

IPPT Reports on Fundamental Technological Research

1/2023

Dominik Kukla

METODY NIENISZCZĄCE W OCENIE  
ROZWOJU USZKODZENIA  
MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH  
W WARUNKACH OBCIĄŻEŃ  
EKSPLOATACYJNYCH

Instytut Podstawowych Problemów Techniki  
Polskiej Akademii Nauk

Warszawa 2023

IPPT Reports on Fundamental Technological Research

ISSN 2299-3657

ISBN 978-83-65550-44-6 (druk)

ISBN 978-83-65550-48-4 (online)

Recenzent/Reviewer:

dr hab. inż. Łukasz Jankowski

Praca wpłynęła do redakcji 28 marca 2023 r.

---

Copyright © 2023 by IPPT PAN

Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk (IPPT PAN)

(Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences)

Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa, Poland

---

Druk/Printed by:

EXDRUK, Rysia 6, 87-800 Włocławek, Poland

# Metody nieniszczące w ocenie rozwoju uszkodzenia materiałów konstrukcyjnych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych

Dominik Kukła

Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk

## Abstrakt

Praca dotyczy wykorzystania metody prądów wirowych oraz innych metod nieniszczących do identyfikacji lokalnych zmian w strukturze materiału związanych z rozwojem uszkodzenia w warunkach obciążenia zmęczeniowego. Dla wybranych, metalicznych materiałów konstrukcyjnych (stale, stopy niklu i aluminium) poddanych cyklicznym obciążeniom zmiennym opracowano ilościowe charakterystyki rozwoju uszkodzenia na podstawie wyznaczonych zmian składowych odkształcenia w kolejnych cyklach obciążenia. Równocześnie z próbami zmęczeniowymi przetestowano szereg diagnostycznych metod nieniszczących w celu oceny możliwości lokalizacji procesu inicjowania uszkodzenia zmęczeniowego w materiale próbek. Opracowane procedury badawcze z zastosowaniem metody prądów wirowych, wspierane technikami optycznymi (lub innymi technikami NDT), umożliwiły nie tylko identyfikację obszarów uszkodzenia zmęczeniowego we wczesnym etapie rozwoju, związanego ze zmianami strukturalnymi, ale także na monitorowanie procesu degradacji próbek, aż do ich zerwania.

Badania przeprowadzono na stopach konstrukcyjnych dobranych nie tylko z uwagi na właściwości elektromagnetyczne, ale przede wszystkim na mechanizmy rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego. Badania próbek z żarowytrzymałej stali 1.4903 obejmowały testy zmęczeniowe wraz z wyznaczeniem odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego ( $\Phi$ ) opisującego dynamikę zmian składowych odkształcenia w kolejnych cyklach obciążeń zmiennych. Wyniki tych obliczeń skorelowano z wynikami pomiarów parametru sygnału prądowirowego w postaci kąta fazowego krzywej impedancyjnej, realizowanych według opracowanej procedury. Pomiar ten wykonano w zdefiniowanych miejscach na próbce poddanej obciążeniom zmiennym, po ustalonej liczbie cykli zmęczeniowych. Przeprowadzono także badania mikrostrukturalne w zakresie metalografii (zglądów poprzecznych i podłużnych) oraz fraktografii (przełomów) próbek poddanych próbom zmęczeniowym. Badania mikrostrukturalne potwierdziły występowanie zjawisk związanych z degradacją zmęczeniową, które mogą uzasadniać zmiany charakterystyki sygnału prądowirowego w funkcji jej rozwoju. Zjawiska te to przede wszystkim lokalne odkształcenia plastyczne wokół

twardych wtrąceń oraz mikropęknięcia. Badania zmęczeniowe dla stali 1.4903 przeprowadzono na próbkach w stanie dostawy oraz na próbkach eksploatacyjnych w warunkach pracy rurociągów pary świeżej w jednej z krajowych elektrowni. Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań i ich obróbki opracowano metodykę oceny rozwoju degradacji wyrażonej ilościowo poprzez narastanie składowych odkształcenia niesprężystego w kolejnych cyklach obciążenia. Na podstawie opracowanych procedur pomiarowych uzyskano wyniki wskazujące zarówno na możliwość lokalizacji i identyfikacji defektów powstałych wskutek procesu zmęczeniowego we wczesnym etapie jego rozwoju, jak i na ilościową ocenę stopnia degradacji na podstawie analizy zmian parametrów wyznaczonych techniką prądów wirowych w kolejnych cyklach obciążeń zmęczeniowych.

Kolejne wyniki uzyskano w badaniach stopu niklu MAR 247 stosowanego do budowy łopatek turbin silników lotniczych. Serię próbek z tego stopu poddano próbom zmęczeniowym, którym towarzyszyły badania nieniszczące z wykorzystaniem technik optycznych, takich jak cyfrowa korelacja obrazu (DIC – *Digital Image Correlation*) czy elektroniczna interferometria plamkowa (ESPI – *Electronic Speckle Pattern Interferometry*). Na próbkach poddawanych testom zmęczeniowym przeprowadzono także pomiary konduktywności z zastosowaniem metody prądów wirowych (według opracowanej procedury) oraz klasyczne badania defektoskopowe. Metody optyczne pozwoliły na wczesną identyfikację lokalnych koncentracji odkształcenia, wynikających z lokalnych koncentracji naprężenia. Obszary te stanowiły miejsce rozwoju propagacji pęknięcia dominującego, co potwierdziły prowadzone równoległe badania metodą prądów wirowych, które ujawniły także inne pęknięcia zmęczeniowe na etapie poprzedzającym rozwój uszkodzenia dominującego. Ponadto wykazano lokalne zmniejszenie konduktywności w obszarze inicjowania uszkodzenia, związanego z koncentracją odkształcenia. Podobne badania wykonano dla stopu Inconel 718 z zastosowaniem próbek o zmiennej powierzchni przekroju, co umożliwiło uzyskanie zmiennego pola deformacji.

Opisano także wyniki badań dotyczących identyfikacji i oceny wad technologicznych oraz eksploatacyjnych związanych m.in z lokalnym przegrzaniem struktury materiału przez narzędzie szlifierskie, niewłaściwie przeprowadzoną obróbkę plastyczną na zimno oraz z oddziaływaniem atmosfery wodorowej. Opracowane procedury badawcze dają możliwość identyfikacji defektów związanych z przypaleniami szlifierskimi, a wykonując analizę parametrów rejestrowanego sygnału impedancji uzyskanego metodą prądów wirowych, można poznać ich właściwości. Dotyczy to ilościowej oceny głębokości strefy przegrzania oraz jakościowej oceny zmian twardości warstwy spowodowanej oddziaływaniem wysokiej temperatury.

# Non-destructive methods in assessment of damage development in structural materials operated under service loads

Dominik Kukla

Institute of Fundamental Technological Research Polish Academy of Sciences

## Abstract

The work concerns the application of eddy current and other non-destructive methods for identification of local changes in the structure of material due to the development of damage under fatigue conditions. For selected, metallic structural engineering materials (steels, nickel and aluminum alloys) subjected to cyclic alternating loads, the quantitative characteristics of damage development were presented and described on the basis of the evolution of deformation components in subsequent load cycles. Along with the fatigue tests, a number of non-destructive diagnostic methods were used to assess the possibility of locating the fatigue failure initiation process in various materials. The proposed research procedures of the eddy current method, supported by optical techniques, allowed not only for early-stage identification of fatigue damage development areas but also to monitor the degradation process of specimens, up to their failure.

The eddy current measurements were carried out on alloys selected on the basis of their (magnetic) properties and mechanisms of fatigue damage development. The tests of the heat-resistant steel specimens (1.4903) included fatigue tests with the determination of the deformation fatigue damage factor describing the dynamics of changes in the deformation components in subsequent load cycles. The results of these calculations were correlated with the measurements of the eddy current signal phase angle, carried out according to the developed procedure. This measurement was performed in selected areas on a specimen subjected to variable loads and after a predetermined number of fatigue cycles. Microstructural observations of specimens subjected to fatigue tests were also carried out in the field of metallography (transverse and longitudinal sections) as well as fractography (fractures). Microstructural studies allowed to confirm the occurrence of processes and phenomena related to fatigue degradation, which may justify changes in the values of the eddy current signal parameters (phase angle) as a function of its development. These were mainly local plastic deformations around hard inclusions and microcracks. Fatigue tests for this steel were carried out on specimens in the as-received condition and on the live steam pipelines operated in the power plant. Based on the eddy current analysis, a fati-

gue life determination methodology was developed. Such methodology considers the development of degradation, expressed quantitatively, through the growth of the deformation components in subsequent cycles. Based on the established measurement procedures, the obtained results indicate the possibility of localization and identification of fatigue damage at an early stage of its development, as well as a quantitative assessment of the degree of degradation based on the eddy current technique.

Further investigations were performed on the MAR 247 nickel alloy used in the construction of turbine blades of aircraft engines. A series of specimens were subjected to fatigue tests and simultaneously monitored by non-destructive, optical testing techniques such as Digital Image Correlation (DIC) and Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI). Subsequent conductivity measurements were performed on such specimens by using the eddy current method (according to the developed procedure), as well as classic defectoscopy tests. Optical techniques enabled an early identification of local strain concentrations resulting from local stress concentrations. In these areas, the development of the dominant crack propagation was observed. Such observations were further confirmed by the parallel eddy current tests, which also revealed other fatigue cracks at the stage preceding the development of the dominant damage. A local drop in the conductivity value in the area of damage initiation was also found in the form of strain concentration. Similar tests were also carried out for the Inconel 718 alloy by using specimens with a variable cross-sectional area enabling to obtain a variable deformation field. Additionally, an attempt to identify technological defects resulting from local overheating of the material structure by the grinding tool was made. The developed test procedures enabled the detection of defects related to grinding burns. The subsequent analysis of the parameters of the recorded impedance signal obtained by the eddy current method, allows the quantitative assessment of the depth of the overheating zone and the qualitative assessment of changes in the hardness of the layer, resulting from the effect of high temperature.

## Skróty

- ACFM – Alternating Current Field Measurement (pomiar pola magnetycznego prądu przemiennego)
- AE – Acoustic Emission (metoda emisji akustycznej)
- AT – Active Thermography (termografia aktywna)
- BEMI – Barkhausen Noise and Eddy Current Microscope (mikroskop szumów Barkhausena i prądów wirowych)
- BN – Barkhausen Noise (szumy Barkhausena)
- CVD – Chemical Vapor Deposition (chemiczne osadzanie z fazy gazowej)
- DIC – Digital Image Correlation (cyfrowa korelacja obrazu)
- ECA – Eddy Current Array (metoda prądów wirowych z sondami wielocewkowymi)
- ECPT – Eddy Current Pulsed Thermography (impulsowa termografia prądów wirowych)
- ECT – Eddy Current Testing (technika prądów wirowych)
- ESPI – Electronic Speckle Pattern Interferometry (elektroniczna interferometria plamkowa)
- ET – Eddy Current Testing (metoda prądów wirowych)
- FPI – Fluorescent Penetrant Inspection (fluorescencyjne badania penetracyjne)
- IoT – Internet of Things (internet rzeczy)
- LFIS – Low Frequency Impedance Spectroscopy (niskoczęstotliwościowa spektroskopia impedancyjna)
- MAE – Magneto-Acoustic Emission (emisja magneto-akustyczna)
- MFL – Magnetic Flux Leakage (wyciek magnetyczny)
- MMM – Magnetic Memory Method (metoda pamięci magnetycznej)

- MT – Magnetic Testing (badania magnetyczne)
- NDT – Non-Destructive Testing (badania nieniszczące)
- NFT – Near Field Testing (badanie w polu bliskim)
- PAUT – Phased Array Ultrasonic Testing (badania metodą ultradźwiękową głowicami wieloelementowymi)
- PEC – Pulsed Eddy Current (pulsacyjne prądy wirowe)
- PIRMP – Peak Interval of Reversible Magnetic Permeability (szczytowy przedział odwracalnej przenikalności magnetycznej)
- PMS – przenośna mikroskopia świetlna
- PT – Penetrant Testing (badania penetracyjne)
- RFT – Remote Field Testing (badanie w polu dalekim)
- RMF – Residual Magnetic Field (resztkowe pole magnetyczne)
- SHM – Structural Health Monitoring (monitorowanie stanu konstrukcji)
- TRayT – T-Ray Testing (metoda terahercowa)
- UT – Ultrasonic Testing (badania metodą ultradźwiękową)
- VT – Visual Testing (badania wizualne)
- XRFT – Externally Referenced Remote (badanie RFT z zewnętrzną referencją)



# Spis treści

<b>1. Wprowadzenie</b>	<b>11</b>
1.1 Cel i zakres pracy . . . . .	15
1.1.1 Cel pracy . . . . .	16
1.1.2 Zakres pracy . . . . .	16
<b>2. Metoda prądów wirowych</b>	<b>19</b>
2.1 Opis metody . . . . .	19
2.2 Inne metody oparte na zjawisku indukcji magnetycznej . . . . .	20
2.3 Prądy wirowe w diagnostyce przemysłowej . . . . .	21
2.4 Defektoskopia prądowirowa . . . . .	23
2.5 Ocena grubości warstw i powłok z zastosowaniem prądów wirowych . . . . .	25
2.6 Ocena stanu technicznego rur . . . . .	28
2.7 Strukturoskopia oraz ocena stanu naprężenia . . . . .	34
2.8 Prądy wirowe w ocenie degradacji zmęczeniowej . . . . .	37
<b>3. Inne metody magnetyczne w ocenie uszkodzeń zmęczeniowych</b>	<b>41</b>
3.1 Detekcja uszkodzeń z wykorzystaniem zjawisk elektromagnetycznych . . . . .	41
3.2 Szumy Barkhausena . . . . .	43
3.3 Emisja magneto-akustyczna . . . . .	44
3.4 Metoda pamięci magnetycznej . . . . .	46
3.5 Metoda wycieku magnetycznego . . . . .	47
<b>4. Zjawiska towarzyszące zmęczeniu materiałów konstrukcyjnych</b>	<b>49</b>
4.1 Opis zjawiska . . . . .	49
4.2 Metody opisu rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego . . . . .	53
4.3 Ilościowa ocena uszkodzenia zmęczeniowego . . . . .	54
4.4 Mechanizmy rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego . . . . .	56
<b>5. Ocena uszkodzenia zmęczeniowego żarowytrzymałej stali 1.4903</b>	<b>63</b>
5.1 Opis żarowytrzymałej stali 1.4903 . . . . .	63
5.2 Właściwości wytrzymałościowe i mikrostruktura stali 1.4903 . . . . .	64
5.3 Rozwój parametrów uszkodzenia zmęczeniowego stali 1.4903 . . . . .	69
5.4 Metoda prądów wirowych w ocenie stopnia uszkodzenia stali 1.4903 . . . . .	77
5.5 Nieniszcząca detekcja uszkodzenia stali 1.4903 w procesie pełzania . . . . .	91

<b>6. Detekcja i ocena uszkodzeń eksploatacyjnych w stopach niklu</b>	<b>95</b>
6.1 Wstęp . . . . .	95
6.2 Ocena rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego stopu MAR 247 . . . . .	96
6.3 Testy zmęczeniowe stopu MAR 247 . . . . .	97
6.4 Badania stopu MAR 247 metodą prądów wirowych . . . . .	101
6.4.1 Wynik badań defektoskopowych . . . . .	102
6.4.2 Wyniki strukturoskopi prądowirowej . . . . .	106
6.5 Identyfikacja i analiza rozwoju uszkodzenia metodami optycznymi . . . . .	111
6.5.1 Badania z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu (DIC) . . . . .	113
6.5.2 Ocena uszkodzeń metodą interferometrii płamkowej (ESPI) . . . . .	118
6.6 Ocena stopnia uszkodzenia stopu niklu INCONEL 718 . . . . .	125
<b>7. Inne przykłady oceny uszkodzeń badanych metodą prądów wirowych</b>	<b>129</b>
7.1 Identyfikacja i ocena przypaleń szlifierskich w stali AISI 9310 . . . . .	129
7.2 Ocena degradacji wodorowej stali 316 . . . . .	133
7.3 Ocena stanu naprężenia stali S235 po walcowaniu . . . . .	136
<b>8. Podsumowanie</b>	<b>143</b>
8.1 Wnioski końcowe . . . . .	143
8.2 Oryginalne elementy pracy . . . . .	145
8.3 Kierunki dalszych badań . . . . .	148
<b>Bibliografia</b>	<b>149</b>

# Wprowadzenie

Ocena stopnia degradacji elementów konstrukcji i instalacji przemysłowych jest zagadnieniem trudnym, ale też niezwykle istotnym z punktu widzenia szacowania ich trwałości eksploatacyjnej. Jednym ze zjawisk wpływających na dynamikę rozwoju uszkodzenia konstrukcji są lokalne zmiany stanu naprężenia pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych (mechanicznych, cieplnych i środowiskowych) i związane z nimi lokalne koncentracje odkształcenia oraz towarzyszące im zmiany mikrostrukturalne. Zjawiska te prowadzą do inicjowania i rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych, których niekontrolowana propagacja może prowadzić do uszkodzenia konstrukcji, a w konsekwencji do awarii całej instalacji. Od ponad 100 lat są rozwijane różne, nieniszczące metody badania stanu elementów konstrukcji i instalacji przemysłowych, począwszy od metod wizualnych wspieranych optycznie, przez rentgenowskie, ultradźwiękowe czy magnetyczne, pozwalające na identyfikację i lokalizację tego typu uszkodzeń.

W latach 50. XX wieku pojawiły się pierwsze prace dotyczące wykorzystania elektromagnetycznych technik pomiarowych do oceny stanu degradacji struktury materiałów metalicznych pracujących w warunkach obciążeń zmęczeniowych. Dotyczyły one głównie pomiarów konduktywności metali i stopów poddawanych cyklicznym obciążeniom zmiennym. Inspiracją dla tych badań był opublikowany w czerwcu 1959 roku przez Boeing Flight Test Organization raport, w którym odnotowano wzrost oporu tensometrów foliowych poddawanych zmęczeniu [1]. Badania metalograficzne wykazały, że dużym zmianom przewodności elektrycznej wynikającym z pojawienia się pęknięć towarzyszą niewielkie zmiany związane z odkształceniowym umocnieniem materiału. W 1966 roku Hatting [2] wykazał zależność konduktywności próbek ze stopu aluminium od liczby cykli obciążenia w dynamicznych próbach zginania. Kolejne prace z lat 70., m.in. Charley'a i Robbinsa [3], potwierdziły skuteczność pomiarów rezystancji w ocenie rozwoju degradacji zmęczeniowej miedzi i polikrystalicznych folii ze stopów Cu-Ni [3] oraz drutów tytanowych poddawanych cyklicznemu skręcaniu [4]. W tym samym czasie pojawiały się też prace dotyczące użycia do oceny trwałości zmęczeniowej materiałów metalicznych innych metod nieniszczących, opartych na

innych zjawiskach fizycznych. Zamieszczone w nich wyniki badań z wykorzystaniem metod ultradźwiękowych, w zakresie detekcji uszkodzeń zmęczeniowych podczas obciążeń cyklicznych, otrzymano dla próbek polikrystalicznej stali [5] i aluminium [6]. W latach 70. XX wieku testowano także możliwości detekcji uszkodzeń zmęczeniowych za pomocą emisji akustycznej (AE – *Acoustic Emission*) w stopach aluminium [7] oraz w azotku krzemu [8], a także z wykorzystaniem szumów Barkhausena w stali stopowej [9]. Prowadzono również testy z równoczesną oceną rozwoju uszkodzenia z użyciem dwóch, alternatywnych technik: akustycznej i magnetycznej [10]. Kolejne lata (80. i 90. XX w.) to rozwój metod nieniszczących w detekcji uszkodzeń zmęczeniowych na różnych etapach ich wzrostu. Badania te dotyczyły głównie identyfikacji mikronieciągłości materiałowych wywołanych zmiennym obciążeniem cyklicznym. Pojawiły się także prace opisujące zależności parametrów mierzonych technikami nieniszczącymi od poziomu naprężenia resztkowego [11], danych koncentracji naprężenia [13], gęstości dyslokacji [14] czy wielkości ziarna [15, 16], czyli parametrów charakteryzujących degradację materiału we wczesnym stadium jej rozwoju w warunkach obciążeń eksploatacyjnych.

