryfikacja działania czujników, lub testy w warunkach zbliżonych do rzeczywistych pod kątem oddziaływania obciążeń mechanicznych, pozwoliły na zaobserwowanie dodatkowych zjawisk i cech użytkowych.

KIERUNKI DALSZYCH PRAC

1. Badania możliwości wykorzystania autorskich czujników drabinkowych w ramach alternatywnych konfiguracji siatki pomiarowej i układów pomiarowych.
2. Opracowanie modeli numerycznych czujników.
3. Badania nad algorytmami do zautomatyzowanej analizy danych, między innymi z wykorzystaniem modeli parametrycznych.
4. Podniesienie gotowości technologicznej metody przez opracowanie kompletnego systemu detekcji i monitorowania pęknięć, do poziomu umożliwiającego zastosowanie autorskich czujników w warunkach operacyjnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Adams F.D., Engle R.M., *A Damage Tolerance Approach for Structural Integrity of Aerospace Vehicles*, Problems in Service Life Prediction of Building and Construction Materials, NATO ASI Series, vol 95, pp 93–109, Springer, Dordrecht, 1985.
- [2] Aggelis D. G., Sause M. R. G., Packo P., Pullin R., Grigg S., Kekc T., Lai Y.-K., *Acoustic Emission, Structural Health Monitoring Damage Detection Systems for Aerospace*, pp 175–217, Springer Aerospace Technology, 2021.
- [3] Ahmed S., Schumacher T., Thostenson E. T., McConnell J., *Performance Evaluation of a Carbon Nanotube Sensor for Fatigue Crack Monitoring of Metal Structures*, Sensors, 20(16), 4383, 2020.
- [4] Ahmed S., Thostenson E. T., Schumacher T., Doshi S. M., McConnell J. R., *Integration of carbon nanotube sensing skins and carbon fiber composites for monitoring and structural repair of fatigue cracked metal structures*, Composite Structures, Vol. 203, pp. 182-192, 2018.
- [5] Ahn B. Y., Duoss E. B., Motala M. J., Guo X., Park S. I., Xiong Y., Yoon J., Nuzzo R. G., Rogers J. A., Lewis J. A., *Omnidirectional printing of flexible, stretchable, and spanning silver microelectrodes*. Science 323(5921): 1590–1593, 2009;
- [6] Alokita, S., Rahul, V., K, J., Kar, V., S, T., Manikandan, M. & M, R., *Recent advances and trends in structural health monitoring*, Structural Health Monitoring of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites, Woodhead Publishing, pp 53-73, Cambridge, 2019.
- [7] Ashrafi B., Johnson L., Martinez-Rubi Y., Martinez M., Mrad N., *Single-walled carbon nanotube–modified epoxy thin films for continuous crack monitoring of metallic structures*, Structural Health Monitoring, 11(5):589-601, 2012.
- [8] Australijskie Biuro Bezpieczeństwa Transportu, <https://www.atsb.gov.au/media/news-items/2019/cessna-210-carry-through-spar-failure/>, dostępna 06.2022.
- [9] Balint R., Cassidy N. J., Cartmell S. H., *Conductive polymers: Towards a smart biomaterial for tissue engineering*, Acta Biomateriala 10, pp. 2341–2353, 2014.
- [10] Baragetti S., *Different Methods to Detect Fatigue Crack Nucleation and Growth Rate*, Material Science Research India, Vol. 16(2), pp. 103-109, 2019.