Od początku XXI wieku tego rodzaju metody diagnostyczne stały się powszechnym narzędziem w ocenie stanu technicznego konstrukcji i urządzeń, w szczególności urządzeń ciśnieniowych, co jest związane z wytycznymi dyrektyw unijnych. Rozwój nieniszczących metod diagnostycznych zainicjował podejście systemowe do problemu oceny stanu technicznego, co określa się jako monitorowanie stanu konstrukcji (SHM – *Structural Health Monitoring*) [16]. SHM polega na ciągłej ocenie stanu technicznego obiektu za pomocą różnego rodzaju czujników (piezoelektrycznych [17, 18], magnetycznych [19], światłowodowych [20]), tworzących system kontrolno-pomiarowy umożliwiający detekcję uszkodzeń w trakcie konstrukcji urządzenia, jego instalacji czy eksploatacji. Aktualnie w systemach SHM jest testowane wykorzystanie nanorurek [21] oraz możliwości transferu danych, jakie dają sieci typu IoT (*Internet of Things*). Na podstawie uzyskanych wyników taki system może prognozować rozwój degradacji, a także szacować bezpieczny czas dalszej pracy dzięki stosowanym algorytmom i zgromadzonym w bazach danym [22, 23].

Na podstawie badań z wykorzystaniem technik nieniszczących wykazano skuteczność tych metod nie tylko w identyfikacji i lokalizacji uszkodzeń w postaci nieciągłości w strukturze materiału na różnym etapie ich rozwoju, ale także identyfikacji lokalnych zmian mikrostrukturalnych będących miejscem inicjowania, a następnie rozwoju uszkodzenia.

W ostatnich latach są szczególnie rozwijane nieniszczące metody diagnostyczne oparte na zjawisku indukcji magnetycznej (prądy wirowe, szumy Bark-

hausena), rozprzestrzenianiu się fal mechanicznych (ultradźwięki, emisja akustyczna) oraz promieniowaniu (anihilacja pozytonowa, dyfrakcja rentgenowska). Wynika to z faktu dynamicznego wzrostu możliwości sprzętowych w zakresie detekcji objętościowych zmian mikrostrukturalnych. Uzupełnieniem tych metod, ale tylko w zakresie diagnozowania stanu powierzchni, są metody bazujące na termografii w podczerwieni [24, 25] oraz metody optyczne, takie jak elektroniczna interferometria plamkowa (ESPI – *Electronic Speckle Pattern Interferometry*) [26–28] czy cyfrowa korelacja obrazu (DIC – *Digital Image Correlation*) [29, 30]. W ramach technik termowizyjnych można wyróżnić termografię pasywną, związaną z oceną rozkładu temperatury na powierzchni badanych obiektów, i detekcję uszkodzeń na podstawie anomalii termicznych, na przykład w materiałach kompozytowych [31] lub konstrukcjach stalowych [32]. W szczególnych przypadkach stosowana jest także termografia aktywna, w której na badaną powierzchnię oddziałuje się energią z zewnętrznego źródła, co ułatwia identyfikację na przykład delaminacji w kompozytach [33]. Do metod optycznych zalicza się również te wykorzystujące zjawisku interferencji (metody interferometryczne), takie jak holografia, szerografia i profilometria laserowa. W tym przypadku do detekcji przemieszczenia (odkształcenia) powierzchni materiału pod wpływem obciążeń mechanicznych lub cieplnych wykorzystuje się interferencję światła laserowego. Techniki te są często stosowane w diagnostyce kompozytowych struktur lotniczych [35] oraz elementów instalacji w elektrowniach jądrowych [34].

Należy także wspomnieć o rozwijanych metodach badań nieniszczących mających potencjalne zastosowanie w diagnostyce przemysłowej, ale niewdrożonych jeszcze do praktyki przemysłowej z uwagi na brak normatywnych wytycznych lub brak uznania metody przez Urząd Dozoru Technicznego. Można tu wymienić na przykład techniki terahercowe stosowane z powodzeniem w diagnostyce kompozytowych struktur lotniczych [37] czy promów kosmicznych [35], emisję magnetoakustyczną, skuteczną w ocenie stanu materiałów ferromagnetycznych [36, 40], lub metodę termografii indukowanej prądami wirowymi (ECPT – *Eddy Current Pulsed Thermography*), sprawdzoną w detekcji uszkodzeń zmęczeniowych [37].

Wszystkie wymienione metody mogą być wykorzystane do wykrywania uszkodzeń w postaci nieciągłości materiałowych powstających wskutek dynamicznych i statycznych obciążeń eksploatacyjnych. Na podstawie analizy fizycznych ograniczeń każdej z tych metod oraz udostępnionych wyników badań można oszacować próg detekcji każdej z nich. W tabeli 1.1 zestawiono wielkości minimalnych rozmiarów defektów w postaci liniowych nieciągłości w materiale, możliwych do identyfikacji wybranymi metodami nieniszczącymi. Wyniki prezentowane w publikacjach naukowych, potwierdzone badaniami własnymi, wskazują,

że spośród nieniszczących metod defektoskopowych ujętych w polskim systemie normalizacyjnym najlepsze rezultaty uzyskano z wykorzystaniem metody prądów wirowych, dzięki której możliwe jest wykrycie nieciągłości o szerokości około 500 nm. Warunkiem koniecznym do wykrycia tak małej wady jest jej długość, nie mniejsza niż 0,6 mm, i głębokość przekraczająca co najmniej 0,15 mm. Oczywiście wynik ten jest możliwy przy optymalnej geometrii wady względem sondy, tzn. przy zachowaniu prostopadłości defektu liniowego względem powierzchni skanowania sondą prądowirową oraz małej chropowatości powierzchni, pozwalającej na wyodrębnienie sygnału wady.

Tabela 1.1. Możliwości metod nieniszczących w detekcji nieciągłości.

Metoda badania	Minimalny wymiar wady powierzchniowej możliwej do wykrycia [mm]		
	szerokość	długość	głębokość
Wizualna (VT)	0,005	0,1	–
Penetracyjna (PT)	0,001	0,1	0,01
Ultradźwiękowa (UT)	0,001	0,7	0,1
Prądowirowa (ET)	0,0005	0,6	0,15
Magnetyczno-proszkowa (MT)	0,001	0,3	0,01

Prądy wirowe są powszechnie wykorzystywane w diagnostycznych badaniach defektoskopowych, gdzie celem jest identyfikacja i lokalizacja nieciągłości, najczęściej w postaci pęknięć w konstrukcyjnych materiałach metalicznych. W opisanych poniżej badaniach metoda została wykorzystana do identyfikacji subtelnych zmian wynikających ze zjawisk zachodzących w materiale pod obciążeniem poprzedzającym pojawienie się pęknięć. Dzięki temu wykazano zależność parametrów prądowirowych, takich jak kąt fazowy wzbudzanego w materiale sygnału, nie tylko od zmiany stanu naprężenia własnego, ale też od innych czynników związanych z procesami degradacji mikrostruktury w warunkach obciążeń zmęczeniowych.

Procesy degradacji mikrostruktury materiału pod wpływem statycznych i dynamicznych obciążeń cyklicznych są związane z lokalnym rozwojem odkształcenia niesprężystego wynikającego m.in. z ruchu defektów sieci krystalicznej (poślizg dyslokacji, migracja wakansów), koncentracji tych defektów w miejscach blokowania ich na przeszkodach uniemożliwiających dalsze przemieszczanie (granice ziaren, wtrącenia) oraz formowania się uporczywych pasm poślizgu. Mają tu wpływ także przemiany fazowe powodowane zmianami stanu naprężenia lub temperatury oraz procesy dyfuzyjne. Ostatecznym efektem wspomniana

nych zjawisk jest zarodkowanie mikropełnięć i ich wzrost, a w końcowej fazie procesu zniszczenia – uformowanie w materiale pełnięcia dominującego. Pełnienie rozwija się następnie w elemencie konstrukcji aż do momentu, gdy osiągnie wartość krytyczną. Po osiągnięciu krytycznej wielkości pełnięcia wskutek obciążenia eksploatacyjnego może nastąpić jego niekontrolowany wzrost prowadzący do zniszczenia konstrukcji.

Stosowane obecnie nieniszczące metody wykrywania uszkodzeń powstałych pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych nie dają miarodajnych wyników we wczesnych fazach rozwoju tego procesu. W komercyjnym zastosowaniu większość z tych metod umożliwia wykrycie pełnięć lub pustek oraz innych ubytków spowodowanych procesami korozji w skali makro. Metody te nie są jednak wrażliwe na subtelne zmiany mikrostruktury oraz stanu naprężenia pojawiające się w początkowej fazie procesu, a w konsekwencji prowadzące do zniszczenia elementu konstrukcyjnego. Wyniki przedstawionych poniżej badań dotyczących interakcji pola magnetycznego oddziałującego na próbkę z polem w niej indukowanym umożliwiają znalezienie pewnych zależności między skutkami zjawisk degradacji a parametrami prądowymi. Na tej podstawie zaproponowano metodykę oceny rozwoju procesów degradacji na podstawie zmian wartości parametrów prądów wirowych.

W opracowanej metodzie oceny uszkodzenia jako miarę stopnia zdegradowania mikrostruktury przyjęto zmianę nieliniowej odpowiedzi materiału w kolejnych cyklach obciążenia o stałej amplitudzie naprężenia. Pozwoliło to nie tylko na scharakteryzowanie cech zmęczeniowych badanych materiałów konstrukcyjnych, ale także na utworzenie typoszeregu próbek o różnym, dającym się zmierzyć, stopniu uszkodzenia, który może stanowić bazę próbek referencyjnych dla badań na realnych obiektach z tego typu materiałów. Opisane poniżej wyniki stanowią potencjał do komercjalizacji w postaci instrukcji metodycznych do oceny stopnia degradacji materiałów eksploatowanych w warunkach obciążeń zmęczeniowych.

## 1.1 Cel i zakres pracy

Diagnostyka metodami nieniszczącymi (NDT – *Non-Destructive Testing*) prowadzona jest na większości obiektów przemysłowych pracujących w warunkach statycznych i dynamicznych obciążeń mechanicznych, termicznych i środowiskowych, aby zwiększyć bezpieczeństwo ich eksploatacji. Badania takie mają na celu wykrycie wszelkiego rodzaju uszkodzeń, w postaci nieciągłości i ubytków materiałowych, powstałych w wyniku obciążeń eksploatacyjnych. Są to nie

tylko pęknięcia wywołane zmęczeniem materiału konstrukcji, ale też ubytki korozyjne i erozyjne, a także wady materiałowe mogące stanowić karb strukturalny będący potencjalnym miejscem inicjowania uszkodzenia. **Wyniki badań opisane w niniejszej pracy stanowią kolejny krok w rozwoju nieniszczących technik badawczych w kierunku maksymalnego wykorzystania ich możliwości w rozpoznawaniu skutków degradacji materiałów w konstrukcjach przemysłowych oraz lepszej charakteryzacji zjawisk związanych z jej rozwojem.** Powiązanie wyników badań nieniszczących, które, jak wykazały przeprowadzone badania, umożliwiają ocenę stopnia degradacji materiału, z wynikami badań zmęczeniowych daje szansę na ilościowy opis uszkodzenia już we wczesnym stadium jego rozwoju.

### 1.1.1 Cel pracy

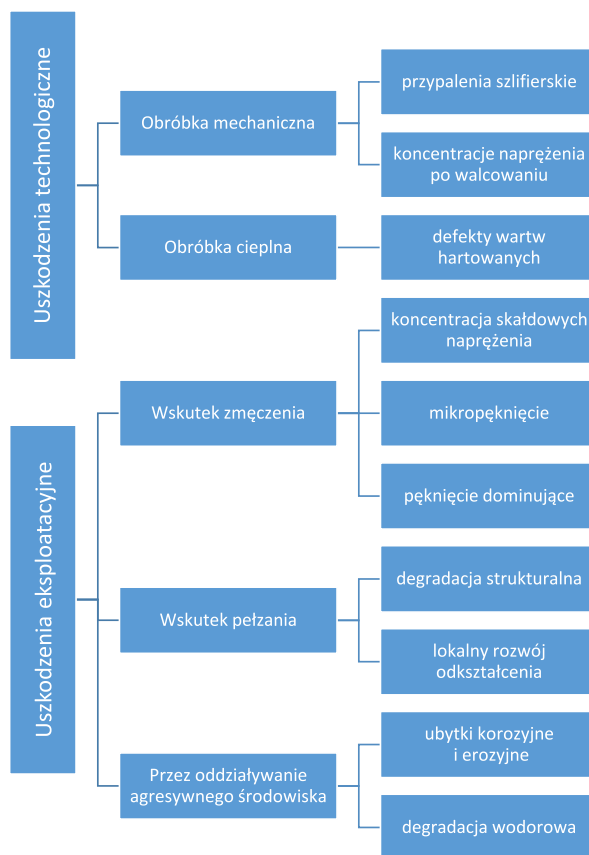
Celem pracy była identyfikacja i opis zmian zachodzących lokalnie w materiałach konstrukcyjnych pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych z wykorzystaniem możliwości, jakie daje metoda prądów wirowych, oraz ich ocena pod kątem spełnienia kryterium bezpiecznej pracy. Badaniom poddano materiały różniące się właściwościami, mikrostrukturą oraz przede wszystkim mechanizmami odkształcenia plastycznego i rozwoju uszkodzenia. Jednocześnie zaprezentowano różne rozwiązania proceduralne w zakresie oceny stanu technicznego konstrukcji z wykorzystaniem prostych urządzeń diagnostycznych, a także dokonano weryfikacji uzyskanych wyników z zastosowaniem innych technik nieniszczących.

### 1.1.2 Zakres pracy

Praca obejmuje badania z wykorzystaniem metody prądów wirowych w ocenie rozwoju uszkodzeń inicjowanych w materiałach konstrukcyjnych pod wpływem statycznych i dynamicznych obciążeń mechanicznych symulujących obciążenia eksploatacyjne przy jednoczesnej próbie opisu rozwoju tych uszkodzeń oraz weryfikacji uzyskanych rezultatów na podstawie wyników pomiarów innymi technikami nieniszczącymi. Badaniom w zakresie testów zmęczeniowych z jednoczesną rejestracją zmian właściwości elektromagnetycznych poddano zarówno materiały ferromagnetyczne (stale węglowe i stopowe), jak i nieferromagnetyczne (stopy niklu, aluminium, stale austenityczne). Miało to na celu pokazanie wpływu właściwości magnetycznych materiału na możliwość identyfikacji defektów struktury z wykorzystaniem różnych technik opartych na zjawisku indukcji magnetycznej.



W pracy przedstawiono ponadto możliwości zastosowania metody prądów wirowych w detekcji, lokalizacji oraz opisie różnego typu uszkodzeń, zarówno technologicznych, jak i eksploatacyjnych. Uszkodzenia te były identyfikowane w wyniku interakcji wzbudzanego w badanym materiale pola magnetycznego z nieciągłościami struktury tego materiału lub lokalnymi zmianami jego właściwości. Na rysunku 1.1 przedstawiono zestawienie uszkodzeń wykrytych dzięki możliwościom metody z uwzględnieniem zjawisk i procesów odpowiedzialnych za ich powstawanie.



Rysunek 1.1. Klasyfikacja uszkodzeń identyfikowanych metodą prądów wirowych w zależności od wywołujących je procesów oraz mechanizmów ich rozwoju.

Schemat ukazuje różnorodność uszkodzeń w różnym stadium rozwoju, które mogą być ujawnione, a w niektórych przypadkach także opisane za pomocą techniki prądów wirowych. Dobrym przykładem jest uszkodzenie zmęczeniowe

powstające w zależności od koncentracji naprężenia oraz lokalnego rozwoju odkształcenia plastycznego.

Głównym przedmiotem pracy było wykazanie, że możliwa jest korelacja parametrów sygnału uzyskanego dzięki indukcji prądów wirowych z makroskopowymi parametrami technik niszczących opisującymi rozwój uszkodzenia we wczesnym etapie jego rozwoju, na przykład na podstawie przyrostu składowych odkształcenia niesprężystego w kolejnych cyklach obciążenia zmiennego.

Dodatkowym celem pracy było wskazanie niestandardowego wykorzystania potencjału defektoskopii prądowirowej w detekcji i opisie defektów powstających w materiałach przewodzących w procesie ich wytwarzania i kształtowania oraz podczas eksploatacji. Prezentowane wyniki wykazują skuteczność metody prądów wirowych w wykrywaniu i opisie przypałów szlifierskich oraz obszarów poddanych degradacji wodorowej. Tym samym mogą stanowić podstawę do opracowania instrukcji metodycznych gotowych do komercjalizacji w odpowiednich branżach przemysłowych.

W prezentowanej pracy metoda prądów wirowych została wykorzystana w zakresie analizy subtelnych zmian charakterystyk prądowych, mierzonych parametrami impedancji, uzyskanych przed pojawieniem się pęknięcia dominującego, czyli na etapie pojawienia się zmian w strukturze materiału wskutek oddziaływania czynników zewnętrznych. Wyniki uzyskano, stosując procedurę skanowania powierzchni materiału badanej próbki i badając efekt oddalenia związany z przyłożeniem sondy do powierzchni.

# Metoda prądów wirowych

W tym rozdziale przybliżono fizyczne podstawy metody prądów wirowych oraz przedstawiono jej możliwości pomiarowe i ograniczenia. Opisano jej zastosowania w obszarze defektoskopii na tle innych metod nieniszczących, ze wskazaniem najpopularniejszych aplikacji w diagnostyce przemysłowej, a także w zakresie oceny grubości i twardości warstw oraz powłok. Wymieniono przykłady wykorzystania prądów wirowych w badaniach strukturalnych, w których zjawiska zachodzące w materiale pod wpływem czynników zewnętrznych (mechanicznych, termicznych, środowiskowych) mogą być identyfikowane i opisane za pomocą sygnału prądów wirowych.

## 2.1 Opis metody

Metoda prądów wirowych (ET – *Eddy Current Testing*) należy do grupy metod elektromagnetycznych, w której wykorzystuje się zjawisko indukcji elektromagnetycznej do lokalizacji pęknięć powierzchniowych i podpowierzchniowych, oceny grubości warstw i powłok oraz identyfikacji metali i stopów. Metoda ma charakter powierzchniowy i umożliwia badanie tylko materiałów przewodzących, co wynika ze specyfiki indukcji prądów wirowych. Głębokość wnikania prądów wirowych zależy od przewodności elektrycznej ( $\sigma$ ) i przenikalności magnetycznej ( $\mu_r$ ) materiału, w którym są one indukowane, oraz od częstotliwości prądu wzbudzającego, zgodnie z zależnością (2.1) na tzw. standardową głębokość wnikania:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \sigma f \mu_r}}, \quad (2.1)$$

gdzie  $\delta$  – głębokość wnikania pola magnetycznego w materiał [mm],  $f$  – częstotliwość pracy przetwornika [Hz],  $\sigma$  – przewodność elektryczna właściwa materiału [S/m],  $\mu_r$  – względna przenikalność magnetyczna materiału.

Realna głębokość wnikania indukowanych prądów wirowych sięga od ułamków milimetra dla silnych ferromagnetyków, do kilkunastu milimetrów dla materiałów para- i diamagnetycznych.

Występujące w materiale defekty, zmiany grubości lub struktury wpływają na przepływ prądów wirowych oraz na pole magnetyczne indukowane sondą, a ostatecznie na fazę napięcia w cewce sondy, co umożliwia detekcję wspomnianych zmian. Analiza parametrów impedancji uzyskanych metodą ET może być prowadzona także na poziomie subtelnych zmian charakterystyki materiału przed pojawieniem się pęknięć. Wykazuje ona zależność parametrów prądów wirowych, takich jak kąt fazowy sygnału wzbudzanego w materiale, nie tylko od zmiany stanu naprężenia, ale też od innych czynników związanych z procesami degradacji mikrostruktury w warunkach obciążeń zmęczeniowych. Nieciągłości materiałowe (np. pęknięcia) powodują zmianę rozkładu pola prądów wirowych przede wszystkim wskutek lokalnej zmiany przewodności elektrycznej, a w przypadku obiektów z materiałów ferromagnetycznych – przenikalności magnetycznej. Rozpływ prądów wirowych zależy zatem od mikrostrukturalnych i makrostrukturalnych właściwości materiału, czyli od występowania pęknięć, wtrąceń, segregacji, ale także od rodzaju struktury metalograficznej, twardości, koncentracji naprężenia i innych cech materiałowych. Otrzymywane z cewki sygnały dają informacje o zmianach tych właściwości w badanym obiekcie.