- [11] Beard S., Kumar A., Qing X.P., Chan H., Zhang C., Ooi T.K., *Practical issues in real-world implementation of structural health monitoring systems*, SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, pp. 196-203, 2005.
- [12] Boeing, <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook/>, dostępna 06.2022.
- [13] Boller, C., Chang, F.-K., and Fujino, Y. *Encyclopedia of structural health monitoring*, John Wiley, 2009.
- [14] Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J., *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2000.
- [15] Busek D., Mach P., *Electrical connection network within an electrically conductive adhesive*, 31st International Spring Seminar on Electronics Technology, pp. 184-188, 2008.
- [16] Cantero-Chinchilla S., Aranguren G.; Royo J.M., Chiachío M., Etxaniz J., Calvo-Echenique A., *Structural Health Monitoring Using Ultrasonic Guided-Waves and the Degree of Health Index*, Sensors, 21, 993, 2021.
- [17] Chen H., Lu B. W., Lin Y., Feng X., *Interfacial failure in flexible electronic devices*, IEEE Electron Device Lett 35(1): 132–134, 2014;
- [18] Cherrier O., Selva P., Pommier-Budinger V., Lachaud F., Morlier J., *Damage localization map using electromechanical impedance spectrums and inverse distance weighting interpolation: Experimental validation on thin composite structures*, Structural Health Monitoring 12(4), pp. 311–324, 2013.
- [19] Chiang H.-W., Chung Ch.-L., Chen L.-C., Li Y., Wong C. P., Fu S.-L., *Processing and shape effects on silver paste electrically conductive adhesives (ECAs)*, Journal of Adhesion Science and Technology, 19:7, 565-578, 2005.
- [20] Chiu, W. K., Koh, Y., Galea, S., and Rajic, N. *Smart structure application in bonded repairs*, Composite structures 50, 4, pp. 433–444, 2000.
- [21] Chung D. D. L., *Damage detection using self-sensing concepts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 221(4):509-520, 2007.
- [22] Congressional Research Service Report, *C-130 Hercules: Background, Sustainment, Modernization, Issues for Congress*, <https://www.everycrsreport.com/reports/R43618.html>, dostępne 06.2022.

- [23] Czub P., Bończa-Tomaszewski Z., Penczek P., Pielichowski J., *Chemia i technologia żywic epoksydowych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2002.
- [24] Derewońko A., Niezgoda T., Godzimirski J., *3D Numerical investigation of tensile loaded lap bonded joint of aircraft structure*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 13, No. 3, 2006.
- [25] Dolbeer R. A., Begier M. J., Miller P. R., Weller J. R., Anderson A. L., *Wildlife strikes to civil aircraft in the United States 1990–2018*, US Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Office of Airport Safety and Standards, serial report. Washington, DC, p 25, 2019.
- [26] Dragan K., Dziendzikowski M., Klimaszewski S., Klysz S., Kurnyta A., *Energy correlated damage indices in fatigue crack extent quantification*, Key Engineering Materials 569, pp. 1186–1193, 2013.
- [27] Druet T., Chapuis B., Jules M., Laffont G., Moulin E., *Passive guided waves measurements using fiber Bragg gratings sensors*, The Journal of the Acoustical Society of America 144:1198, 2018.
- [28] Dydek, K., Boczkowska, A., Latko-Durałek, P., Wilk, M., Padykuła, K., Kozera, R. *Effect of the areal weight of CNT-doped veils on CFRP electrical properties*, Journal of Composite Materials, 54(20), 2677–2685, 2020).
- [29] Dziendzikowski M. *Ocena rozmiaru pęknięć struktur statków powietrznych z wykorzystaniem aktywnej sieci czujników piezoelektrycznych*, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 2015.
- [30] Dziendzikowski M., Dragan K., Katunin A., *Localizing impact damage of composite structures with modified RAPID algorithm and non-circular PZT arrays*, Archives of Civil and Mechanical Engineering 17 (1), pp. 178-187, 2017.
- [31] Dziendzikowski M., Kurnyta A., Dragan K., Klysz S., Leski A.: *In situ Barely Visible Im-pact Damage detection and localization for composite structures using surface mounted and embedded PZT transducers: A comparative study*, Mechanical Systems and Signal Processing, 78, pp. 91-106, 2016.
- [32] EASA, <https://www.easa.europa.eu/domains/urban-air-mobility-uam#group-easa-downloads>, dostępna 06.2022.
- [33] Ezhilarasu C. M., Skaf Z., Jennions I. K., *The application of reasoning to aerospace Integrated Vehicle Health Management (IVHM): Challenges and opportunities*, Progress in Aerospace Sciences, Volume 105, Pages 60-73, 2019.