Metoda prądów wirowych jest metodą porównawczą, wymagającą stosowania próbek referencyjnych lub wzorców (certyfikowanych próbek odniesienia), o zdefiniowanych parametrach (liczbie i rodzaju defektów, konduktywności, grubości) koniecznych do kalibracji sygnału. Jest ona wykorzystywana w diagnostyce przemysłowej w branży chemicznej, maszynowej, lotniczej, rafineryjnej, cukrowniczej, papierniczej, spożywczej, kosmicznej, ze szczególnym uwzględnieniem badania rurek wymienników ciepła i chłodnic rurowych.

## 2.2 Inne metody oparte na zjawisku indukcji magnetycznej

Zjawisko indukcji magnetycznej jest wykorzystywane w wielu technikach pomiarowo-badawczych, które identyfikowane są jako metody prądowirowe (lub wiroprądowe, choć ta nazwa sugeruje, że wykorzystywane są wiry prądowe, a nie prądy wirowe). Można tu wymienić między innymi technikę ECA (*Eddy Current Array*), wykorzystującą sondy wielocewkowe i multiplikację sygnałów, czy technikę pulsacyjnych prądów wirowych (PEC – *Pulsed Eddy Current*) polegającą na pomiarze okresów wygasania prądów penetrujących w głąb materiału, umożliwiającej pomiary porównawcze grubości elementów (np. ścian rur) przez izolację, bez konieczności jej demontażu. Inne techniki dedykowane do inspekcji rurek i otworów wymagają kompensacji efektu naskórkowości związanego z silną koncentracją prądów wirowych przy powierzchni. Zjawisko to hamuje wni-

kanie prądów wirowych w głąb materiału, ograniczając ich stosowanie, szczególnie w badaniu materiałów ferromagnetycznych. Skutecznym rozwiązaniem jest badanie w polu dalekim (RFT – *Remote Field Testing*) redukującym efekt naskórkowości przez zastosowanie dwóch cewek badawczych, z których jedna, rejestrująca sygnał, oddalona jest od cewki wzbudzającej prądy wirowe silnym polem magnetycznym. Z kolei technikę badania w polu bliskim (NFT – *Near Field Testing*) stosuje się w badaniach, w których konieczne jest ograniczenie głębokości wnikania prądów wirowych.

## 2.3 Prądy wirowe w diagnostyce przemysłowej

Początki stosowania metody prądów wirowych w detekcji uszkodzeń sięgają 1933 r., gdy Friedrich Förster wykorzystał zjawisko indukcji prądów wirowych, opracowując przyrządy do pomiaru przewodności elementów z metali i stopów oraz do ich sortowania. W 1948 roku powstała firma Förster, która wprowadziła na rynek pierwsze defektoskopy prądowirowe. W tym samym roku pojawiały się pierwsze wyniki badań potwierdzających skuteczność metody ET w detekcji uszkodzeń, zarówno w materiałach ferro-, jak i nieferromagnetycznych [38]. Obecnie metoda prądów wirowych jest powszechnie stosowana w diagnostyce przemysłowej w zakresie detekcji defektów powierzchniowych i podpowierzchniowych.

Metoda prądów wirowych jest jedną z dziesięciu metod nieniszczących, dla których określono, normą PN-EN ISO 9712:2012, wymagania dotyczące zasad kwalifikacji i certyfikacji personelu wykonującego przemysłowe badania nieniszczące. Tym samym należy ona do metod znormalizowanych, których stosowanie wymaga przeszkolenia kadry oraz ustalania systemowych procedur pomiarowo-badawczych.

Wśród metod nieniszczących objętych wymaganiami norm można wymienić:

- emisję akustyczną;
- prądy wirowe;
- termografię w podczerwieni;
- badania szczelności (z wyłączeniem ciśnieniowych prób hydraulicznych);
- badania magnetyczne;
- badania penetracyjne;
- badania radiograficzne;
- badania tensometryczne;

- badania ultradźwiękowe;
- badania wizualne.

Według normy PN-EN ISO 12718:2019-12 opisującej terminologię w badaniach metodą prądów wirowych jest to: „metoda badań nieniszczących, wykorzystująca zjawiska elektromagnetyczne wzbudzanych prądów do oceny badanego obiektu”, a prądy wirowe są definiowane jako „prąd elektryczny wzbudzony w materiale przewodzącym przez zmienne pole magnetyczne”. Jak większość wymienionych wyżej technik jest to metoda badań powierzchniowych, w której wynik ilościowy otrzymuje się przez analizę porównawczą z sygnałem referencyjnym uzyskiwanym na próbce odniesienia lub na wzorcu. Z kolei do metod objętościowych zalicza się metody badań ultradźwiękowych (UT – *Ultrasonic Testing*) oraz rentgenowskich, zarówno radiologicznych, jak i radiograficznych (RT – *Radiographic, Radiologic Testing*).

Zastosowanie metody prądów wirowych w przemyśle obejmuje przede wszystkim defektoskopię, czyli detekcję nieciągłości materiałowych, a w szczególności wykrywanie: pęknięć, zawalcowań, wtrąceń, ubytków korozyjnych i erozyjnych, wad spawalniczych, porowatości.

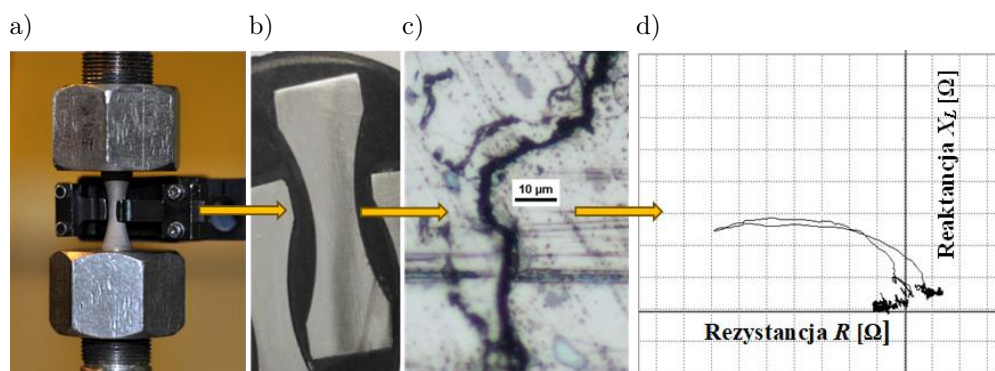
Drugi obszar zastosowań metody ET to ocena grubości warstw wierzchnich i powłok oraz folii metalicznych. Możliwości oceny dotyczą zarówno powłok nieprzewodzących (farby, lakiery) na podłożach metalicznych (konduktywnych), jak i powłok metalicznych ferro- oraz nieferromagnetycznych. Najlepsze rezultaty w tym zakresie uzyskuje się dla układów, w których powłoka i podłoże różnią się cechami magnetycznymi, czyli podłoże jest ferromagnetyczne, powłoka zaś para- lub diamagnetyczna (lub odwrotnie, np. powłoki chromowe na stali lub cynkowe na żeliwie). Precyzyjna ocena grubości dotyczy powłok o charakterze adhezyjnym, ale metoda prądów wirowych daje także możliwość oceny grubości warstw uzyskiwanych w wyniku obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej (warstwy hartowane indukcyjnie, nawęglane), gdzie w wyniku dyfuzji uzyskuje się gradient składu od powierzchni do rdzenia. Ocena grubości w takim przypadku jest możliwa przy zachowaniu warunku różnicy konduktywności materiału warstwy i podłoża o wartości co najmniej 1 MS/m oraz przy ograniczonej grubości warstwy i strefy gradientowej.

Trzecim zastosowaniem metody prądów wirowych zarówno w przemyśle, jak i w badaniach naukowych jest strukturoskopia, czyli jakościowa (w pewnych przypadkach także ilościowa) ocena cech funkcjonalnych (np. twardości). Strukturoskopia w praktyce przemysłowej stanowi pewnego rodzaju metodę prewencji, dzięki której istnieje możliwość ograniczenia ryzyka powstawania defektów, które z kolei identyfikowane są dzięki defektoskopii.

## 2.4 Defektoskopia prądowirowa

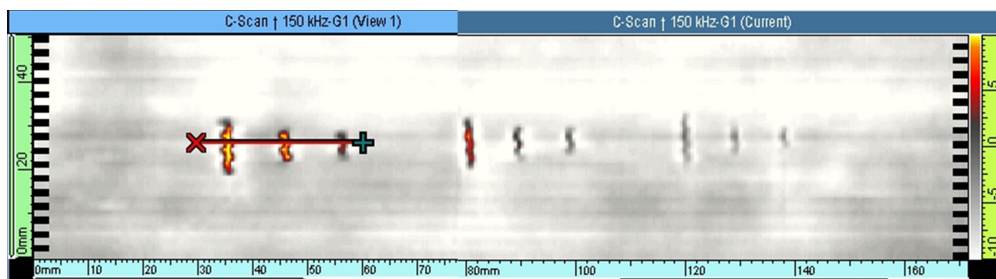
Prądy wirowe są powszechnie wykorzystywane do diagnostycznych badań defektoskopowych, gdzie celem jest detekcja nieciągłości, najczęściej w postaci pęknięć eksploatacyjnych w konstrukcyjnych materiałach przewodzących. Są to przeważnie metale i ich stopy, ale także kompozyty wzmacniane ciągłym włóknem węglowym, które wykazuje przewodnictwo elektronowe, co umożliwia zastosowanie metody ET do wykrycia nieciągłości takich włókien w strukturach kompozytowych [39] lub w ocenie jednorodności ich rozkładu w laminatach [40]. Rozdzielczość metody umożliwia identyfikację nieciągłości liniowej o szerokości od około  $0,5 \mu\text{m}$ , przy minimalnej głębokości wady  $0,4 \text{ mm}$  oraz długości nie mniejszej niż  $0,6 \text{ mm}$ . Nawet wady o tak niewielkim wymiarze powodują zaburzenie linii prądów wirowych indukowanych w materiale, dając zobrazowanie na ekranie defektoskopu w postaci skokowej zmiany impedancji. Taki efekt można uzyskać pod warunkiem zachowania optymalnych parametrów badania (częstotliwość, prąd wzbudzenia, wzmocnienie) oraz odpowiedniej gładkości badanej powierzchni. Z uwagi na mechanizm powstawania prądów wirowych w materiale przewodzącym, które tworzą koncentryczne pętle rozchodzące się równoległe do badanej powierzchni, najlepiej wykrywane są nieciągłości zorientowane prostopadle do powierzchni.

Możliwości metody ET w zakresie identyfikacji pęknięcia zmęczeniowego wygenerowanego w próbie zmęczenia wysokocyklowego stali 15HM pokazano na rysunku 2.1 w postaci zmiany impedancji.



Rysunek 2.1. Detekcja pęknięcia zmęczeniowego o szerokości poniżej  $5 \mu\text{m}$  powstałego w wyniku cyklicznych obciążeń zmiennych (a), wykonanie przekroju wzdłużnego (b), ocena szerokości pęknięcia na zglądzie metalograficznym (c) oraz sygnał prądów wirowych w trybie skanowania powierzchni (d) [badania własne].

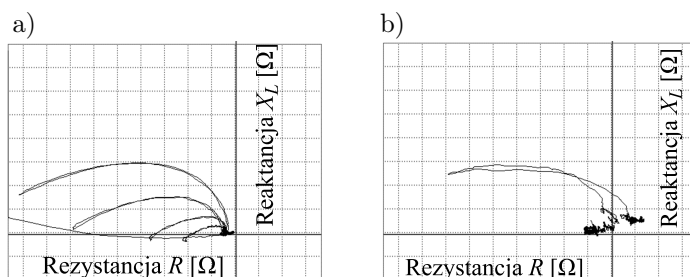
Badania defektoskopowe metodą prądów wirowych mogą być realizowane z użyciem klasycznych sond jedno- (absolutne) lub dwucewkowych (różnicowe). W przypadku detali o większej powierzchni preferowane jest stosowanie techniki ECA, wykorzystującej sondy wielocewkowe (obecnie nawet do 128 cewek), która znacząco przyspiesza badanie. Na rysunku 2.2 pokazano C-skan, uzyskany wspomnianą wyżej metodą ECA, próbki referencyjnej z zestawem nieciągłości wzorcowych o trzech różnych długościach (5, 10 i 20 mm) i głębokościach (0,2; 0,5 i 1 mm), prezentujący możliwości obrazowania głębokości wad w paście barw. Technika ta została wykorzystana przez autora w diagnostyce otworów centralnych, a także luf czołgowych.



Rysunek 2.2. C-skan z odwzorowaniem wad na powierzchni próbki referencyjnej [badania własne].

W detekcji uszkodzeń stosuje się także technikę cewki wirującej, dedykowaną do badania powierzchni wewnętrznej otworów. Umożliwia ona wykrywanie nieciągłości zarówno wzdłużnych, jak i obwodowych w jednym ruchu sondy skanującej.

Na rysunku 2.3 pokazano przebiegi zmian impedancji ( $Z$ ) powierzchniowej próbki wzorcowej dla czterech nacięć referencyjnych o ustalonej głębokości 0,1;



Rysunek 2.3. Przebieg zmian impedancji dla różnych nieciągłości referencyjnych (a) oraz rzeczywistej wady (b) [badania własne].



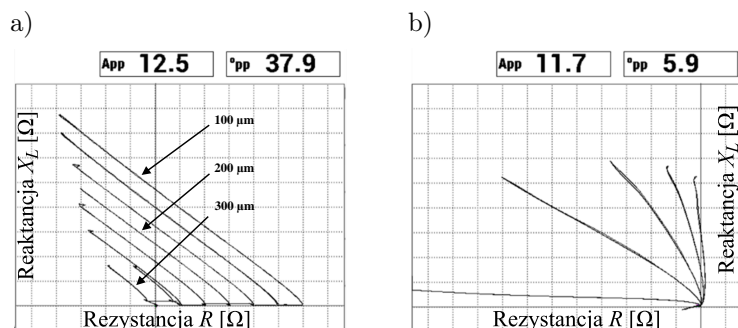
0,2; 0,5 i 1,0 mm (rys. 2.3a) oraz zmiany impedancji dla defektu, który podlega ocenie (rys. 2.3b). Wyniki prezentowane są na płaszczyźnie zespolonej w postaci zależności między rezystancją badanego materiału  $R$ , czyli oporem czynnym, a reaktancją  $X_L$ , czyli indukcyjnym oporem biernym. Na podstawie porównania wielkości sygnałów dokonuje się jakościowej oceny uzyskanych wskazań.

W nowoczesnych defektoskopach dostępne są funkcje zapewniające pomiar impedancji w postaci jej amplitudy (APP) oraz kąta fazowego ( $^{\circ}$ pp). Dzięki temu możliwa jest ocena o charakterze ilościowym, w której wielkość nieciągłości (głębokość) szacowana jest na podstawie wartości amplitudy sygnału, a głębokość jej zalegania w zależności od wartości kąta fazowego. Parametry badania, przede wszystkim częstotliwość, optymalizowane są przez wskazania uzyskane na wzorcu.

## 2.5 Ocena grubości warstw i powłok z zastosowaniem prądów wirowych

Metoda prądów wirowych daje także możliwość oceny grubości powłok oraz warstw przy założeniu konduktywności materiału podłoża lub/i warstwy. Ocena odbywa się poprzez przyłożenie i oddalenie (stąd efekt oddalenia – „lift off”) sondy pomiarowej do badanej powierzchni, co pozwala uzyskać przebieg zmian impedancji pomiędzy powietrzem a badanym detalem. Pomiar realizowany jest tak samo w przypadku mierników komercyjnych, jak i defektoskopów, co szczegółowo opisano w pracy [41], gdzie dokonano porównania nieniszczących technik oceny grubości powłok chromowych na stali 15HM i staliwie GX30CrSi7.

Do pomiarów grubości powłok nieprzewodzących (niekonduktywnych) na podłożach z materiałów przewodzących wykorzystywany jest spadek natężenia prądów wirowych w funkcji odległości sondy od przewodzącego (konduktywnego) podłoża, czyli w zależności od grubości powłoki. W takim przypadku mierzona jest zmiana amplitudy sygnału otrzymanego przy zbliżeniu i przy oddaleniu sondy od powierzchni badanej (efekt oddalenia) i porównywana ze wskazaniami na wzorcach o zdefiniowanej grubości warstwy (rys. 2.4a). W przypadku powłok konduktywnych ocena odbywa się na podstawie zmiany kąta fazowego sygnału uzyskanego w wyniku oddalenia sondy. W badaniach tego typu wskazany jest pomiar przewodności elektrycznej materiału warstwy i podłoża, a w przypadku materiału ferromagnetycznego także przenikalności magnetycznej. Znajomość tych parametrów pozwala ocenić możliwości wykorzystania metody ET do szacowania grubości warstwy (różnice w przewodności powyżej 1 MS/m), a także dobrać optymalną częstotliwość badania w zależności od wymaganej głębokości wnikania [42].



Rysunek 2.4. Trajektorie zmian impedancji dla różnej grubości powłok niekonduktywnych (a) i konduktywnych (b) [badania własne].

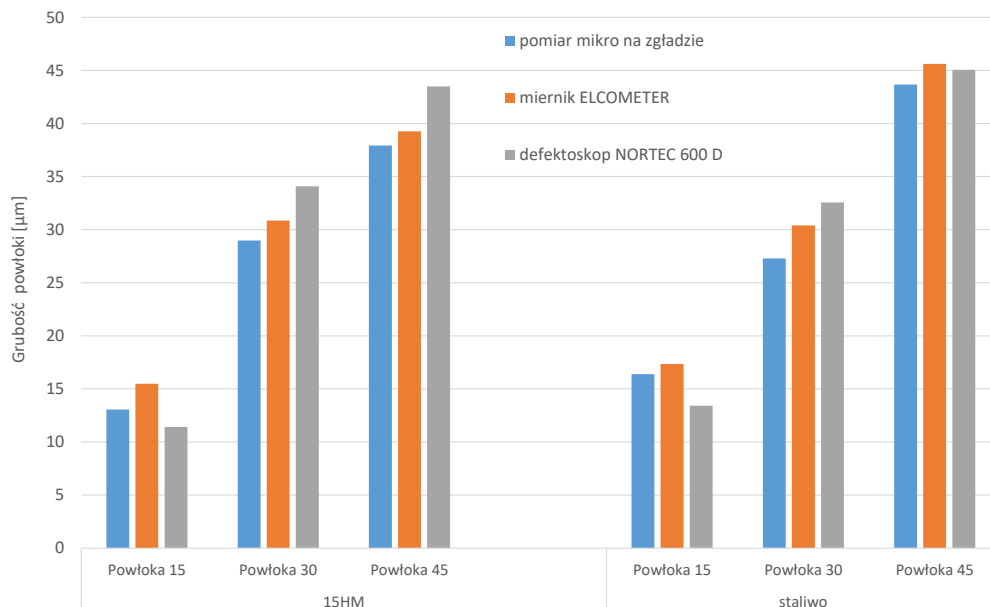
Na rysunku 2.4 pokazano trajektorie zmian impedancji w wyniku oddalenia sondy dla powierzchni pokrytych powłokami niekonduktywnymi (rys. 2.4a) oraz konduktywnymi (rys. 2.4b) o różnej grubości.

W przypadku powłok niekonduktywnych o grubości w zakresie 100–300  $\mu\text{m}$ , oceniając zmiany amplitudy sygnału, można zidentyfikować zmiany grubości warstwy o wartości około 30  $\mu\text{m}$ . W przypadku powłok konduktywnych zmiany kąta fazowego wskazują na wyraźne różnice grubości o wartościach 100, 200, 300 i 400  $\mu\text{m}$ .

W zależności od liczby i jakości posiadanych wzorców oraz precyzji kalibracji parametrów defektoskopu możliwe jest wykrycie zmian grubości powłok nieprzewodzących o wartości od 5  $\mu\text{m}$ , przy zachowaniu powtarzalności procedury wykonywania pomiaru, oraz nawet od 2  $\mu\text{m}$  w przypadku powłok przewodzących.

Na rysunku 2.5 przedstawiono wyniki pomiarów grubości powłok chromowych na dwóch typach podłoża (stal kotłowa 15HM oraz staliwo żaroodporne GX30CrSi7). Parametry procesu chromowania elektrolitycznego zostały tak dobrane, aby grubości powłoki wynosiły 15, 30 oraz 45  $\mu\text{m}$ . Wyniki pomiarów przeprowadzonych z zastosowaniem komercyjnego miernika grubości ELCOMETER oraz defektoskopu prądowirowego NORTEC porównano z wynikami pomiarów wykonanych na zglądach przekroju poprzecznego ujawniających zarówno strukturę, jak i grubość (głębokość) powłok. Zbieżność wyników potwierdza skuteczność nieniszczących technik oceny grubości powłok konduktywnych. Szczegółowy opis badań i uzyskanych wyników dostępne są w pracy [41].

Wyniki wskazują zbieżność wartości uzyskanych metodami nieniszczącymi z najbardziej wiarygodnymi wynikami badań metalograficznych przekrojów poprzecznych, choć w obu materiałach nie udało się uzyskać zakładanych grubości



Rysunek 2.5. Wyniki pomiarów grubości powłok chromowych uzyskanych różnymi technikami pomiarowymi, na podłożu ze stali 15HM oraz staliwo GX30CrSi7 [41].

wynikających z parametrów procesu chromowania. Tym niemniej rozrzut wyników nie przekraczał 8%. W przypadku badania z wykorzystaniem metody prądów wirowych najlepsze rezultaty uzyskano przy częstotliwości 5 MHz, przy której głębokość indukcji prądów wirowych była ograniczona do kilkudziesięciu mikrometrów.

Prądy wirowe stosowane są, na mniejszą skalę, do oceny grubości warstw wytworzonych w procesach obróbki cieplnej lub cieplnochemicznej. Problemem w ocenie grubości jest dyfuzyjny charakter warstw i występujący gradient stężenia pierwiastków czy faz tworzących warstwę, na przykład warstwę nawęglaną. Badania w tym zakresie wymagają precyzyjnego przygotowania zestawów referencyjnych o ustalonym zakresie grubości powłok, w których zostanie zminimalizowany wpływ na zmianę mierzonej impedancji takich czynników jak twardość czy grubość strefy nadmiernie odpuszczonej. Szczegóły prowadzonych badań własnych oraz uzyskane wyniki dotyczące oceny grubości warstw nawęglanych opisano w pracy [43], a wyniki badań warstw hartowanych indukcyjnie w pracach [44, 45].

## 2.6 Ocena stanu technicznego rur

W diagnostyce przemysłowej metoda prądów wirowych jest najczęściej stosowana do oceny stanu technicznego rur wymienników ciepła. Wymienniki eksploatowane są w warunkach sprzyjających korozji i erozji. Są też poddawane zmiennemu naprężeniu zarówno cieplnemu, jak i mechanicznemu (o cechach statycznych i dynamicznych), co może wynikać z drgań instalacji powodowanych dynamiką przepływu mediów. W związku z tym do zapewnienia bezpieczeństwa pracy wskazana jest diagnostyka tych urządzeń. Z uwagi na ograniczony dostęp do rurek w wymienniku ciepła (rysunek 2.6) – w wymiennikach dostęp do rur jest tylko od strony dna sitowego – ocena ich stanu możliwa jest z zastosowaniem wybranych metod nieniszczących, wykorzystujących sondy lub głowice wewnętrzne. Takie cechy mają techniki oparte na metodzie prądów wirowych gwarantujące ocenę niemal całej objętości materiału rury poprzez wprowadzenie do niej sondy badawczej.



Rysunek 2.6. Rurowy wymiennik ciepła z przykładowymi defektami w postaci ubytków erozyjnych i korozyjnych.

W zależności od materiału rur i jego właściwości magnetycznych oraz charakteru defektów, które mają podlegać detekcji, stosuje się różne techniki badawcze. Najczęściej stosowane są:

- klasyczna metoda prądów wirowych – ECT (*Eddy Current Testing*);
- badanie w polu dalekim – RFT (*Remote Field Testing*);
- badanie w polu bliskim – NFT (*Near Field Testing*);
- wyciek magnetyczny – MFL (*Magnetic Flux Leakage*);

- prądy wirowe z wykorzystaniem sond wielocewkowych – ECA (*Eddy Current Array*);
- pulsacyjne prądy wirowe – PEC (*Pulsed Eddy Current*);
- badanie RFT z zewnętrzną referencją – XRFT (*Externally Referenced Remote*);
- pomiar pola magnetycznego prądu przemiennego – ACFM (*Alternating Current Field Measurement*).

Badanie rurek wymienionymi wyżej technikami jest przeprowadzane przez skanowanie wnętrza rur sondą pomiarową, która wzbudzając pole magnetyczne w całej grubości ścianki rury, pozwala zidentyfikować zarówno wewnętrzne, jak i zewnętrzne defekty będące skutkiem korozji, erozji, perforacji, wżerów, pęknięć zmęczeniowych, zagnieceń i wytarć oraz korozji międzykrystalicznej i naprężeniowej. Sonda badawcza powinna mieć odpowiednią średnicę, mieszczącą się w zakresie określonym przez tzw. współczynnik wypełnienia ( $\eta$ ). Współczynnik ten jest równy stosunkowi kwadratów średnicy sondy i średnicy badanej rurki:

$$\eta = \frac{d^2}{D^2}, \quad (2.2)$$

gdzie  $d$  – średnica sondy,  $D$  – średnica rurki.

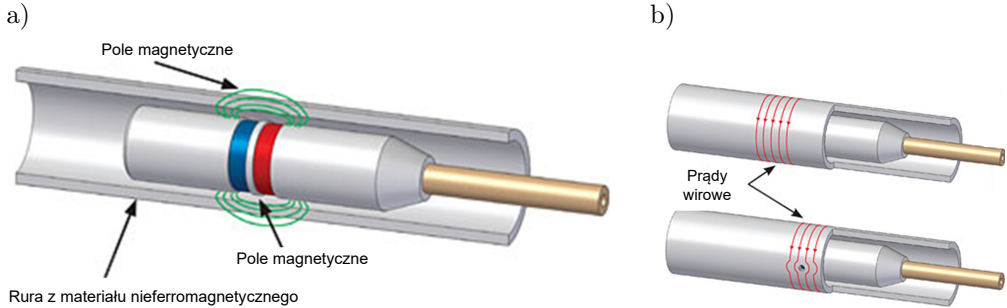
W badaniach rurek metodami elektromagnetycznymi zalecane jest zachowanie tego stosunku o wartości nie mniejszej niż 0,7. Obecnie najpopularniejsze techniki stosowane do oceny stanu technicznego wymienników ciepła to: ECT – dedykowana dla rur z materiałów nieferromagnetycznych, oraz RFT i NFT – przeznaczone do badań rur ferromagnetycznych.

### Metoda ECT

Jest to klasyczna metoda elektromagnetyczna polegająca na indukcji prądów wirowych w materiale nieferromagnetycznym. Technika ta jest przeznaczona do wykrywania i wymiarowania nieciągłości będących efektem korozji, erozji, zużycia, ubytków grubości, pęknięć i perforacji.

Zasada działania sondy w metodzie ECT została przedstawiona schematycznie na rysunku 2.7a. Pole magnetyczne indukowane wokół dwóch cewek wzbudzonych prądem zmiennym przenika nieferromagnetyczny materiał rury i generuje prądy wirowe. Rozkład prądów wirowych jest zaburzany przez wady w materiale (rysunek 2.7b), co wpływa na zmiany impedancji cewek.

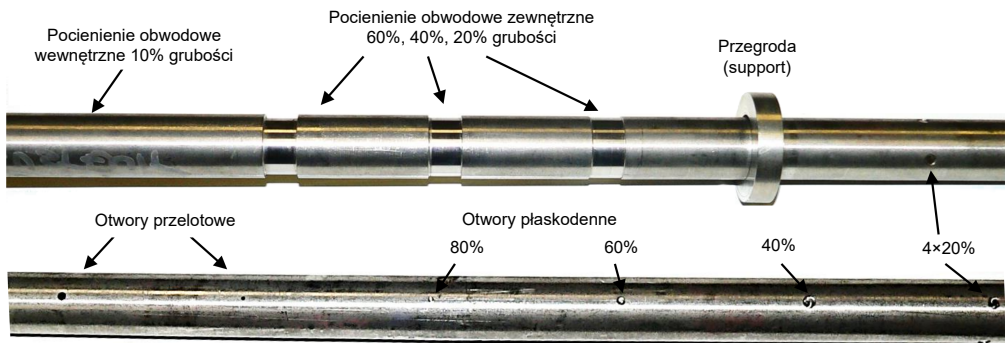
Metoda dedykowana jest do detekcji wad w stalach austenitycznych, stopach tytanu i miedzi (brązy i mosiądze). W przypadku rur z materiałów ferromagnetycznych możliwa jest tylko detekcja wewnętrznych defektów powierzchniowych



Rysunek 2.7. Schemat działania sondy w metodzie ECT (a) oraz zasada detekcji uszkodzenia (b) [46].

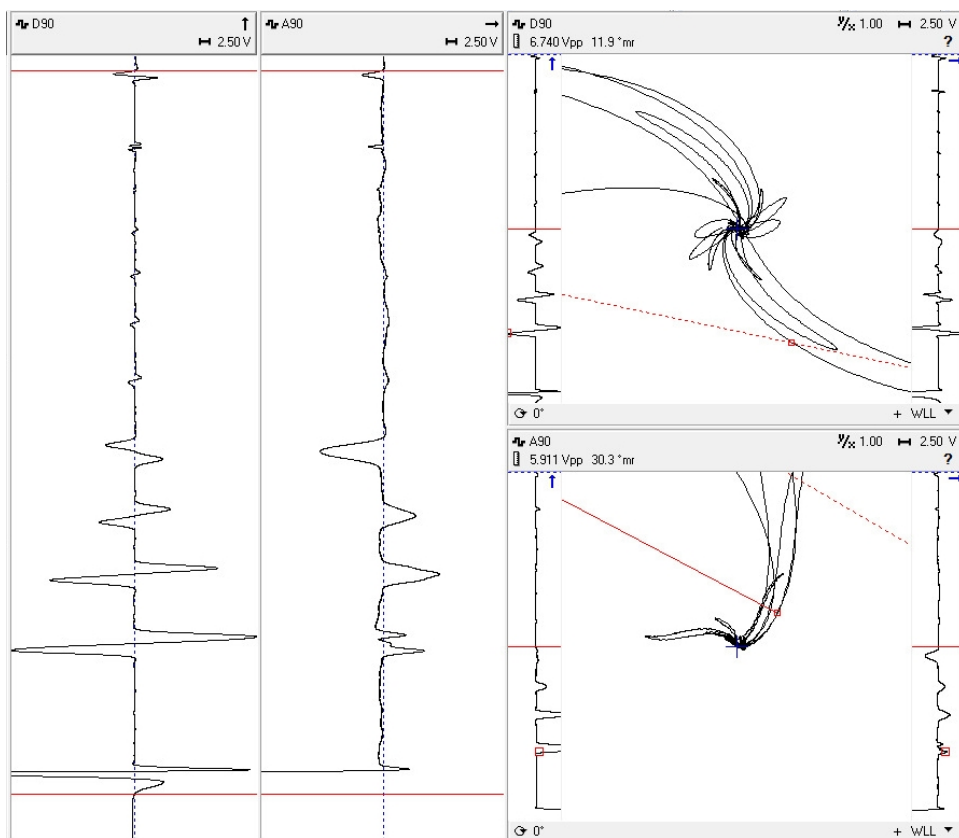
od wewnętrznej strony rury z uwagi na ograniczone wnikanie prądów wirowych (efekt naskórkowości). Metoda ECT stosowana w nieferromagnetykach pozwala wykrywać defekty zarówno na wewnętrznej, jak i zewnętrznej powierzchni rury.

Ponieważ metoda prądów wirowych jest techniką porównawczą, wymagana jest kalibracja urządzenia na wzorcu lub próbce referencyjnej. Wzorec taki powinien mieć lokalne podtoczenia do głębokości 20, 40 i 60% nominalnej grubości ścianki rurki, podtoczenie wewnętrzne (10%) oraz otwory płaskodenne i otwór przelotowy. Wskazane jest także zastosowanie pierścienia symulującego przegrodę, aby można było wyeliminować wskazania pochodzące od przegród podczas badania wymiennika. Wykonanie kalibracji z użyciem wzorca umożliwia określenie charakteru defektów zidentyfikowanych podczas badania oraz ich precyzyjne zwymiarowanie. Przykładowy wzorec przeznaczony do kalibracji defektoskopu przy badaniu rurek z materiału nieferromagnetycznego pokazano na rysunku 2.8.



Rysunek 2.8. Wzorec rurowy ze stali 316 z ubytkami obwodowymi i suportem imitującym przegrodę (u góry) oraz punktowymi defektami w postaci otworów płaskodennych i przelotowych (u dołu) [zdjęcie własne].

W nowoczesnych systemach badawczych wykorzystujących technikę ECT możliwa jest analiza sygnału otrzymanego zarówno w trybie sondy absolutnej (pojedyncza cewka), jak i sondy różnicowej (dwie cewki). W trybie cewki absolutnej lepiej identyfikowane są defekty stopniowe o charakterze objętościowym, takie jak erozja materiału. Z kolei tryb różnicowy jest bardziej wrażliwy na defekty lokalne, takie jak korozja, wżery czy pęknięcia. Przebieg sygnału w obu trybach wraz z charakterem wskazań pokazano na rysunku 2.9.



Rysunek 2.9. Przebieg sygnału uzyskanego na wzorcu rurowym dla kanału różnicowego D oraz absolutnego A w funkcji czasu oraz na płaszczyźnie impedancyjnej, gdzie widać zmiany amplitudy i kąta fazowego dla poszczególnych sygnałów od defektów referencyjnych (przebiegi impedancyjne uzyskane w programie MultiView) [badania własne].

Sondy do badania techniką ETC dostępne są w komercyjnej ofercie takich producentów, jak OLYMPUS, EDDYFI oraz ZETEC. Są one dedykowane do badań rur z metali nieferromagnetycznych o średnicach w zakresie od 9 do 120 mm.

Badanie realizowane przez skanowanie rury może odbywać się z prędkością do 10 m/s. Duże szybkości skanowania uzyskuje się dzięki zastosowaniu pistoletów pneumatycznych (*airgun*) lub innego typu automatycznych „popychaczy”, co pozwala znacząco przyspieszyć procedurę wprowadzania sondy ECT do rurek badanego wymiennika, a także, dzięki użyciu enkodera zintegrowanego z urządzeniem wprowadzającym sondę, zwiększa dokładność lokalizacji defektów. Tego typu akcesoria dedykowane są wyłącznie do metody ECT.

### Metoda RFT

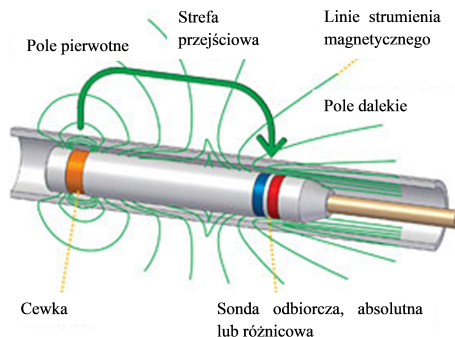
Jest to metoda przeznaczona do badania rurek z materiału ferromagnetycznego. W tym przypadku poważnym ograniczeniem w zakresie głębokości wnikań prądów wirowych jest duża wartość przenikalności magnetycznej. Jak wynika z zależności określającej głębokość wnikań, jej wartość jest odwrotnie proporcjonalna do przenikalności magnetycznej. Powoduje to intensyfikację efektu nasłórkowości, czyli ograniczenie indukcji prądów wirowych w ferromagnetykach do obszaru powierzchniowego.

Sonda do badania techniką RFT składa się z cewki wzbudzającej prądu wirowe w materiale rury oraz cewki odbiorczej, znajdującej się w odległości 2–3 średnic rury od cewki wzbudzającej, czyli w tzw. strefie oddziaływania „pola dalekiego”. Pierwotne pole magnetyczne rozchodzi się wzdłuż rury przez jej ściany i dociera do cewki odbiorczej. Defekty, zlokalizowane zarówno na wewnętrznej, jak i zewnętrznej powierzchni rury, powodują „zniekształcenie” pola docierającego do detektora. Dzięki ocenie parametrów dalekiego pola magnetycznego oraz pierwotnego pola magnetycznego możliwa jest identyfikacja tych wad, a także oszacowanie ich wielkości z wykorzystaniem analizy porównawczej z sygnałami od wzorca.

Schemat wyjaśniający działanie sondy w technice RFT jest przedstawiony na rysunku 2.10. Technika ta jest z reguły stosowna do badania rur z materiałów ferromagnetycznych w podgrzewaczach przepływowych, wymiennikach ciepła, piecach oraz chłodnicach. Z powodzeniem identyfikowane są defekty objętościowe, natomiast w porównaniu z techniką ECT, mniejsza jest skuteczność w detekcji wad punktowych (wżery korozyjne czy nawet małe perforacje). W porównaniu z klasyczną techniką ECT ograniczona jest także szybkość skanowania, ponieważ wskazane jest, aby cewki sondy odbiorczej pozostawały cały czas w obszarze „pola dalekiego”. W zależności od stosowanej częstotliwości wzbudzenia szybkość skanowania powinna mieścić się w przedziale 0,1–0,6 m/s.

Tak jak we wszystkich technikach bazujących na metodzie prądów wirowych, w metodzie RFT do przeprowadzenia kalibracji sygnału konieczne jest stosowanie próbek wzorcowych (referencyjnych). Wzorce te powinny mieć podtocze-





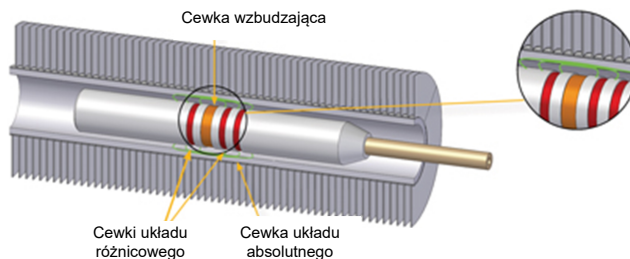
Rysunek 2.10. Schemat działania sondy w metodzie RFT [46].

nia o różnej długości, imitujące ubytki erozyjne zarówno krótkie, jak i długie oraz otwory płaskodenne imitujące wżery i ubytki lokalne. Wskazane jest także uwzględnienie wzorca przegrody, aby możliwe było zredukowanie sygnałów, które mogą zakłócać wskazania od defektów. Wielkości wad referencyjnych uzależnione są od średnicy rurki, a wytyczne co do ich geometrii i rozmiarów podane są w normach DIN, ASTM oraz w materiałach producentów sond.

### Metoda NFT

Badanie w polu bliskim jest techniką dedykowaną do inspekcji rur ze stali węglowej typu fin-fan, czyli z aluminiowym żebrowaniem, stosowanych w konstrukcjach do skraplaczy i chłodnic. Technika NFT umożliwia wykrywanie skutków erozji i korozji wżerowej na wewnętrznej powierzchni rury. Indukcja prądów wirowych w tej metodzie jest ograniczona, tak aby głębokość wnikania nie przekraczała grubości ścianki badanej rury. Warunek ten jest konieczny dla uniknięcia zakłóceń, które mogłyby powstać podczas indukcji prądu w żebrowaniu.