- [34] Farrar C. R., Worden K., *An introduction to structural health monitoring*, Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences 365, 1851, pp.303–315, 2007.
- [35] Gallagher J.P., Gieseler F.J., Berens A.P., Engle R.M., *USAF Damage Tolerant Design Handbook: Guidelines for the Analysis and Design of Damage Tolerant Aircraft Structures*, AFWAL-TR-82-3073, 1984.
- [36] Gallo G. J., Thostenson E. T., *Electrical characterization and modeling of carbon nanotube and carbon fiber self-sensing composites for enhanced sensing of microcracks*, Materials Today Communications, Volume 3, p. 17-26, 2015.
- [37] Gao H., *Guided wave tomography on an aircraft wing with leave in place sensors*, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP, pp. 1788-1794, 2005.
- [38] Giraldo C. M., Sagredo J. Z., Gómez J. S., Corredera P., *Demonstration and methodology of structural monitoring of stringer runs out composite areas by embedded optical fiber sensors and connectors integrated during production in a composite plant*, Sensors 17(7), 1683, 2017.
- [39] Giurgiutiu V., Cuc A., *Embedded Non-destructive Evaluation for Structural Health Monitoring, Damage Detection, and Failure Prevention*, The Shock and Vibration Digest, Vol. 37, No. 2, pp. 83–105, 2005.
- [40] Giurgiutiu V., *Impact and Acoustic Emission Monitoring for Aerospace Composites SHM*, Structural Health Monitoring of Aerospace Composites, pp. 317-394, Academic Press, 2016.
- [41] Giurgiutiu V., *Structural health monitoring: with piezoelectric wafer active sensors - 2nd ed.*, Academic Press, 2014.
- [42] Global Security, *B-52 Stratofortress Service Life*, <https://www.globalsecurity.org/wmd/systems/b-52-life.htm>, dostępne 06.2022.
- [43] Glushko O., Cordill M., *Electrical Resistance Decrease Due to Grain Coarsening Under Cyclic Deformation*, The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), 66: p. 598-601, 2014.
- [44] Glushko O., Klug A., List-Kratochvil E. J. W., Cordill M. J., *Relationship between mechanical damage and electrical degradation in polymer-supported metal films subjected to cyclic loading*, Materials Science & Engineering A, 662: p. 157-161, 2016.

- [45] Godzimirski J., Tkaczuk S., *Modelowanie spoin klejowych w obliczeniach MES*, Biuletyn WAT, Vol. LIX, Nr 4, 2010.
- [46] Godzimirski J., *Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [47] GPMS Inc., <https://www.gpms-vt.com/foresight-mx/>, dostępne 06.2022.
- [48] Grandt, A., *Fundamentals of structural integrity: damage tolerant design and nondestructive evaluation*, Wiley-Interscience, 2004.
- [49] Greer J. R., Street R. A. *Mechanical characterization of solution-derived nanoparticle silver ink thin films*, Journal of Applied Physics, 101(10), 2007.
- [50] Gresil M., Yu L., Giurgiutiu V., Sutton M., *Predictive modelling of electromechanical impedance spectroscopy for composite materials*, Structural Health Monitoring 11(6), pp. 671–683, 2012.
- [51] Griffiths D., *Introduction to Electrodynamics (3rd ed.)*, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall. p. 286., 1999.
- [52] Halliday D., *Podstawy fizyki*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, s. 137–139, 2009.
- [53] Halonen E., Halme A., Karinsalo T., Iso-Ketola P., Mäntysalo M., Mäkinen R., *Dynamic bending test analysis of inkjet-printed conductors on flexible substrates*, 2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference, 2012, pp. 80-85, 2012.
- [54] Happonen T., Häkkinen J., Fabritius T., *Cyclic bending reliability of silk screen printed silver traces on plastic and paper substrates*, IEEE Transactions on Device and Materials Reliability 15(3): 394–401, 2015.
- [55] Heywang W., Lubitz K., Wersing W., *Piezoelectricity: evolution and future of a technology*, Springer Series in Materials Science, vol. 114. Springer, 2008.
- [56] Hoffmann K., *An Introduction to measurement using strain gages*, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1987.
- [57] Holford K. M., Pullin R., Evans S. L., Eaton M. J., Hensman J., Worden K., *Acoustic emission for monitoring aircraft structures*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering 223, 5, pp. 525–532, 2009.
- [58] Hon K. K. B., Li L., Hutchings I. M., *Direct writing technology—Advances and developments*, CIRP Annals, Volume 57, Issue 2, 2008, Pages 601-620, 2008.