Schemat sondy pracującej w technice NFT pokazano na rysunku 2.11.



Rysunek 2.11. Schemat działania sondy w metodzie NFT [46].

Sonda NFT zbudowana jest z cewki nadawczej oraz z cewek odbiorczych, pracujących w układzie różnicowym i absolutnym, znajdujących się w pobliżu cewki nadawczej, czyli w obszarze indukcji silnych prądów wirowych ukierunkowanych osiowo i promieniowo w materiał rury. Lokalizacja cewek odbiorczych w obszarze silnego pola, czyli tak zwanego „pola bliskiego”, powoduje ograniczenie głębokości wnikania. Zakres częstotliwości pracy dla tej techniki, podobnie jak i szybkość skanowania, jest analogiczny, jak w metodzie RFT. Z uwagi na ograniczenia metody do badania tylko na obecność defektów wewnętrznych, próbka referencyjna powinna zawierać co najmniej dwa ubytki tego typu o różnej głębokości, a także otwór przelotowy.

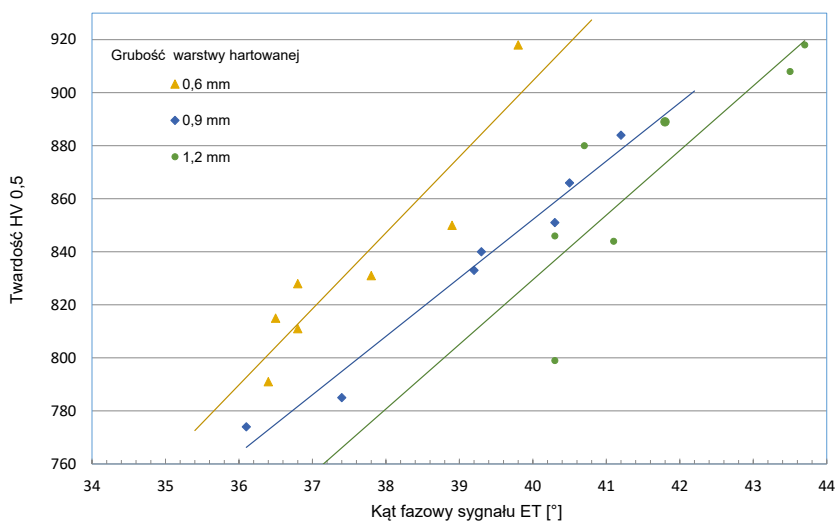
We wszystkich wymienionych technikach oceny defektów w materiale rur dokonuje się na podstawie porównania uzyskanych wskazań ze wskazaniami od wad referencyjnych w postaci otworów płaskodennych, przelotowych lub podtoczeń o różnej długości. Precyzja w określeniu wielkości znalezionej defektu zależy w dużej mierze od „rozdzielczości” wzorca i jest ona tym większa, im więcej otworów i ubytków o zróżnicowanej grubości (głębokości) wykonano na rurce referencyjnej. Kalibracja sygnału na takim wzorcu umożliwia zwiększenie dokładności oceny wad. Dzięki indywidualnej ocenie parametrów takiego wskazania można uzyskać informację o geometrii zidentyfikowanych defektów, a w ślad za tym, o przyczynach ich powstawania. Wyniki badań własnych w zakresie analizy sygnałów od niestandardowych ubytków wykonanych w rurach ze stali austenitycznej przedstawiono w pracy [47].

## 2.7 Strukturoskopia oraz ocena stanu naprężenia

Możliwości metody prądów wirowych w zakresie strukturoskopii są oparte na zależności między właściwościami fizycznymi materiału a właściwościami mechanicznymi oraz składem fazowym i/lub chemicznym. Wykorzystanie zjawiska indukcji magnetycznej w ocenie zmian strukturalnych związane jest z detekcją zmian względnej przenikalności magnetycznej badanego materiału ( $\mu_r$ ) i jego właściwej przewodności elektrycznej ( $\sigma$ ), z ograniczeniem do strefy przypowierzchniowej. Standardowo pojmowana strukturoskopia obejmuje badania w zakresie oceny zawartości ferrytu w stalach, zmian twardości, na przykład detali po obróbce cieplnej, czy zmian struktury w materiałach napromieniowanych. Możliwe jest także sortowanie materiałów na podstawie określonej przewodności elektrycznej (dotyczy tylko materiałów przewodzących).

Metoda prądów wirowych dzięki możliwości detekcji zmian wymienionych powyżej właściwości elektromagnetycznych przez ocenę zmian parametrów im-

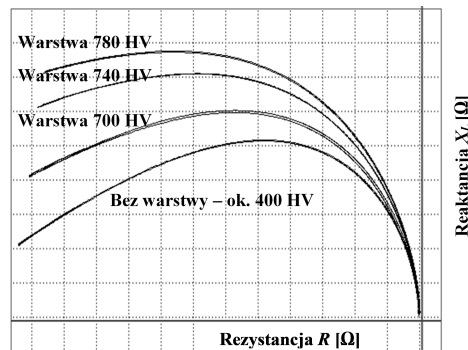
pedancji, może być wykorzystana do detekcji efektów procesów i zjawisk zachodzących w strukturze materiału pod obciążeniem, które skutkują zmniejszeniem lub wzrostem przewodności elektrycznej i przenikalności magnetycznej. Badania takie realizowane są za pomocą komercyjnych mierników, czy „strukturoskopów” (np. grubościomierze, ferrytoskopy) w obszarze jakościowej oceny skutków obróbki cieplnej [48] i/lub porowatości [49]. Można je też wykonać z wykorzystaniem zaawansowanych defektoskopów, które oferują funkcję rejestracji zmian parametrów impedancji w wyniku oddalenia sondy od powierzchni badanej („lift off”). Na podstawie analizy zmian trajektorii impedancji opracowano między innymi zależności twardości warstw hartowanych indukcyjnie i odpuszczanych w zakresie temperatury od 105°C do 180°C od wartości kąta fazowego impedancji. Dla różnej twardości, będącej efektem odpuszczania w stopniowo coraz wyższej temperaturze, uzyskano zmienne wartości kąta fazowego impedancji. Zmiany te, w funkcji zmian twardości są niemal liniowe, co umożliwia nieniszczącą ocenę rezultatów ulepszenia cieplnego. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 2.12 w postaci wykresów zmian impedancji w funkcji twardości dla trzech zestawów próbek hartowanych indukcyjnie na ustaloną grubość 0,6; 0,9 oraz 1,2 mm, a szczegółowo opisano w pracy [45].



Rysunek 2.12. Zmiany twardości warstw o trzech grubościach, hartowanych indukcyjnie i odpuszczonych w szerokim zakresie temperatury, w funkcji kąta fazowego sygnału prądów wirowych indukowanych z częstotliwością 500 kHz [45].

Uzyskanie zależności parametrów impedancji od twardości warstw nawęglanych i hartowanych indukcyjnie pozwala nie tylko na bezwzględny pomiar twardo-

ści, ale na identyfikację jej zmian. W przeprowadzonych badaniach, w których analizowano subtelne zmiany kąta fazowego, oceniono, że możliwa jest identyfikacja różnic twardości na poziomie wartości około 10 HV. W przypadku większych różnic w ocenianych właściwościach badania można ograniczyć do jakościowej analizy wyników widocznych na ekranie defektoskopu, jak to pokazano na rysunku 2.13. Przedstawiono na nim zmiany impedancji trzech próbek o różnej twardości, potwierdzone pomiarami twardości wykonanymi za pomocą mikrotwardościomierza, które ułatwiają uszeregowanie badanych detali według kryterium danej cechy.



Rysunek 2.13. Zmiany trajektorii impedancji dla próbek o różnej twardości powierzchniowej [badania własne].

Rozwój badań z wykorzystaniem techniki prądów wirowych pozwala ponadto ocenić stan naprężenia własnego w konstrukcjach i instalacjach. Badania tego typu mogą służyć do wyznaczania miejsc o największym wyężeniu materiału jako obszarów, które należy poddać szczegółowej kontroli podczas przestojów remontowych oraz monitorować w trakcie eksploatacji instalacji ciśnieniowych. W zakresie pomiaru naprężenia metoda prądów wirowych jest także stosowana do oceny efektu odprężania spoin [50], do oceny stanu naprężenia w pokrywach turbin pracujących w podwyższonej temperaturze [51] oraz do oceny stanu naprężenia kół kolejowych po obróbce osadzania wciskowego [52]. Pewnym ograniczeniem jest powierzchniowy charakter metody prądów wirowych, co nie wyklucza jej przydatności do oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego elementów cienkościennych. Badanie stanów podpowierzchniowych jest także wystarczające do określenia maksymalnego wyężenia w obiektach użytkowych [53]. Z tego względu możliwe jest zastosowanie omawianej metody do weryfikacji stanu naprężenia oraz monitorowania procesów inicjowanych zmianami tych stanów. Potwierdzono również możliwość wykorzystania metody prądów wirowych do

oceny stanu naprężenia resztkowego elementów wykonanych z takich metali, jak aluminium [54] czy tytan [55], a także stopów aluminium, na przykład siluminów i durali [56].

## 2.8 Prądy wirowe w ocenie degradacji zmęczeniowej

Potencjał metody prądów wirowych w obszarze defektoskopii i strukturokopii daje dobre możliwości identyfikacji uszkodzeń eksploatacyjnych we wczesnym etapie ich rozwoju. Uszkodzenia takie są związane z lokalną koncentracją składowych naprężania (np. na karbach strukturalnych), rozwojem deformacji (wynikającej z uruchomienia mechanizmów odkształcenia plastycznego) czy nukleacją (zarodkowaniem) mikropęknięć. W dalszej perspektywie możliwe byłoby opracowanie procedur oceny stanu degradacji materiału oraz określenie przydatności obiektu do dalszej pracy przez oszacowanie tzw. trwałości eksploatacyjnej elementów konstrukcji pracujących w warunkach obciążenia zmęczeniowego. Podstawą do opracowania takich rozwiązań jest wykorzystanie zależności właściwości fizycznych materiałów konstrukcyjnych, takich jak przenikalność magnetyczna czy przewodność elektryczna, od czynników determinujących proces degradacji w warunkach obciążenia. Jest to przede wszystkim zmieniający się stan naprężenia resztkowego (jego lokalne zmiany) i towarzyszący mu lokalny wzrost wartości składowych odkształcenia niesprężystego.

Pierwsze prace potwierdzające zależność wymienionych właściwości materiałów od zmiany stanu naprężenia związanego z rozwojem degradacji pod wpływem cyklicznych obciążeń zmiennych pojawiły się w latach 50. XX wieku. Wspomniane we wprowadzeniu publikacje dotyczyły głównie badania konduktywności metali i stopów poddawanych zmęczeniu i proporcjonalności jej zmian do liczby cykli obciążenia. Dalsze prace w tym obszarze opisywały zależność oporności elektrycznej od defektów struktury krystalicznej [57] oraz od rozkładu pól odkształcenia wokół defektów punktowych [58]. Inne prace potwierdzały wpływ gęstości dyslokacji na przewodność elektryczną odkształczanych elementów wykonanych z miedzi monokrystalicznej [59] lub ze stopów niklu [60].

Jeszcze pod koniec XX wieku pojawiły się koncepcje opisu rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego za pomocą zmian konduktywności stopu Cu-Ni poddanego obciążeniu cyklicznemu [3], a także próby oceny rozwoju degradacji zmęczeniowej jako funkcji przewodności, co wykazano dla próbek ze stopu aluminium 2024 zginanych rewersyjnie [61]. Opisano także rozwój uszkodzenia zmęczeniowego zdefiniowanego przyrostem odkształcenia na podstawie zmian rezystancji mierzonej podczas wzbudzenia próbek zmęczeniowych po różnej liczbie cykli obciążenia [62].

Skromniej opisane są badania nad oceną stanu degradacji zmęczeniowej na podstawie wyników pomiarów przenikalności magnetycznej w materiałach ferromagnetycznych. Badania tego typu z reguły dotyczą rejestracji zmian przebiegu krzywej magnesowania w funkcji stopnia uszkodzenia wyrażonego liczbą cykli zmęczeniowych [63], gdzie stopniowo rozwijające się uszkodzenie znajduje odzwierciedlenie w zmianach częstotliwości rezonansowej. Podobne wyniki uzyskano w badaniach właściwości magnetycznych poddanej zmęczeniu niskostopowej stali A533B stosowanej na zbiorniki ciśnieniowe reaktorów [64]. Praca ta pokazuje, że histereza magnetyczna jest wrażliwa na zmiany mikrostrukturalne wywołane cyklicznym obciążeniem, nawet przy poziomie naprężenia poniżej granicy plastyczności. Ocena stopnia uszkodzenia eksploatacyjnego przeprowadzona na podstawie zmiany właściwości magnetycznych była również dokonywana z zastosowaniem parametru szczytowego przedziału odwracalnej przenikalności magnetycznej (PIRMP – *Peak Interval of Reversible Magnetic Permeability*). Pomiarzy tego parametru na próbkach ze stali 9Cr poddanej testom zmęczenia i pełzania wykazały jego liniową zależność od parametru Larsona–Millera (LMP), opisującego szacunkowy czas życia materiału w funkcji czasu i temperatury [65]. Pomiarzy parametru PIRMP przeprowadzono także na próbkach ze stali 9Cr-1Mo poddanych różnym okresom starzenia [66]. Uzyskano podobne wyniki. Wszystkie one wskazują, że pomiary przenikalności magnetycznej wyrażonej parametrem PIRMP stwarzają możliwość szacowania trwałości materiałów konstrukcyjnych w sposób wiarygodny.

Ocena stanu materiału poddanego obciążeniom mechanicznym z wykorzystaniem indukcji prądów wirowych w materiale bazuje na analizie kombinacji zmian obu wyżej wymienionych parametrów  $\sigma$  i  $\mu_r$ . Daje to możliwość użycia metody ET do oceny stanu wszystkich materiałów przewodzących, zarówno ferro-, jak i nieferromagnetycznych. Przykładem jest ocena lokalnych zmian właściwości elektromagnetycznych stali SUS430 identyfikowanych jako uszkodzenia przy wykorzystaniu cewki typu „pancake” [67]. Analiza uzyskanego sygnału daje informacje o zmianach przenikalności i rezystywności próbki spowodowanej zmęczeniem materiału. Skutki zmęczenia w postaci wzrostu poziomu naprężenia wpływają na parametry cewki, takie jak indukcyjność  $L$  oraz kąt fazowy  $\varphi$  impedancji.

Podobne badania przeprowadzono na kołpakach wirników turbogeneratorów produkowanych w TurboCare Poland S.A., opracowując procedurę oceny ich przydatności do dalszej eksploatacji [68]. Wyniki wykazały przydatność kilkuprocentowych zmian mierzonych parametrów sygnału prądów wirowych w ocenie stopnia wyeksploatowania elementów. Fakt, że technika prądów wirowych pozwala nie tylko na identyfikację i charakterystykę pęknięć zmęczeniowych,

ale i ocenę akumulacji odkształcenia plastycznego spowodowanego cyklicznymi obciążeniami, potwierdzają badania na próbkach hartowanych [69] oraz na próbkach ze stali wyżarzonych [70]. Uzyskane zależności parametrów impedancji od liczby cykli zmęczeniowych pokazują, że możliwa jest ocena składowych niesprężystego odkształcenia skumulowanego podczas obciążenia cyklicznego. Ponadto zależności te mają zastosowanie w szacowaniu pozostałej żywotności materiału eksploatowanego w warunkach oddziaływania zmiennego naprężenia.

Publikacje na temat wykorzystania prądów wirowych w ocenie procesów zmęczeniowych na wczesnym etapie powstawania uszkodzenia dotyczą z reguły zastosowania samego zjawiska indukcji. Opisane powyżej pomiary prowadzono przy użyciu mierników napięciowo-prądowych [68, 71], mostków RLC [72, 73] lub zaawansowanych rozwiązań, na przykład mikroskopu wykorzystującego indukcję prądów wirowych oraz szumy Barkhausena (BEMI – *Barkhausen Noise and Eddy Current Microscope*), który umożliwia wizualizację połowego rozkładu parametrów prądowych na powierzchni badanego detalu [74]. Bardzo niewiele dostępnych jest wyników prac uzyskanych przy zastosowaniu komercyjnej aparatury diagnostycznej w postaci defektoskopów prądowirowych. Niektóre z tych urządzeń dysponują możliwością pomiaru i rejestracji parametrów impedancyjnych, co w połączeniu z zestawem odpowiednich próbek referencyjnych stwarza skuteczne narzędzie badawcze.

We wszystkich przytoczonych pracach analizowano zależność oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego od właściwości badanego materiału. Wzbudzane w nim prądy wirowe stanowią nośnik informacji diagnostycznych, których interpretacja umożliwia ocenę właściwości i dynamikę ich zmian w warunkach obciążenia. Wymienione techniki utożsamiane z metodą prądów wirowych dotyczą w mniejszym lub większym stopniu analizy zmian impedancji będącej kombinacją przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej badanego materiału (lub bardziej układu pomiarowego materiał-cewka wzbudzająca). Przykładem są wyniki badań uzyskanych z wykorzystaniem autorских technik pomiarowo-badawczych, jak na przykład niskoczęstotliwościowa spektroskopia impedancyjna – LFSI [75], czy elektryczna tomografia impedancyjna [76], której wynikiem jest detekcja „mikrorezystancji” w strukturze materiału. Zastosowaniem niskoczęstotliwościowej spektroskopii impedancyjnej jest metoda wieloczęstotliwościowych prądów wirowych używana w przemyśle do kontroli jakości produkcji [77].

Wykorzystanie zjawisk związanych z oddziaływaniem indukowanego pola elektrycznego lub magnetycznego w materiale na procesy zachodzące w nim pod wpływem zewnętrznych oddziaływań jest podstawą wielu innych technik badawczych, z których część opisano w następnym rozdziale.





# Inne metody magnetyczne w ocenie uszkodzeń zmęczeniowych

Rozdział przedstawia możliwości innych niż prądy wirowe metod diagnostycznych ze szczególnym uwzględnieniem technik wykorzystujących zjawisko indukcji magnetycznej i procesy inicjowane w strukturze domenowej do oceny zmian zachodzących w materiałach ferromagnetycznych pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych. Przybliżono też mechanizmy detekcji defektów strukturalnych oraz różne techniki analizy uzyskiwanych sygnałów.

## 3.1 Detekcja uszkodzeń z wykorzystaniem zjawisk elektromagnetycznych

Spośród magnetycznych metod diagnostycznych najbardziej powszechna w detekcji uszkodzeń powierzchniowych i podpowierzchniowych jest metoda magnetyczno-proszkowa dedykowana do inspekcji materiałów ferromagnetycznych. Jest to prosta technika wykorzystująca zjawisko rozproszenia pola magnetycznego (lub zmiany przenikalności magnetycznej) w miejscach występowania wad, znormalizowana według PN-EN ISO 9712:2012.

Do identyfikacji i oceny zjawisk zmęczeniowych poprzedzających powstawanie defektów, czyli we wczesnym etapie rozwoju uszkodzenia, stosuje się badanie stanu magnetycznego krytycznych miejsc obiektu. W licznych pracach wykazano, że mechanizmy inicjujące proces odkształcenia plastycznego, jak wzrost gęstości dyslokacji czy powstawanie pasm poślizgu, powodują zmiany właściwości magnetycznych [63, 70, 78]. W ostatniej z przytoczonych prac, opisującej badania na stalach ferrytycznych poddanych różnym typom obróbki cieplnej, wykazano zachodzenie zmian właściwości magnetycznych wraz z liczbą zadawanych cykli zmęczeniowych. Zarejestrowane podczas magnesowania zmiany koercji w początkowej fazie zmęczenia były ściśle związane ze zmianami struktury dyslokacji. W kolejnym stadium zmęczenia, w którym zachodzi stabilny wzrost uszkodzenia, zaobserwowano przeorganizowanie struktur domenowych

wraz z rozwojem struktur komórek dyslokacyjnych i powstawaniem pasm poślizgu. Pomiarów parametrów magnetycznych są użyteczne do oceny uszkodzeń zmęczeniowych materiałów i strukturalnych zmian z nimi związanych, ale dotyczy to tylko materiałów ferromagnetycznych.

Nieliczne prace dotyczą zastosowania metod magnetycznych do oceny stanu materiałów nieferromagnetycznych. Przykład stanowi praca [79] przedstawiająca wyniki oceny zmian resztkowego pola magnetycznego (RMF – *Residual Magnetic Field*) próbek ze stali 304 pod wpływem obciążenia zmęczeniowego. Rezultaty tych badań, wskazujące na lokalną przemianę martenzytyczną wywołaną cyklicznym obciążeniem zmiennym, potwierdzają możliwość oceny rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego paramagnetycznej stali austenitycznej przez pomiar resztkowego pola magnetycznego.

Najpopularniejsze techniki wykorzystujące zjawisko indukcji magnetycznej ograniczone są do badania materiałów ferromagnetycznych. Wśród nich, największe perspektywy rozwoju mają pomiary efektu (szumów) Barkhausena (BE – *Barkhausen Effect*, BN – *Barkhausen Noise*), emisji magneto-akustycznej (MAE – *Magneto-Acoustic Emission*), metody oparte na upływie strumienia magnetycznego (MFL – *Magnetic Flux Leakage*) [80] i histerezie magnetycznej, a także metoda pamięci magnetycznej (MMM – *Magnetic Memory Method*). Możliwości tych technik magnetycznych w zakresie diagnozowania stanu materiałów ferromagnetycznych przedstawiono w pracach [63, 81, 82].

Wymienione techniki należą do kategorii elektromagnetycznych metod badań nieniszczących, w których do wykrywania nieciągłości materiałowych wykorzystano ich interakcje z polem elektrycznym, magnetycznym lub promieniowaniem elektromagnetycznym [83]. Dlatego też, oprócz metod magnetycznych, których stosowanie ogranicza się do materiałów przewodzących (metale i ich stopy), należy wspomnieć o takich metodach elektromagnetycznych, jak:

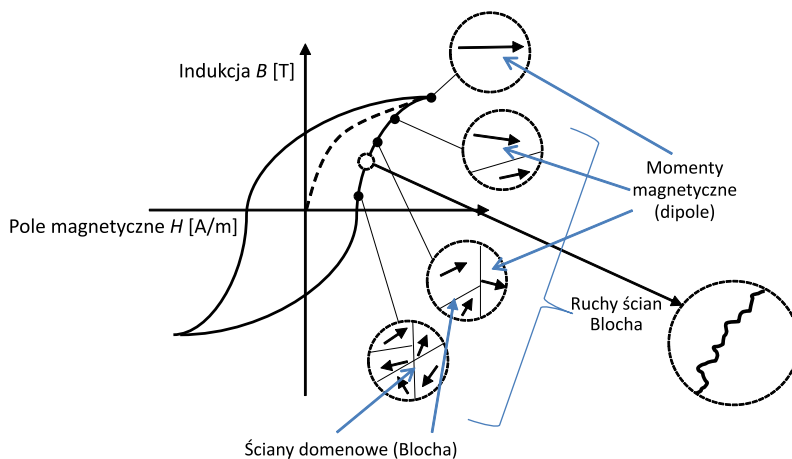
- metoda terahercowa (TRayT – *T-Ray Testing*), wykorzystywana do oceny stanu kompozytowych struktur nieprzewodzących, powłok malarskich i materiałów ceramicznych w zakresie detekcji ubytków, rozwarstwień i braków włókien wzmacniających. Systemy terahercowe są wykorzystywane do kontroli powłok stosowanych w samolotach wojskowych (dając możliwość weryfikowania grubości powłoki z dokładnością submikronową [84]), a także do badań materiałów ceramicznych [85];
- termografia aktywna w podczerwieni ze wzbudzeniem prądami wirowymi, umożliwiającą szybką inspekcję dużego obszaru w krótkim czasie, przy wysokiej rozdzielczości przestrzennej, stosowana do testów zmęczeniowych kół zębatach [86] oraz konstrukcji stalowych [87];

- radiografia komputerowa (XRy-CR – *Computed Radiography*) i radiografia cyfrowa (XRy-DR – *Digital Radiography*).

Ponieważ opisane tu badania realizowane były z wykorzystaniem metody prądów wirowych, szczegółowo scharakteryzowano techniki wykorzystujące interakcje materiału z polem magnetycznym do oceny procesów zmęczeniowych we wczesnym stadium ich rozwoju.

## 3.2 Szumy Barkhausena

Szumy Barkhausena (BN) są związane ze skokowymi zmianami namagnesowania ferromagnetyków pod wpływem ciągłej zmiany natężenia zewnętrznego pola magnetycznego i są wynikiem skokowego przesuwania się granic domen magnetycznych w kierunku zewnętrznego pola magnesującego. Przemieszczenie ścian domenowych jest blokowane zarówno przez niejednorodności struktury krystalograficznej (dyslokacje, defekty kryształów, niejednorodności struktury), jak i przez nieciągłości materiału (wtrącenia, pęknięcia). Spowodowana tym nieciągła struktura domenowa wywołuje na badanej powierzchni lokalne zaburzenia indukcji, wykrywalne specjalnymi układami pomiarowymi. Na rysunku 3.1 przedstawiono schemat powstawania szumów Barkhausena jako wynik oddziaływania zmiennego pola magnetycznego z defektami mikrostruktury.



Rysunek 3.1. Schemat powstawania szumów Barkhausena jako wyniku tworzenia pętli histerezy [88].

Skumulowanie w materiale odpowiednio wysokiej energii (np. przez zewnętrzne pole magnetyczne lub zmiany naprężenia) powoduje gwałtowne uwolnienie

nie i szybki ruch ścianek domenowych Blocha. Ich ruch nie jest płynny i od czasu do czasu następuje ich lokalne „zakotwiczenie”. Zakotwiczenia te powodują lokalne zaburzenia indukcji magnetycznej, które można rejestrować. Ponieważ liczba możliwych miejsc „kotwiczących” wiąże się ściśle z ruchem ścianek, szumy Barkhausena są więc używane jako metoda bezinwazyjnego testowania materiałów magnetycznych, na przykład stali konstrukcyjnej, oraz do wykrywania niebezpiecznego poziomu ich zużycia. Pojawiające się w procesie eksploatacji mikropęknięcia są jednym z najtrudniejszych defektów do diagnozowania. W praktyce przemysłowej metoda ta wykorzystywana jest głównie do:

- oceny stanu naprężenia resztkowego;
- oceny poziomu twardości;
- wykrywania i oceny wad powierzchniowych.

Wpływ stanu naprężenia wywołanego w materiale ferromagnetycznym historią obciążenia na poziom szumów Barkhausena powstających w wyniku dynamicznego namagnesowania potwierdzono ponad 30 lat temu [88]. Zaobserwowano zjawisko blokowania ścian domenowych przez takie elementy mikrostruktury jak: granice ziaren, dyslokacje i wydzielenia, stanowiące przeszkody dla ich ruchu, a następnie odblokowywanie tych ścian podczas zmiany natężenia pola magnetycznego. Analizy sygnału BN skorelowane z przebiegami testów zmęczeniowych wykazują trzy główne etapy trwałości zmian zmęczeniowych: początkowy wzrost, osiągnięcie plateau i spadek sygnału przed pęknięciem. Kolejne etapy można powiązać z klasycznymi etapami zmian trwałości zmęczeniowej metali i stopów [89]. Liczne prace potwierdzają skuteczność oceny stopnia degradacji zmęczeniowej na podstawie wyników uzyskanych metodą BN, na przykładzie stali konstrukcyjnych [90] czy stopów niklu [91], w warunkach cyklicznych obciążeń zmiennych. Wprowadzane są też algorytmy do szacowania resztkowej trwałości zmęczeniowej stali węglowej na podstawie analizy szumów Barkhausena w warunkach obciążenia cyklicznego [92].

### 3.3 Emisja magneto-akustyczna

Zjawisko emisji magneto-akustycznej (MAE) polega na wygenerowaniu (np. w wyniku oddziaływania polem magnetycznym) fali dźwiękowej powstającej na skutek ruchu granic domenowych (nie  $180^\circ$ ) w ferromagnetycznych materiałach o niezerowej magnetostrykcji [93]. Towarzyszy ono emisji szumów Barkhausena, które są silnie tłumione przez strukturę materiałów konduktywnych, co ogranicza możliwość ich detekcji do głębokości rzędu milimetra. Ograniczenia te nie dotyczą sygnału w postaci emisji magneto-akustycznej generowanego

w wyniku uwolnienia energii sprężystej podczas dynamicznych ruchów ścian domenowych. Detekcja sygnału MAE może być prowadzona za pomocą czujników stosowanych w emisji akustycznej, tzn. piezoelektrycznych przetworników sygnałów fali sprężystej na sygnał elektryczny. W badaniach z wykorzystaniem tej techniki należy uwzględnić, że sygnał emisji magneto-akustycznej zależy nie tylko od stanu mikrostruktury i liczby defektów oraz stanu naprężenia resztkowego, ale także od geometrii badanego elementu oraz stanu jego namagnesowania.

Metoda badania z wykorzystaniem emisji magneto-akustycznej umożliwia określenie stopnia degradacji materiałów eksploatowanych w energetyce, diagnozowanie stopnia deformacji plastycznej, ocenę jakości obróbki cieplnej. Jest stosunkowo nową, nieniszczącą techniką diagnostyczną, a jej zasada działania opiera się na zjawiskach związanych z emisją szumów Barkhausena wskutek oddziaływania zmiennego pola magnetycznego. Emisja magneto-akustyczna generowana jest przez fale sprężyste powstające w wyniku zmian struktury domeny magnetycznej w materiałach ferromagnetycznych namagnesowanych przez zmienne pola magnetyczne. W przeciwieństwie do emisji akustycznej inicjowanej przez procesy dynamiczne, takie jak odkształcenia plastyczne i propagacja pęknięć, MAE jest związana z procesami nieodwracalnego namagnesowania [81]. Metoda MAE została wykorzystywana do charakteryzowania stanu naprężenia ferrytycznej stali nierdzewnej (AISI 430) [94], oceny trwałości resztkowej stali Q235, poddanej obciążeniom zmęczeniowym, w której efekty związane z uszkodzeniem zmęczeniowym mają wpływ na tworzenie i anihilację ścian domenowych [81], czy też stali żarowytrzymałych o strukturze martenzytycznej (P91) i perlityczno-ferrytycznej (13HMF), eksploatowanych w polskiej energetyce [95].

Z uwagi na trudności w zachowaniu powtarzalności warunków pomiaru technika ta wymaga zastosowania niskoszumowych układów wzmacniających, przetworników piezoelektrycznych oraz zapewnienia dużej szybkości przetwarzania sygnałów, co utrudnia jej adaptację do zastosowań w diagnostyce przemysłowej. Perspektywy rozwoju tej techniki związane są z możliwością uzyskania informacji z całej objętości magnesowanego elementu oraz z niskim kosztem urządzeń pomiarowych potrzebnych do zbudowania układu pomiarowego (generator, wzmacniacz, elektromagnes, przetwornik piezoelektryczny).

Procedury pomiarowe opracowane z wykorzystaniem metody MAE przez zespół z Katedry Fizyki Ciała Stałego Politechniki Gdańskiej [93, 95] są stosowane do oceny stopnia degradacji materiałów eksploatowanych w energetyce, stopnia deformacji plastycznej materiałów, monitorowania jakości obróbki cieplnej oraz analizy zmian struktury domenowej wywołanych naprężeniem.

### 3.4 Metoda pamięci magnetycznej

Zainicjowana przez Dubowa [96] metoda pamięci magnetycznej (MMM) jest pasywną, nieniszczącą techniką badawczą, wykorzystującą nieodwracalne zmiany stanu magnetycznego elementów ferromagnetycznych w obszarach koncentracji naprężenia i przemieszczenia. W miejscach tych zachodzi ukierunkowane i nieodwracalne przeorientowanie struktury domenowej o magnetostrykcyjnym charakterze. Metoda pamięci magnetycznej wykorzystuje zjawiska związane z efektem Villariiego (zmiana magnesowania materiału pod wpływem naprężenia mechanicznego), odwrotnym efektem magnetoplastycznym (zmiana namagnesowania materiału w strefach odkształcenia plastycznego) oraz efektem wycieku strumienia wektora natężenia pola magnetycznego spowodowanego niejednorodnościami materiału [97]. Możliwości diagnostyczne tej metody w zakresie detekcji uszkodzeń zmęczeniowych potwierdzono w badaniach rurociągów [98] i zbiorników magazynowych [99] wykonanych ze stali ferromagnetycznych. Metoda MMM umożliwia nie tylko wykrycie defektów, ale też stref koncentracji naprężenia generowanych w materiale pod wpływem cyklicznych obciążeń zmiennych.

Istotą metody pamięci magnetycznej jest pomiar lokalnego zaburzenia pola magnetycznego wynikającego z koncentracji naprężenia w materiale oraz nieciągłości inicjowanych eksploatacją w warunkach obciążenia (pęknięcia, rozwarstwienia). Jest ona stosowana w ocenie stanu elementów statków powietrznych (łopatki turbin, śmigła) poddawanych wysoko- i niskocyklowemu zmęczeniu [100], a także w monitorowaniu rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego inicjowanego w stali niskowęglowej w próbie trójpunktowego zginania dynamicznego [101]. Jest też wykorzystywana w diagnostyce przemysłowej do oceny stanu stalowych rurociągów przebiegających pod powierzchnią ziemi na głębokości do 3 m, bez konieczności kontaktu. Umożliwia to detekcję uszkodzeń powstałych wskutek obciążeń eksploatacyjnych oraz wynikających z posadowienia rurociągu, a także będących wynikiem korozji i erozji.

Według założeń autora, udokumentowanych licznymi wynikami, wyróżniającą właściwością metody pamięci magnetycznej jest możliwość lokalizacji wczesnej fazy zmęczenia materiału i defektów struktury odwzorowanych przez strefy koncentracji naprężenia. Strefy te odzwierciedlają związek pomiędzy wadami makro, defektami struktury na poziomie sieci krystalograficznej a obciążeniami danego elementu w trakcie jego eksploatacji. Podczas badania mierzone są parametry własnych, magnetycznych pól rozproszonych w skupiskach dyslokacji tworzących strefy koncentracji naprężenia. W odróżnieniu od innych metod magnetycznych nie trzeba wytwarzać sztucznego pola magnetycznego. Należy jednak

pamiętać, że mierzony rozkład pola magnetycznego ulega zmianie w zależności od położenia badanego elementu względem zewnętrznego pola magnetycznego innych obiektów (np. Ziemi). W praktyce oznacza to, że metoda MMM nie może być stosowana w pobliżu źródła pola magnetycznego (np. magnesy stałe, transformatory, stacje telefonii komórkowej) oraz pola związanego ze spawaniem elektrycznym.

### 3.5 Metoda wycieku magnetycznego

Metoda wycieku magnetycznego (MFL) polega na indukowaniu pola magnetycznego w badanym elemencie wykonanym z materiału ferromagnetycznego. Pole to powoduje lokalną zmianę wartości przenikalności magnetycznej, tym samym zwiększając głębokość penetracji prądów wirowych do grubości badanego detalu. Istotne jest uzyskanie odpowiedniego nasycenia polem magnetycznym materiału w obszarze badania. Oddziaływanie defektów struktury z zaindukowanym polem magnetycznym powoduje zmiany strumienia magnetycznego na skutek wzrostu oporu magnetycznego. Prowadzi to do „rozpływu” lub „wycieku” linii sił pola magnetycznego, co jest rejestrowane przez sondę pola magnetycznego wyposażoną w czujniki efektu Halla oraz pasywną cewkę odbiorczą wzbudzaną zewnętrznym polem magnetycznym. Na podstawie zmierzonego natężenia rozpraszanego pola magnetycznego można wnioskować o wielkości lub charakterze defektu. Metoda MFL jest metodą jakościową wykorzystującą zjawisko elektromagnetyzmu do detekcji nieciągłości materiałowych i ubytków grubości powstałych na skutek korozji lub erozji [102].

Metoda MFL ma zastosowanie w badaniu rurociągów stalowych i den zbiorników, gdyż ze względu na możliwość rejestracji zaburzeń gęstości strumienia magnetycznego i możliwości przetwarzania danych o tych zaburzeniach na sygnał cyfrowy pozwala identyfikować ubytki korozyjne, erozyjne oraz pocienienia ścianki [103]. Jest też powszechnie stosowana do inspekcji lin stalowych. Dzięki rozwiązaniom wykorzystującym wielokanałowe głowice czujników Halla oraz procesom przetwarzania sygnału, w tym proces obwiedni oparty na transformacji Hilberta, wykonuje się analizę ilościową sygnału, która umożliwia skwantyfikowanie wykrytych sygnałów upływu strumienia magnetycznego według ustalonych kryteriów uszkodzenia [104].

W przypadku badania den zbiorników wykorzystuje się skanery z zabudowaną macierzą czujników ułożonych w linii prostopadłej do kierunku skanowania, co przyspiesza inspekcję oraz mapowanie ubytków [105]. Podobne usprawnienia badania metodą MFL o przetwarzanie i analizę sygnału rozpro-

szenia strumienia magnetycznego są wdrażane w diagnostyce rurociągów naftowych i gazowych, czego przykładem może być narzędzie kontrolne o nazwie FLUMAG 500 [106]. Metoda ta, dzięki opracowaniu dedykowanych rozwiązań w zakresie czujników i magnetyzera, znalazła także zastosowanie w wykrywaniu drobnych pęknięć w pierścieniach łożyskowych [107]. Często metoda MFL jest traktowana jako prosta metoda przesiewowa, pozwalająca na łatwą interpretację wyników.



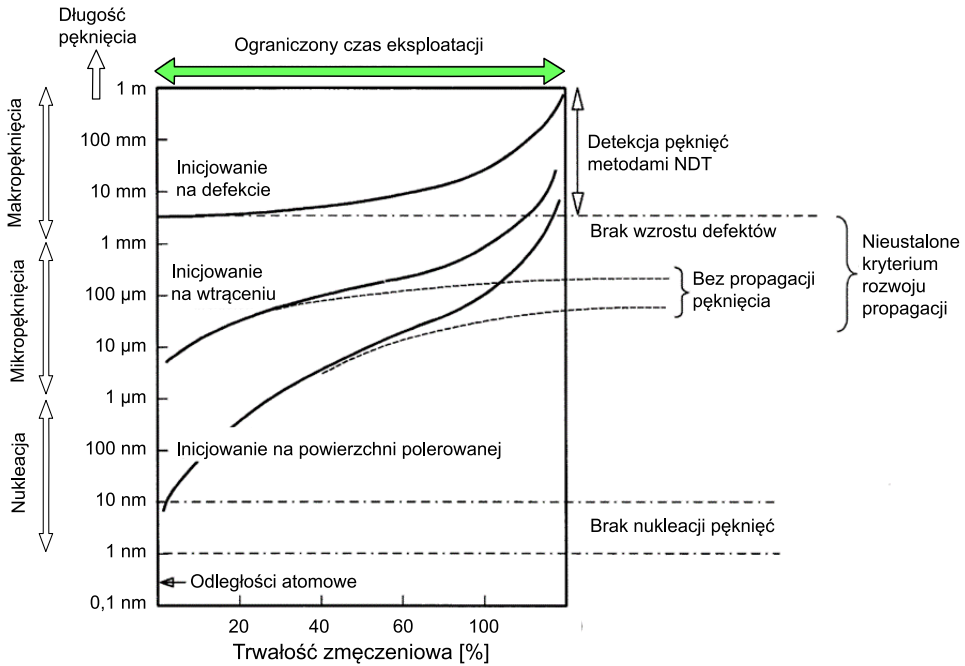
# Zjawiska towarzyszące zmęczeniu materiałów konstrukcyjnych

W rozdziale tym opisano mechanizmy inicjowania i rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych w metalicznych materiałach konstrukcyjnych w warunkach obciążeń eksploatacyjnych. Przedstawiono też różne metody opisu rozwoju uszkodzenia oraz propozycje parametrów definiujących uszkodzenie zmęczeniowe. Przedstawiono także propozycje ilościowej metodyki opisu procesu zmęczeniowego na podstawie analizy akumulacji odkształcenia plastycznego mierzonego w kolejnych cyklach obciążenia.