- [59] Horowitz P., Hill W., *Sztuka elektroniki cz. 1*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2018.
- [60] Hou B., He Y., Cui R., Gao C., Zhang T., *Crack monitoring method based on Cu coating sensor and electrical potential technique for metal structure*, Chinese Journal of Aeronautics, Volume 28(3), pp. 932-938, 2015.
- [61] IATA, <https://www.iata.org/en/publications/annual-review/> dostępna 06.2022.
- [62] Janeczek K., Jakubowska M., Kozioł G., Młozniak A., Araźna A., *Investigation of ultra-high-frequency antennas printed with polymer pastes on flexible substrates*, IET Microwaves, Antennas and Propagation 6(5): 549–554, 2012.
- [63] Kachold F., Kozera R., Singer R., Boczkowska A., *Mechanical properties, surface structure and morphology of carbon fibers pre-heated for liquid aluminum infiltration*. Journal of Materials Engineering and Performance 25 1502, 2016.
- [64] Kamyshny A., Steinke J., Magdassi S., *Metal-based Inkjet Inks for Printed Electronics*, The Open Applied Physics Journal, 4: 19-36, 2011.
- [65] Kang B. J., Lee C. K., Oh J. H., *All-inkjet-printed electrical components and circuit fabrication on a plastic substrate*, Microelectronic Engineering, Volume 97, pp. 251-254, 2012.
- [66] Keulen C.J., Rocha B., Yildiz M., Suleman A., *Structural Health Monitoring Using Lamb Wave Based Piezoelectric Networks and Phased Array Solutions*, NATO STO Educational Notes, EN-AVT-220 „Structural Health Monitoring of Military Vehicles”, 2014.
- [67] Keyence International, <https://www.keyence.eu/plpl/landing/lpc/kameramikroskop.jsp>, dostępne 06.2022.
- [68] Kharroub S., Laflamme S., Song C., Qiao D., Phares B., Li J., *Smart sensing skin for detection and localization of fatigue cracks*, Smart Materials and Structures, Volume 24, Number 6, 2015.
- [69] Kim, B.-J., Shin, H.-A.-S., Lee, J.-H., Joo, Y.-C., *Effect of cyclic outer and inner bending on the fatigue behavior of a multi-layer metal film on a polymer substrate*, Japanese Journal of Applied Physics, 55(6S3), 06JF01, 2016.
- [70] Kinet D., Mégret P., Goossen K. W., Qiu L., Heider D., Caucheteur C., *Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions*, Sensors 14:7394–7419, 2014.
- [71] Kłysz S., *Podstawy mechaniki pęknięcia i wytrzymałości zmęczeniowej materiałów*, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa, 2015.

- [72] Koli, <https://www.koli.com.pl/badania-magnetyczno-proszkowe-mt-jedna-z-najpopularniejszych-metod-ndt,174,pl.html>, dostępne 06.2022.
- [73] Komorowski J., *Review of Canadian Aeronautical Fatigue Work 2007-2009*, https://www.icafeero/ajax/showPDF.php?filename=ICAF_2009_National_Review_Canada.pdf&pad=docs/National_reviews/&year=2009, dostępne 06.2022.
- [74] Kotowsky, M. P., Dowding, C. H., Fuller, J. K., *Wireless sensor networks to monitor crack growth on bridges*, Proceedings, Developing a Research Agenda for Transportation Infrastructure Preservation and Renewal Conference, Washington, DC, 2009.
- [75] Kottkamp E. Wilhelm H., Kohl D., *AGARD Flight Test Instrumentation Series. Volume 7. Strain Gauge Measurements on Aircraft*, Advisory Group for Aerospace Research and Development, Neuilly-Sur-Seine, Francja, 1976.
- [76] Kurnyta A., Baran M., Kurnyta-Mazurek P., Kowalczyk K., Dziendzikowski M., Dragan K., *The Experimental Verification of Direct-Write Silver Conductive Grid and ARIMA Time Series Analysis for Crack Propagation*, *Sensors*, 21(20):6916, 2021.
- [77] Kurnyta A., Dziendzikowski M., Dragan K., Kłysz S., *Monitorowanie rozwoju uszkodzeń w elementach konstrukcji lotniczych*, Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej, 10/4, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, 2016.
- [78] Kurnyta A., Dziendzikowski M., Dragan K., Leski A., *Approach to Health Monitoring of an Aircraft Structure with Resistive Ladder Sensors During Full Scale Fatigue Test*, EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, IFFSTTAR, Inria, Université de Nantes, Nantes, France, 2014.
- [79] Kurnyta A., Leski A., Dragan K., Dziendzikowski M., *Health Monitoring of the Aircraft Structure during a Full Scale Fatigue Test with Use of Resistive Ladder Sensors*, *Solid State Phenomena* 220, pp. 349-354, 2015.
- [80] Kurnyta A., Reymer P., *Preliminary Verification of Selected Solutions for Crack Detection*, *Fatigue of Aircraft Structures* 1 (4), pp. 58—63, 2012.
- [81] Kurnyta A., Zieliński W., Reymer P., Dziendzikowski M., *Operational Load Monitoring System Implementation for Su-22UM3K Aging Aircraft*, Proceedings of the 11th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA, September 12-14, 2017.

- [82] Kurnyta, A., *Zastosowanie rezystancyjnego czujnika drabinkowego do detekcji i określania długości pęknięć zmęczeniowych w konstrukcjach lotniczych*, *Pomiary Automatyka Robotyka*, vol. 17, nr 2, pp. 558-563, 2013.
- [83] Laflamme S., Cao L., Chatzi E., Ubertini F., *Damage Detection and Localization from Dense Network of Strain Sensors*, *Shock and Vibration*, vol. 2016, Article ID 2562949, 13 pages, 2016.
- [84] Latko, P., Bielecki, M., Kozera, R., Boczkowska, A., *Relationship between processing and electrical properties in SEBS/CNT nanocomposites*, *Journal of Elastomers & Plastics*, 49(4), 356–367, 2016.
- [85] Latoszek, A. *Zastosowanie metod badań nieniszczących do oceny stanu technicznego kompozytowych konstrukcji lotniczych*, *Wojskowa Akademia Techniczna*, Warszawa, 2012
- [86] Lee B., *Review of the present status of optical fiber sensors*, *Optical Fiber Technology* 9:57–79, 2003.
- [87] Lee H.-Y., Yi S.-M., Lee J.-H., Lee H.-S., Hyun S., Joo Y.-C., *Effects of bending fatigue on the electrical resistance in metallic films on flexible substrates*, *Metals and Materials International* 16(6):947-951, 2010.
- [88] Leski, A. *Ocena trwałości struktury nośnej statków powietrznych na podstawie badań doświadczalnych i analiz numerycznych*, *Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych*, Warszawa 2012.
- [89] Lewińska-Romicka A., *Badania nieniszczące: podstawy defektoskopii*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2001.
- [90] Lewitowicz, J., *Podstawy eksploatacji statków powietrznych. Tom 3. Systemy eksploatacji statków powietrznych*, *Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych*, Warszawa 2006.
- [91] Lineberger R., 2019 Global Aerospace and Defense industry Outlook, Deloitte, <https://www2.deloitte.com/kr/en/pages/manufacturing/articles/global-a-and-d-outlook.html>, dostępna 06.2022.
- [92] Lourenço C., Francis D., Fowler D.P., Staines S. E., Hodgkinson J., Walton C., Bergin S., Tatame R. P., *Instrumentation for quantitative analysis of volatile compounds emission at elevated temperatures. Part 2: Analysis of carbon fiber reinforced epoxy composite*, *Nature Scientific Reports*, 10, 8702, 2020.
- [93] M.G. Chemicals Ltd., 832C Translucent Epoxy Technical Data Sheet, 14 February 2018, Ver. 3.00, Ontario, Canada.