## 4.1 Opis zjawiska

Zmęczenie materiałów, rozumiane jako proces lokalnego inicjowania pęknięcia, po którym następuje jego wzrost, jest jednym z podstawowych mechanizmów uszkodzenia elementów konstrukcji, urządzeń i instalacji pracujących w warunkach obciążeń dynamicznych. Rozwój zmęczenia inicjowany jest lokalnymi przegrupowaniami dyslokacji i zmianami ich gęstości. Równocześnie zachodzą zmiany mikrostrukturalne prowadzące do lokalnej akumulacji odkształcenia i zmierzające do powstawania uszkodzeń zmęczeniowych. Towarzyszą temu zmiany właściwości wytrzymałościowych, na przykład twardości czy parametrów uzyskanych z próby rozciągania, a w ślad za tym także właściwości fizycznych. Kolejny etap to faza zarodkowania, czyli nukleacji mikropeknięć zmęczeniowych zlokalizowana w miejscach koncentracji naprężenia. Następnie, jedno lub kilka mikropeknięć rozwija się w makropeknięcia i rozpoczyna się ich stabilny wzrost, w czasie którego tempo rozwoju pęknięcia jest proporcjonalne do współczynnika intensywności naprężenia. Trzeci etap to niestabilny, nagły wzrost defektów prowadzący do utworzenia pęknięcia dominującego, którego rozwój prowadzi do utraty spójności materiału. Wówczas współczynnik koncentracji naprężenia na wierzchołku pęknięcia przekracza wartość odporności na pęknięcie danego materiału i następuje dekohezja obciążanego elementu.

W zależności od materiału poddanego obciążeniu rozwój mikropęknięcia może przebiegać w różny sposób, ponieważ pęknięcie ma do pokonania różnego rodzaju bariery mikrostrukturalne. Jak wykazał Schijave w pracy [108], istotny wpływ na rozwój uszkodzenia zmęczeniowego ma także stan powierzchni oraz mechanizmy rozwoju pęknięć prowadzących do zniszczenia. Na rysunku 4.1 przedstawiono przebiegi wzrostu pęknięcia zmęczeniowego dla trzech przypadków. Zmiany te pokazano jako wzrost uszkodzenia w funkcji czasu wyrażonego jako trwałość zmęczeniowa. Założono, że początek uszkodzenia związany jest z inicjowaniem pęknięcia, i uwzględniono różne warianty jego wielkości początkowej. Dolny przebieg odpowiada inicjowaniu mikropęknięć na „idealnej”, wypolerowanej powierzchni materiału. W takim przypadku proces degradacji rozwija się na skutek cyklicznego poślizgu wskutek regularnie zmiennego naprężenia ścinającego, a zainicjowane pęknięcie ma submikronową długość. Środkowa krzywa reprezentuje inicjowanie pęknięcia od wtrącenia, gdzie rozmiar rozwijającego się pęknięcia będzie relatywnie większy, ponieważ wynika z wielkości wtrącenia. Górna krzywa przedstawia rozwój pęknięcia rozpoczynającego się od wady materiału (porowatość), na przykład w złączu spawanym. Tylko takie pęknięcia, które zaczynają się od makrodefektów, mogą mieć długość wykrywalną techni-



Rysunek 4.1. Różne warianty rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego [108].

kami defektoskopowymi. Dwie dolne krzywe wzrostu pęknięć ilustrują podobne warianty, w których większa część trwałości zmęczeniowej przypada na pęknięcie o wielkości mniejszej niż 1 mm, tj. praktycznie niewidocznego. Linie przerywane na wykresie wskazują, że pęknięcia nie zawsze rozwijają się aż do utraty spójności, ponieważ ich propagacja może być hamowana (np. poprzez mechanizm mostkowania) na elementach mikrostruktury.

Wszystkie opisane warianty uwzględniają takie czynniki, jak stan powierzchni materiału, poziom składowych naprężeń resztkowego czy wpływ środowiska, przy założeniu, że zmęczenie materiału rozumiane jest jako proces inicjowania pęknięcia powstałego w wyniku cyklicznego poślizgu, po którym następuje okres narastania pęknięcia.

Powyższy przykład wskazuje różnorodność mechanizmów rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego w zależności od materiału, stanu jego obróbki i jakości powierzchni. Zróżnicowany może być też rozmiar nieciągłości zainicjowanych w pierwszym etapie zmęczenia. Dlatego też istotne jest poszukiwanie takich rozwiązań w detekcji uszkodzenia zmęczeniowego, które z jednej strony poprawią rozdzielczość identyfikacji coraz mniejszych pęknięć, z drugiej zaś będą czułe na zmiany mikrostrukturalne związane z ich nukleacją (takie jak koncentracja naprężeń na wtrąceniu prowadząca do zarodkowania pęknięcia). Konieczne jest, aby rozwiązania te bazowały na nieinwazyjnych technikach badawczych, a ich skuteczność w ocenie stopnia degradacji była możliwa do weryfikacji w warunkach pracy urządzeń i konstrukcji przemysłowych. W konstrukcjach poddawanych obciążeniom cyklicznym inicjowanie uszkodzenia ma miejsce w obszarach o podwyższonej koncentracji naprężenia, z reguły na powierzchni materiału (na jej nierównościach) lub w jej pobliżu, wokół karbów strukturalnych (wtrącenia niemetaliczne, związki międzymetaliczne, nieciągłości, defekty punktowe) lub na miękkich fazach, gdzie łatwiej dochodzi do uruchomienia mechanizmów odkształcenia plastycznego [109]. Dlatego też technika wykrywania takich obszarów, oparta na detekcji lokalnych zmian właściwości elektromagnetycznych wywołanych zmianami w koncentracji naprężenia, może być pomocna w ocenie stopnia uszkodzenia we wczesnym etapie jego rozwoju, a także do prognozowania charakteru i szybkości rozwoju tego uszkodzenia.

Problem degradacji struktury materiałów wywołanej zmiennymi obciążeniami mechanicznymi i termicznymi jest istotny zarówno z punktu widzenia bezpieczeństwa, jak i kosztów eksploatacji instalacji przemysłowych. W warunkach eksploatacyjnych najczęściej występują zmiennie obciążenia mechaniczne o wartości naprężenia niższej od granicy plastyczności materiału, z którego są wykonane. Taki charakter obciążenia powoduje proces zmęczenia wysokocyklowego, który rozwija się pod wpływem długotrwałych obciążeń cyklicznych, powodu-

jąc skrócenie czasu eksploatacji elementów konstrukcyjnych. Dynamika procesu degradacji generowanego zmęczeniem wysokocyklowym jest uzależniona od wartości amplitudy naprężenia, jego charakteru (symetryczny, stochastyczny) oraz czasu trwania obciążenia.

Wytrzymałość zmęczeniowa wyznaczana na podstawie standardowej procedury Wöhlera jest jednym z głównych parametrów materiałowych projektowania inżynierskiego i określa wartość naprężenia, przy której element konstrukcyjny obciążony cyklicznie jest w stanie wytrzymać umowną liczbę cykli [110]. Liczba ta określana jest graniczną liczbą cykli  $N_g$  i przyjmuje się, że wynosi ona  $10^7$  dla stali oraz  $10^8$  dla stopów metali nieżelaznych. Wykres Wöhlera, uzyskany na podstawie liczby cykli prowadzących do zniszczenia próbek obciążanych naprężeniem zmiennym o różnej wartości amplitudy, pozwala oszacować trwałość zmęczeniową. Nie daje jednak żadnej informacji ani o inicjowaniu, ani o rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego, które zaczyna się najpierw od subtelnych zmian mikrostruktury i poprzez rozwój pojedynczych pasm poślizgu w miejscach koncentracji naprężenia wokół wtrąceń, pustek i wad strukturalnych prowadzi do powstania mikropęknięć powiększających się do rozmiarów milimetrowych, aż do utworzenia się jednego pęknięcia dominującego rozwijającego się zgodnie z regułami mechaniki pęknięcia [110–112].

Monitorowanie i ocena zmian zachodzących w mikrostrukturze pod wpływem obciążeń cyklicznych wymagają zaawansowanej aparatury badawczej łączącej możliwości obserwacji za pomocą mikroskopu elektronowego oraz wprowadzenia wymuszenia i kontroli siły w zastosowanej maszynie wytrzymałościowej przez dedykowane sterowniki. Takie rozwiązanie ma także ograniczenia związane z niewielkim rozmiarem testowanych próbek.

Inny wariant oceny zmian mikrostruktury w różnych fazach procesu rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych stanowi wykorzystanie do tego celu technik nieniszczących. Jedną z nich jest pomiar parametrów prądowo-magnetycznych z wykorzystaniem zjawiska prądów wirowych, wzbudzanych w materiałach przewodzących zmiennym polem elektrycznym. Subtelne zmiany w mikrostrukturze zachodzące lokalnie w miejscu inicjowania uszkodzenia powodują nieznaczne, ale możliwe do identyfikacji i zmierzenia zmiany takich właściwości, jak przewodność elektryczna czy przenikalność magnetyczna. Śledzenie dynamiki zmian tych właściwości podczas zmęczenia pozwala nie tylko na identyfikację i lokalizację uszkodzenia w początkowej fazie rozwoju, ale także stwarza perspektywę dla szacowania trwałości zmęczeniowej obciążonych elementów konstrukcji. Stąd też pomysł wykorzystania nieniszczącej techniki prądów wirowych do oceny rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego, która przez lokalny pomiar impedancji pozwala ocenić zmiany kombinacji przewodności elektrycznej i przenikalno-

ści magnetycznej. Badania tego typu przeprowadzono na żarowytrzymałej stali P91 (X10CrMoVNb9-1) [113–115], stopach niklu, Inconel 718 [116, 117] oraz MAR 247 z warstwą aluminidkową [118, 119], a także stopach aluminium 7075 i 2047 [120, 121]. Ponadto opracowano procedurę oceny stopnia uszkodzenia powierzchni natarcia łopatek turbin gazowych ze stopu niklu w temperaturze pracy (950°C), z wykorzystaniem metody prądów wirowych [122].

## 4.2 Metody opisu rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego

Identyfikacja uszkodzeń oraz kwantyfikacja integralności strukturalnej mają istotne znaczenie dla podniesienia bezpieczeństwa eksploatacji konstrukcji pracujących w warunkach obciążeń zmiennych. Stąd konieczność rozwijania metod diagnozowania struktury materiałów pod obciążeniem oraz prognozowania ich trwałości eksploatacyjnej, a tym samym zwiększenia czasu ich bezpiecznej pracy. W opracowaniu tych metod należy zacząć od przyjęcia założeń w zakresie zdefiniowania uszkodzenia. W najnowszej literaturze opisano wiele technik bazujących na modelach dotyczących monitorowania stanu strukturalnego, szacowania trwałości oraz definiowania parametrów uszkodzenia [123]. Metody te uwzględniają charakter obciążenia, rodzaj i mikrostrukturę obciążonego materiału, geometrię próbek, a czasami także środowisko pracy. Najczęściej stosowane są rozwiązania z wykorzystaniem modeli akumulacji uszkodzeń wprowadzonej przez Palmgreną około 70 lat temu i liniowej propagacji uszkodzeń opracowanej przez Minera około 50 lat temu [124]. Modele te wyznaczane są na podstawie zależności odkształcenia Coffina–Mansona jak w pracy [125], w której opracowano parametr uszkodzenia na podstawie odkształcenia karbu w celu oceny trwałości platformy morskiej obciążonej pływami. Zaproponowane równanie Coffina–Mansona posłużyło także do przewidywania wieloosiowej trwałości zmęczeniowej stali średniowęglowej przy obciążeniu proporcjonalnym lub nieproporcjonalnym [126] oraz do oceny właściwości zmęczeniowych wybranych gatunków stali, aluminium i tytanu w warunkach monotonicznego rozciągania [127]. Do szacowania trwałości zmęczeniowej są także wykorzystywane modele zmęczeniowe Kohouta–Věcheta (KV) [128], modele oparte na teorii Mansona–Halforda [129] oraz modele eksperymentalne, w których trwałość zmęczeniowa determinowana jest między innymi szybkością propagacji pęknięć o różnym rozmiarze [130, 131], lokalnym rozwojem odkształcenia plastycznego [132] lub wielkością ziarna [133].

Rozwój uszkodzeń zmęczeniowych rozpatrywany jest także w odniesieniu do zmian rejestrowanych w postaci wykresu Wöhlera i jego estymacji, jak to opisano na przykład w pracy [134], w której testy zmęczeniowe przeprowadzono przy

zmiennej amplitudzie obciążenia. Przebieg zmian w zależności siła–liczba cykli (S–N) może być także przydatny do opracowania modelu rozwoju uszkodzenia z wykorzystaniem fizycznego modelu Tanaki–Mury, jak to opisano w pracy [135], w której liczbę cykli koniecznych do zainicjowania pęknięcia oszacowano na podstawie rozkładu naprężenia w modelu mikrostrukturalnym.

Przegląd metod ilościowej oceny stopnia uszkodzenia w procesie zmęczeniowym oraz proponowanych miar degradacji przedstawiono w wielu publikacjach, na przykład [124, 136–138]. Wskazują one na bardzo dużą liczbę rozwiązań w tym zakresie, z których każde odnosi się do szczególnych przypadków ze względu na charakter obciążenia, mechanizm uszkodzenia, rozwój odkształcenia, wzrost temperatury, ewolucje sztywności, a nawet stan materiału poddanego obciążeniu czy geometrię próbek. Wiele z opisywanych metod stosuje do oceny rozwoju uszkodzeń hipotezę kumulacji uszkodzeń zmęczeniowych Palmgren–Minera, według której suma uszkodzeń jest wprost proporcjonalna do liczby cykli obciążenia i rośnie w zakresie od 0 w stanie wyjściowym do 1 w chwili zniszczenia elementu. Jednak należy zauważyć, że hipotezy kumulacji naprężenia przybliżają wprawdzie poznanie zjawisk towarzyszących zmęczeniu, jednak opracowane zostały na podstawie opisów makroskopowych składowych odkształcenia, bez uwzględnienia zjawisk zachodzących w skali mikro, czyli lokalnego charakteru inicjowania uszkodzenia [139].

### 4.3 Ilościowa ocena uszkodzenia zmęczeniowego

Stosowane obecnie metody diagnostyczne, wywodzące się z defektoskopii, umożliwiają wykrycie wad w postaci pęknięć i pustek, nawet w mikroskali. Skuteczność tych metod jest jednak znacznie ograniczona w detekcji zmian mikrostruktury poprzedzających powstawanie nieciągłości mikrostrukturalnych. Według wielu kryteriów oceny uszkodzenie definiowane jest jako zmiana właściwości materiałowych lub geometrycznych konstrukcji, która ma negatywny wpływ na pracę konstrukcji [140]. Dlatego badania rozwoju uszkodzeń materiałów wymagają w pierwszym kroku opracowania miary uszkodzenia, określającej w sposób ilościowy rozmiar defektu, z jednoczesnym śledzeniem dynamiki jego rozwoju. W przeprowadzonych badaniach własnych jako miarę uszkodzeń mikrostruktury przyjęto zmianę nieliniowej odpowiedzi materiału w kolejnych cyklach obciążenia o stałej amplitudzie naprężenia. Jest to sposób sprawdzony zarówno na próbkach osiowosymetrycznych klepsydrycznych, jak i płaskich z przewężeniem, ponieważ umożliwia on precyzyjną obserwację i ocenę stanu uszkodzenia przy obciążeniach cyklicznych, a także ocenę rozwoju defektu. Badania wad w postaci

pęknięć i pustek prowadzone są w celu wyznaczenia parametrów zmęczeniowych materiałów, a ponadto dają podstawę usprawnienia metodologii oceny trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcji.

Obserwacja zmian właściwości mechanicznych materiałów wywołanych rozwojem uszkodzeń mikrostrukturalnych zachodzących pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych wymaga precyzyjnego pomiaru naprężenia i odkształcenia. Proces rozwoju uszkodzeń ma charakter lokalny i nawet w przypadku jednorodnych obciążeń odpowiedź materiału może wywoływać niejednorodne rozkłady składowych odkształcenia. Podstawowym warunkiem monitorowania procesu rozwoju uszkodzeń jest rozwinięcie metod pomiaru odkształcenia, a następnie ich wykorzystanie do opracowania szeregu wzorców materiałowych o określonej wartości uszkodzenia zmęczeniowego, które przy wykorzystaniu metody prądów wirowych pozwolą na porównawczą analizę stanu elementów eksploatowanych w instalacjach i urządzeniach przemysłowych.

Jak już wspomniano, w mechanice pękania wprowadzono cały szereg parametrów uszkodzenia w zależności od przyjętej metody pomiarowej. Monitorowanie rozwoju defektów zmęczeniowych generowanych pod wpływem obciążeń cyklicznych jest możliwe przy użyciu parametrów mechanicznych wynikających z pomiarów zmian odkształcenia w kolejnych cyklach obciążeń o stałej amplitudzie. Jednym z głównych parametrów materiałowych projektowania inżynierskiego jest wytrzymałość zmęczeniowa wyznaczana na podstawie standardowej procedury Wöhlera. Nie daje ona jednak informacji o ewolucji uszkodzeń pod wpływem obciążeń cyklicznych, a w rezultacie nie mamy też informacji o akumulacji uszkodzeń zmęczeniowych przy złożonej historii obciążeń cyklicznych. Przyjmując liniowe prawo kumulacji uszkodzeń, co najczęściej ma miejsce w prostych obliczeniach wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji, określa się trwałość dla różnej historii obciążeń cyklicznych. Nie zawsze jednak to założenie jest uzasadnione. Dlatego bezpieczniejsze jest doświadczalne określenie rozwoju uszkodzeń na podstawie rejestracji odpowiedzi materiału na zadane wymuszenia cykliczne w czasie całego przebiegu doświadczenia. Stosując to rozwiązanie, można monitorować zmiany właściwości mechanicznych zachodzące pod wpływem obciążeń zmiennych w kolejnych cyklach obciążenia. Realizacja tego typu badań wymaga przede wszystkim zachowania osiowości przyłożonego obciążenia, zwłaszcza w cyklu ściskania, oraz stabilności pomiaru małych zmian odkształcenia w kolejnych cyklach obciążeń. Procedura badań zaproponowana przez Sochę [141, 142], której skuteczność potwierdził Dietrich [143, 144], jest efektywną techniką dla tego typu badań zmęczeniowych prowadzących nie tylko do określenia liczby cykli do zniszczenia próbki, ale przede wszystkim do wyznaczenia ewolucji parametru uszkodzenia materiału w zależności od wartości amplitudy naprężenia.

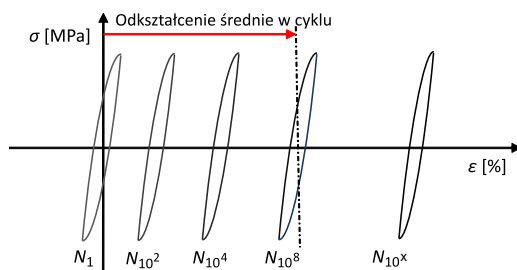
Zastosowanie techniki ilościowego opisu rozwoju degradacji w ocenie rozwoju procesów zmęczeniowych wielu materiałów konstrukcyjnych przez zespół Kowalewskiego [115, 145, 146] dało podstawę do korelacji parametru uszkodzenia z wartościami uzyskanymi za pomocą nieniszczących technik badawczych.