- [94] Ma Z., Chen X., *Fiber Bragg gratings sensors for aircraft wing shape measurement: recent applications and technical analysis*, Sensors 19(1), 55, 2019.
- [95] Mabao L., Feng H., Hong G., Zhigang L., *The Crack-Detected Coating Sensor and Its Application in R&M of Aircrafts*, Proceedings 27th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences, Paper ICAS2010-10.6ST1, pp. 19-24, Nice, France, 2010.
- [96] Mabao L., Yang S., Wang Z.-J., Wang X., *A validation study for a SHM technology under operational environment*, Conference Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), Colorado Springs, Colorado, USA, 2014.
- [97] Mackiewicz S., Góra G., *Ultradźwiękowe badania konstrukcji kompozytowych w przemyśle lotniczym*, Jedenaste Seminarium Nieniszczące Badania Materiałów, Zakopane, 8-11 marca 2005.
- [98] Martinez M., Gang L., Backman D., Oudovikine A., Bellinger N. *Crack detection on composite and metallic aerospace structures*, Proceedings of the 4th European Workshop on Structural Health Monitoring, Krakow, Poland, pp. 560–569, 2008.
- [99] Mawad D., Mansfield C., Lauto A., Perbellini F., Nelson G. W., Tonkin J., Bello S. O., Carrad D. J., Micolich A. P., Mahat M. M., Furman J., Payne D. J., Lyon A. R., Gooding J. J., Harding S. E., Terracciano C. M., Stevens M. M., *A conducting polymer with enhanced electronic stability applied in cardiac models*, Science Advances Vol 2, Issue 11, 2016.
- [100] Merilampi S., Björninen T., Haukka V., Ruuskanen P., Ukkonen L., Sydänheimo L., *Analysis of electrically conductive silver ink on stretchable substrates under tensile load*, Microelectronics Reliability, Volume 50, Issue 12, pp. 2001-2011, 2010.
- [101] Merilampi S., Laine-Ma T., Ruuskanen, P., *The characterization of electrically conductive silver ink patterns on flexible substrates*. Microelectronics Reliability 49 (7), 782–790, 2009.
- [102] Michaels J., Michaels T., *Damage localization in inhomogeneous plates using a sparse array of ultrasonic transducers*, Review of Progress Quantitative Nondestructive Evaluation, volume 26, 2007.
- [103] MicroStrain Sensing, <https://www.microstrain.com/wireless-sensors/v-link-200>, dostępne 06.2022.
- [104] Mihailov S. J., *Fiber Bragg grating sensors for harsh environments*, Sensors 12:1898–1918, 2012.

- [105] Military News, *Air Force Works to Extend Life of C-130 Fleet*, <https://www.military.com/dodbuzz/2014/08/05/air-force-works-to-extend-life-of-c-130-fleet>, dostępne 06.2022.
- [106] Mukhopadhyay S. C., *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring*, Springer, 2011.
- [107] NDT Resource Center. <http://www.ndt-ed.org/>, dostępne 06.2022.
- [108] Non Destructive Testing Solutions, Inc. <http://www.ndts.com/>, dostępne 06.2022.
- [109] Ostachowicz W., Kudela P., Krawczuk M., Zak A., *Guided waves in structures for SHM: the time-domain spectral element method*, John Wiley & Sons, 2011.
- [110] Othonos A., Kalli K., *Fiber Bragg gratings: fundamentals and application in telecommunications and sensing*, Vol. 2, Artech House Boston, 1999.
- [111] Park J.-M., Kim D.-S., Kim S.-J., Kim P.-G., Yoon D.-J., DeVries K. L., *Inherent sensing and interfacial evaluation of carbon nanofiber and nanotube/epoxy composites using electrical resistance measurement and micromechanical technique*, Composites Part B: Engineering, 38:847–61, 2007.
- [112] Perelaer J., de Laat A. W. M., Hendriks C. E., Schubert U. S., *Inkjet-printed silver tracks : low temperature curing and thermal stability investigation*, Journal of Materials Chemistry, 18(27), 3209-3215, 2008.
- [113] Pitropakis I., *Dedicated Solutions for Structural Health Monitoring of Aircraft Components*, Rozprawa doktorska, KU Leuven, Belgium <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/324067>, 2015, dostępna 06.2022.
- [114] Pitropakis I., Pfeiffer H., Gesang T., Janssens S., Wevers M., *Crack detection in aluminium 2024-T3 plates and in an Airbus A320 slat-track using electrical crack gauges*, 8th World Conference on Non-Destructive Testing, Durban, South-Africa, 2012.
- [115] Polski Komitet Normalizacyjny, *PN-EN4179: Lotnictwo i kosmonautyka - Kwalifikacja i zatwierdzanie personelu wykonującego badania nieniszczące*, 2010.
- [116] Prusak K., Zmywaczyk J., Koniorczyk P., Godzimirski J., Cegła M., *Thermo-mechanical analysis of chosen epoxy resins used in aviation technology*, Advanced Materials Research, vol. 1126, s.187-193, 2015.
- [117] Rama V. K., Abhinav V., Karthik P. S., Singh S. P., *Conductive silver inks and their applications in printed and flexible electronics*, RSC Advances, 5(95), 77760–77790, 2015.

- [118] Reuters, <https://www.reuters.com/article/us-boeing-faa-737ng-idUSKBN1XM278>, dostępna 06.2022.
- [119] Riddick, H. K., *Safe-life and damage-tolerant design approach for helicopter structures applied technology laboratory*, US Army Research and Technology Laboratories (AVRADCOM), Virginia, 1984.
- [120] Roach D. P., Rice T. M., Neidigk S., Piotrowski D., Linn J., *Establishing the Reliability of SHM Systems through the Extrapolation of NDI Probability of Detection Principles*, No. SAND2015-4452C; Sandia National Laboratories (SNL-NM): Albuquerque, NM, USA, 2015.
- [121] Roach D., Neidigk S. Does the Maturity of Structural Health Monitoring Technology Match User Readiness?, SAND2011-4075C, Sandia National Lab (SNL-NM), 2011
- [122] Roach D., *Real time crack detection using mountable comparative vacuum monitoring sensors*, Smart Structures and Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 317-328, 2009.
- [123] Roberson D. A., Wicker R. B., , Murr L. E., Church K., MacDonald E., *Microstructural and Process Characterization of Conductive Traces Printed from Ag Particulate Inks*, Materials, 4, 963-979, 2011.
- [124] Rośkowicz M., *Wpływ lepkości klejów konstrukcyjnych na wytrzymałość połączeń klejowych*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2013.
- [125] Ross R.W., *Integrated vehicle health management in aerospace structures*, Structural Health Monitoring (SHM) in Aerospace Structures, Woodhead Publishing, pp 3-31, 2016.
- [126] SAE ARP6461, *Guidelines for implementation of structural health monitoring on fixed wing aircraft aerospace industry steering committee on structural health*, SAE International, 2013.
- [127] Sancaktar E., Bai L., *Electrically Conductive Epoxy Adhesives*, Polymers, 3, 427-466, 2011.
- [128] Schubel, P., Crossley, R., Boateng, E., and Hutchinson, J., *Review of structural health and cure monitoring techniques for large wind turbine blades*, Renewable Energy 51, pp. 113–123, 2013.
- [129] Serway R. A., *Principles of Physics (2nd ed.)*, Fort Worth, Texas; London: Saunders College Pub. p. 602, 1998.

- [130] Sierra-Pérez J., Torres-Arredondo M-A., Joham Alvarez-Montoya J., *Damage detection methodology under variable load conditions based on strain field pattern recognition using FBGs, nonlinear principal component analysis, and clustering techniques*, Smart Materials and Structures, Volume 27 (1), 2017.
- [131] Sikora R., *Tworzywa wielkocząsteczkowe. Rodzaje, właściwości i struktura*, Politechnika Lubelska, Lublin 1991.
- [132] Song H., Lim H., Sohn H., *Electromechanical impedance measurement from large structures using a dual piezoelectric transducer*, Journal of Sound and Vibration, 332, 25, pp. 6580–6595, 2013.
- [133] Staszewski W., Boller C., Tomlinson G. R., *Health monitoring of aerospace structures: smart sensor technologies and signal processing*, John Wiley & Sons, 2004.
- [134] Stehmeier H.; Speckmann H., *Comparative Vacuum Monitoring (CVM)*, Proceedings of the 2nd European Workshop on Structural Health Monitoring, Munich, Germany, 7–9 July 2004.
- [135] Steinweg D.M., Hornung M., *Evaluating the Influence of SHM on Damage Tolerant Aircraft Structures Considering Fatigue*, ICAF 2019 – Structural Integrity in the Age of Additive Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp 976-993, Springer, Cham, 2019.
- [136] Stępiński T., Uhl T., Staszewski W., *Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Applications*, John Wiley & Sons, 2013.
- [137] Su Z., Ye L., *Identification of damage using Lamb waves: from fundamentals to applications*, Springer, 2009.
- [138] Suganuma K., *Introduction to Printed Electronics*, SpringerBriefs in Electrical 75 and Computer Engineering 74, Springer New York, NY, 2014.
- [139] Swindell P., Doyle J., Roach D., *Integration of structural health monitoring solutions onto commercial aircraft via the Federal Aviation Administration structural health monitoring research program*, AIP Conference Proceedings 1806, 070001, 2017.
- [140] Synaszko P., Zając B., *Wykrywanie pęknięć w połączeniach nitowanych elementów lotniczych z wykorzystaniem technologii EC Array*, Badania nieniszczące i diagnostyka 4, pp. 77-79, 2018.

- [141] Tan H. W., Tran T., Chua C. K., *A review of printed passive electronic components through fully additive manufacturing methods*, Virtual and Physical Prototyping, 11:4, 271-288, 2016.
- [142] Tenmex, <http://www.tenmex.pl/index.php?action=tensometry>, dostepna 06.2022.
- [143] Thomas A. J., Kim J. J., Tallman T. N, Bakis C. E., *Damage detection in self-sensing composite tubes via electrical impedance tomography*, Composites Part B: Engineering, Volume 177, 107276 , 2019.
- [144] Three Bond Co. Ltd., Recent Technical Trends in Conductive Adhesives, Three Bond Co. Ltd, Research and Development Division, Technical News nr 52, January 1, 1999.
- [145] Todoroki, A., *Self-Sensing Composites and Optimization of Composite Structures in Japan*, International Journal of Aeronautical and Space Sciences, vol. 11, no. 3, The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, pp. 155–166, 2010.
- [146] Torres Arango M. A., Cokeley A. M., Beard J. J., Sierros K. A., Direct writing and electro-mechanical characterization of Ag micro-patterns on polymer substrates for flexible electronics, Thin Solid Films, 596: p. 167-173, 2015.
- [147] Tranchard P., Duquesne S., Samyn F., Estèbe B, Bourbigot S., *Kinetic analysis of the thermal decomposition of a carbon fibre-reinforced epoxy resin laminate*, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 126, pp.14–21, 2017.
- [148] United States Department of Defence, *MIL-STD-1530C: Aircraft Structural Integrity Program (ASIP)*, 2005.
- [149] Viets C., Kaysser S., Schulte K., *Damage mapping of GFRP via electrical resistance measurements using nanocomposite epoxy matrix systems*, Composites Part B: Engineering, Volume 65, pp. 80-88, 2014.
- [150] Vishay Micro-Measurement, *Special Purpose Sensors - Crack Propagation Patterns*, Document no.11521, 2015;
- [151] Wada D., Igawa H., Tamayama M., Kasai T., Arizono H., Murayama H., *Flight demonstration of aircraft wing monitoring using optical fiber distributed sensing system*, Smart Materials and Structures 28 (5), 2019.
- [152] Wang T., Tan B., Lu M., Zhang Z., Lu G., *Piezoelectric Electro-Mechanical Impedance (EMI) Based Structural Crack Monitoring*, Applied Science, vol. 10, 4648, 2020.

- [153] Wargo, C., *Characterization of Conductors for Printed Electronics*, <https://dokument.pub/characterization-of-conductors-for-printed-electronics-flipbook-pdf.html>, dostępna 06.2022.
- [154] Wevers M., Lambrighs K., *Applications of acoustic emission for SHM: A review*, Encyclopedia of Structural Health Monitoring. Wiley Online Library, 2009.
- [155] Yenne B., *B-52 Stratofortress: The Complete History of the World's Longest Serving and Best Known Bomber*, Zenith Press, 2012.

Qi H., J. & Boyce, M. C. Stress–strain behavior of thermoplastic polyurethanes, *Mechanics of Materials* 37 (8), 817–839, 2015.

Suikkola, J. et al. Screen-Printing Fabrication and Characterization of Stretchable Electronics. *Sci. Rep.* 6, 25784; doi: 10.1038/srep25784 (2016)

Perelaer, J., de Laat, A. W., Hendriks, C. E., & Schubert, U. S. Inkjet-printed silver tracks: low temperature curing and thermal stability investigation. *Journal of Materials Chemistry* 18(2008)27, pp. 3209-3215. DOI: 10.1039/B720032C

Norhisham Ismail¹, Mohd Azli Salim^{1,2*}, Azmi Naroh³, Nor Azmmi Masripan¹, Adzni Md. Saad¹, Mohd Nizam Sudin¹ and Francesco Caridi, Resistivity Characterization for Carbon Based Conductive Nanocomposite on Polyethylene Terephthalate and Thermoplastic Polyurethane Substrates, *International Journal of Nanoelectronics and Materials* Volume 13 (Special Issue) May 2020 [315-326]

Morancho J.M., Salla J.M., Relaxation in partially cured samples of an epoxy resin and of the same resin modified with a carboxyl-terminated rubber, *Polymer* 40 (1999) 2821–2828