#### 4.4 Mechanizmy rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego

Proces degradacji większości stopów konstrukcyjnych rozwija się według kilku opisanych mechanizmów, w większości związanych z lokalnym rozwojem odkształcenia plastycznego. Jest on uruchamiany w obszarach lokalnej koncentracji naprężenia, takich jak wtrącenia i defekty, niejednorodność materiału, nieciągłości geometryczne, chropowatość powierzchni, zarysowania, naroża spoin, wady spawalnicze itp. Proces uszkodzenia pod wpływem obciążeń cyklicznych inicjowany jest zarodkowaniem defektów wzdłuż trwałych pasm poślizgu, co prowadzi do różnych mechanizmów jego rozwoju, związanych z powstawaniem mikro defektów na granicach ziaren, granicach bliźniaczych, wtrąceń, niejednorodności mikrostrukturalnych, a także mikroskopowych i makroskopowych skupisk naprężenia [147]. Mechanizmy te można opisać ilościowo na podstawie wyników badań mikrostrukturalnych [148] w powiązaniu ze zmianami mikro-twardości [149]. Należy zauważyć, że takie rozwiązania odnoszą się do obszaru ograniczonego do powierzchni wykonanego zglądu lub powierzchni przełomu po testach zmęczeniowych.

Bardziej globalny charakter mają analizy związane z monitorowaniem rozwoju odkształcenia w kolejnych cyklach obciążenia. W tym kontekście można wskazać dwa mechanizmy rozwoju uszkodzenia identyfikowalne dla większości metalicznych tworzyw konstrukcyjnych. Pierwszy z nich to *ratcheting* zdefiniowany przez Bree w 1967 roku [150] jako narastające odkształcenie niesprężyste, charakteryzujące się przesunięciem pętli histerezy w układzie naprężenie-odkształcenie wzdłuż osi odkształcenia. W przypadku wartości amplitudy naprężenia cyklicznego wyższej od granicy sprężystości lokalne odkształcenia plastyczne kumulują się, prowadząc do zniszczenia konstrukcji. Inicjowanie mechanizmu *ratchetingu* jest związane z poślizgiem, ruchem dyslokacji i lokalnymi odkształceniami sieci krystalicznej, najczęściej na karbach strukturalnych, którymi są pory, wtrącenia niemetaliczne i inne defekty struktury stanowiące koncentratory naprężenia. Obserwując generowane podczas testów zmęczeniowych pętłe histerezy (rysunek 4.2), łatwo zauważyć ich przesuwanie wzdłuż osi odkształcenia, wraz z kolejnymi cyklami obciążenia, przy zachowaniu stałej szerokości. W kolejnych cyklach rośnie tylko wartość odkształcenia średniego, przy stałej





Rysunek 4.2. Schematyczna ilustracja mechanizmu *ratchetingu* obserwowanego w kolejnych fazach obciążenia zmęczeniowego.

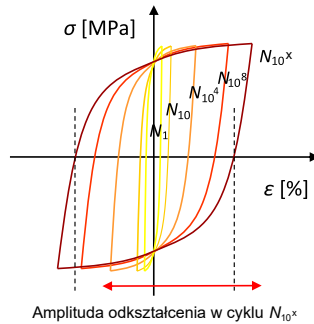
amplitudzie odkształcenia. Parametr uszkodzenia może być w tym przypadku skorelowany z wartością średniego odkształcenia w cyklu.

Mechanizm *ratchetingu* determinuje rozkład i wielkość defektów. Lokalne odkształcenie wywołane symetrycznymi cyklami naprężenia ma niesymetryczny charakter przy rozciąganiu i ścisaniu. Ponadto, inny będzie rozkład składowych odkształcenia wokół pustek (np. w stopach odlewniczych), a inny wokół twardych wtrąceń niemetalicznych, których pękanie wskutek cyklicznych zmian obciążenia determinuje dystrybucję składowych naprężenia. Zjawisko *ratchetingu* analizowane jest jako mechanizm degradacji struktury materiału, ale także jako proces rozwoju uszkodzenia konstrukcji.

Ocena trwałości zmęczeniowej na podstawie analizy akumulacji odkształcenia plastycznego związanego ze zjawiskiem *ratchetingu* była przedmiotem badań zmęczeniowych stopów cynku [151], stopów magnezu [152] oraz stopów Ni-Ti [153], a także rozwoju uszkodzenia w zbiornikach stalowych poddawanych naprężeniu dwuosiowemu [154].

Drugim mechanizmem rozwoju uszkodzenia pod wpływem obciążeń cyklicznych, możliwym do opisanego za pomocą pomiaru odkształcenia, jest cykliczna plastyczność generowana mikroślizgami poprzedzającymi powstawanie pasm poślizgów [155]. Proces ten charakteryzuje przyrost amplitudy odkształcenia, co widoczne jest w postaci poszerzenia pętli histerezy zmęczeniowej w kolejnych cyklach przy utrzymywaniu stałej, równej zero, wartości średniego odkształcenia w cyklu (rysunek 4.3). Zwiększanie wartości odkształcenia niesprężystego w kolejnych cyklach może także skutkować zmniejszaniem granicy plastyczności.

Mechanizm cyklicznej plastyczności analizowany na podstawie zmiany kształtu pętli zmęczeniowych opisano dla elementów wykonanych z monokrystalicznego i polikrystalicznego niklu, poddanych cyklicznym obciążeniom przy stałej amplitudzie odkształcenia plastycznego [156]. Badania te wykazały, że parametry

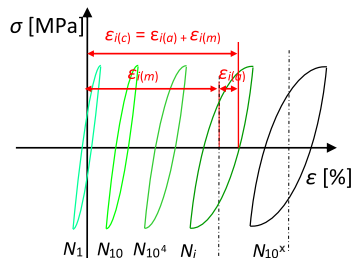


Rysunek 4.3. Schematyczna ilustracja mechanizmu cyklicznej plastyczności obserwowanego w kolejnych fazach obciążenia zmęczeniowego.

odkształceniowe skorelowane są z rozwojem podstruktur dyslokacyjnych. Podobne wyniki uzyskano dla stali austenitycznej 316L, w której za pomocą transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM) zaobserwowano struktury dyslokacyjne w próbkach po 100 cyklach obciążania z różnymi wartościami amplitudy odkształcenia [157]. Badania te wykazały, że organizacja struktur dyslokacyjnych może być skorelowana z wielkością nagromadzonego odkształcenia wywołanego poślizgiem, którego rozwój można ilościowo opisać z wykorzystaniem zjawiska cyklicznej plastyczności. Innym przykładem wykorzystania zjawiska cyklicznej plastyczności do opisu rozwoju uszkodzenia, przy stałych amplitudach odkształcenia plastycznego, jest praca [158], w której przedstawiono modele cyklicznej plastyczności dla trzech podstruktur dyslokacyjnych monokrystalicznego nikiel. Zjawiska towarzyszące cyklicznej plastyczności metali, polimerów, kompozytów i stopów z pamięcią kształtu szczegółowo opisano w pracy [159].

W większości metalicznych tworzyw konstrukcyjnych rozwój uszkodzenia związany jest z narastaniem odkształcenia według obu powyżej wymienionych mechanizmów. Dlatego też zarówno średnie odkształcenie niesprężyste, jak i amplituda odkształcenia, a także granica plastyczności mogą być miarą rozwoju uszkodzenia wykorzystywaną do wyznaczenia wartości parametru uszkodzenia w kolejnych cyklach obciążenia. W prezentowanych wynikach posłużono się parametrem bazującym na sumie wartości odkształcenia średniego oraz amplitudy odkształcenia mierzonych w kolejnych cyklach obciążenia, jak pokazano schematycznie na rysunku 4.4.

Przy założeniu, że rozwój uszkodzenia zmęczeniowego determinowany jest przyrostem wartości lokalnego odkształcenia wymuszonego lokalną koncentracją naprężenia, można opracować metodykę ilościowego opisu stopnia degradacji, zachodzącej według opisanych mechanizmów, na podstawie dynamiki rozwoju



Rysunek 4.4. Schematyczna ilustracja kombinacji mechanizmów *ratchetingu* i cyklicznej plastyczności obserwowanej w kolejnych fazach obciążenia zmęczeniowego.

odkształcenia. Taką ocenę prowadzi się na podstawie wyników pomiaru zarówno subtelných zmian składowych odkształcenia średniego, jak i amplitudy odkształcenia niesprężystego pod wpływem obciążeń zmiennych dla wszystkich rozpatrywanych wartości amplitudy naprężenia. Zmiany te zostały ujęte za pomocą parametru uwzględniającego charakter i dynamikę rozwoju odkształcenia w kolejnych cyklach zmęczenia wysokocyklowego. Jako parametr opisujący rozwój uszkodzenia przyjęto sumę odkształcenia średniego i amplitudy odkształcenia zdefiniowaną jako odkształceniowy współczynnik uszkodzenia zmęczeniowego ( $\Phi$ ) i wyrażony wzorem:

$$\Phi = \varepsilon_c = \varepsilon_a + \varepsilon_m, \quad (4.1)$$

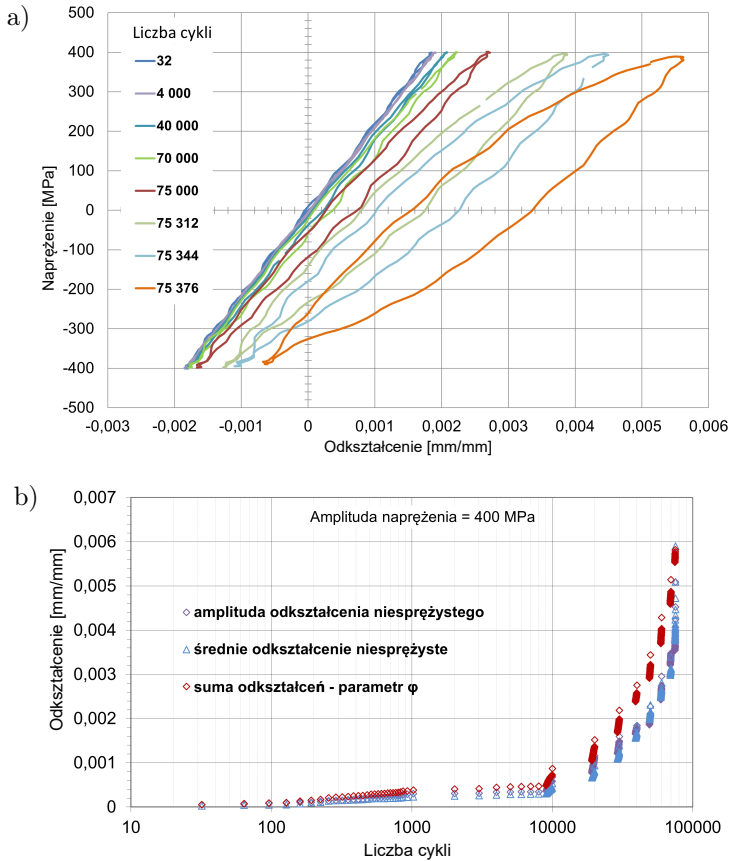
gdzie  $\varepsilon_a$  – amplituda szerokości pętli histerezy cyklu, wyrażona wzorem  $\varepsilon_a = \frac{\varepsilon_{\max}^{F=0} - \varepsilon_{\min}^{F=0}}{2}$ ;  $\varepsilon_m$  – średnie odkształcenie w cyklu określające położenie pętli histerezy danego cyklu na osi odkształcenia, wyrażone wzorem  $\varepsilon_m = \frac{\varepsilon_{\max}^{F=0} + \varepsilon_{\min}^{F=0}}{2}$ ;  $\varepsilon_c$  – całkowite odkształcenie w cyklu.

Zmiany odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego wykorzystano do wyznaczenia ewolucji parametru uszkodzenia  $D$ , który lepiej opisuje dynamikę zmian odkształcenia w kolejnych cyklach, ponieważ uwzględnia wartość odkształcenia w ostatnim cyklu stabilnego wzrostu uszkodzenia. Parametr uszkodzenia zmęczeniowego  $D$  określony jest zależnością:

$$D = \frac{\varphi_N - \varphi_{\min}}{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}, \quad (4.2)$$

gdzie  $\varphi_N$  – bieżąca wartość wskaźnika rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego w cyklu  $N$ ,  $\varphi_{\min}$  – minimalna wartość wskaźnika rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego na początku obciążeń cyklicznych dla cyklu  $N = 1$ ,  $\varphi_{\max}$  – maksymalna wartość wskaźnika rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego dla ostatniego cyklu okresu stabilnego rozwoju uszkodzenia  $N_f$ .

Tak zdefiniowane parametry umożliwiają określenie wartości stopnia uszkodzenia w dowolnym cyklu obciążenia oraz monitorowanie jego rozwoju. Parametry uszkodzenia wyznaczone w tej postaci były podstawą ilościowej oceny stopnia degradacji materiałów jako funkcji rozwoju odkształcenia plastycznego podczas cyklicznych obciążeń zmiennych. Wyniki przeprowadzonych testów zmęczeniowych posłużyły do opracowania wykresów rozwoju odkształcenia w kolejnych cyklach z uwzględnieniem odkształcenia średniego oraz amplitudy odkształcenia niesprężystego. Przykładowy wykres tego typu dla próbki ze stali żarowytrzymałej X10CrMoVNb9 poddanej cyklicznym obciążeniom symetrycznym o amplitudzie naprężenia  $\pm 400$  MPa przedstawiono na rysunku 4.5. Ilustruje on pętle histerezy zmęczeniowej dla wybranych cykli obciążenia (rysunek 4.5a) oraz



Rysunek 4.5. Ewolucja pętli histerezy zmęczeniowej (a) oraz rozwój składowych odkształcenia (b) w kolejnych cyklach obciążenia o amplitudzie  $\pm 400$  MPa próbek ze stali X10CrMoVNb9 [115].

dynamikę rozwoju składowych odkształcenia (rysunek 4.5b), jako parametr służący do ilościowej oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego.

W badaniach założono, że zjawisko skumulowanych uszkodzeń pod wpływem powtarzających się obciążeń jest związane z rozwojem odkształcenia. Podobne rozwiązanie w zakresie ilościowego opisu rozwoju degradacji zastosowano w badaniach aluminium, które potwierdziły koncepcję skumulowanego uszkodzenia zmęczeniowego [160].



# Ocena uszkodzenia zmęczeniowego żarowytrzymałej stali 1.4903

Rozdział ten skupia się na prezentacji wyników badań zmęczeniowych, mikrostrukturalnych oraz nieniszczących stopowej stali żarowytrzymałej 1.4903 w stanie dostawy oraz po eksploatacji w instalacji energetycznej. Opisano program badań zmęczeniowych realizowanych w szerokim zakresie amplitudy naprężenia oraz procedury wyznaczania parametru uszkodzenia na podstawie pomiaru odkształceń skumulowanych w kolejnych cyklach. Uzyskane wartości skorelowano z wynikami pomiarów parametrów sygnału prądowego. Dało to podstawy do nieniszczącej metodyki oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego stali żarowytrzymałej.

## 5.1 Opis żarowytrzymałej stali 1.4903

Stal żarowytrzymała 1.4903, o wcześniejszym oznaczeniu X10CrMoVNb9-1, znana jest przede wszystkim w krajowej branży energetycznej pod nazwą P91. Jest to stal chromowo-molibdenowa o strukturze martenzytycznej, dedykowana do pracy w podwyższonej temperaturze. Właściwości wytrzymałościowe tej stali oraz cechy mikrostrukturalne zostały opisane szczegółowo w pracach Dobrzańskiego [161, 162], w których zaprezentowano także mechanizmy degradacji różnych gatunków stali żarowytrzymałych w warunkach eksploatacyjnych.

Stal 1.4903 jest stosowana do budowy kotłowych przegrzewaczy pary, zbiorników pary, zbiorników ciśnieniowych i rurociągów pary z przeznaczeniem do pracy w temperaturze do 650°C. Trwałość pracy wyszczególnionych elementów uzależniona jest od czynników technologicznych i konstrukcyjnych, ale przede wszystkim od wzajemnej kombinacji temperatury, naprężenia i czasu eksploatacji, a także od środowiska. Warunki te decydują o przebiegu zjawisk degradacji związanych głównie z pełzaniem, które jest podstawowym procesem determinującym wytrzymałość metali i stopów w podwyższonej temperaturze, oraz zmęczeniem zarówno mechanicznym, jak i cieplnym.

Elementy konstrukcyjne w energetyce są eksploatowane w warunkach oddziaływania niejednorodnych i niestacjonarnych pól temperatury oraz obciążeń mechanicznych. Towarzyszą temu zmiany strukturalne, a w ślad za tym zmiany właściwości mechanicznych. Ponadto charakter pracy instalacji energetycznych sprzyja okresowym przeciążeniom, które skutkują pojawianiem się lokalnych deformacji plastycznych i uszkodzeń, zwykle w strefach spiętrzenia naprężenia wywołanych karbami mechanicznymi, karbami strukturalnymi oraz dużym gradientem temperatury [163]. Dodatkowo degradacja tych elementów związana jest z oddziaływaniem środowiska, w którym dochodzi do takich procesów, jak grafityzacja, kruchość wodorowa czy korozja wżerowa. Oprócz tego mamy do czynienia z destruktywnym wpływem przekroczenia nominalnych parametrów pracy potęgującym dynamikę rozwoju wymienionych wyżej procesów. W praktyce przemysłowej uszkodzenia elementów części ciśnieniowej kotłów są skutkiem więcej niż jednego rodzaju procesu uszkodzenia. Dlatego też pojawia się konieczność rozwijania procedur w zakresie monitorowania procesów degradacji oraz definiowania prawdopodobnego mechanizmu uszkodzenia różnych elementów instalacji energetycznych [164]. Wykonane badania dotyczyły w pierwszej kolejności oceny wpływu oddziaływania warunków eksploatacyjnych na mikrostrukturę i właściwości wytrzymałościowe stali 1.4903. Kolejny krok polegał na identyfikacji i lokalizacji defektów struktury powodowanych warunkami pracy konkretnego elementu. Następnie opracowano procedury detekcji powstających uszkodzeń we wczesnym etapie ich rozwoju, zweryfikowane w laboratoryjnych testach zmęczeniowych monitorowanych z udziałem technik nieniszczących.

## 5.2 Właściwości wytrzymałościowe i mikrostruktura stali 1.4903

Badania wykonano na zestawie próbek pobranych z rurociągu w stanie dostawy oraz z rurociągu pary świeżej eksploatowanego w czasie 80 000 godzin w warunkach działania ciśnienia 8.4 MPa oraz temperatury 540°C. Wyniki badań składu chemicznego obu elementów, przedstawione w tabeli 5.1, wskazują na zgodność zawartości pierwiastków stopowych obu wycinków z zakresem normowym.

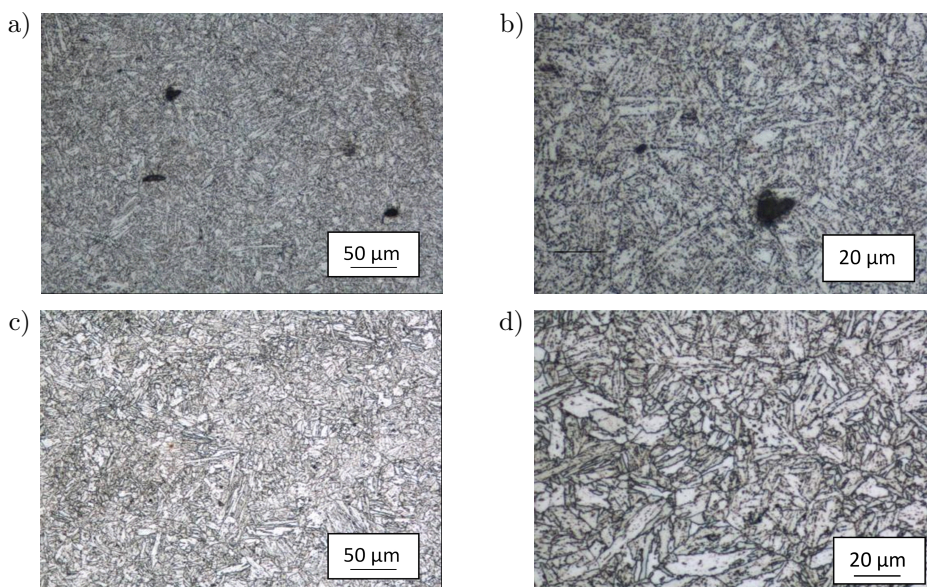
Dla próbek w stanie dostawy (stan „0”) oraz po ich eksploatacji (stan „80 000”) wykonano badania mikrostrukturalne oraz statyczną próbę rozciągania, która pozwoliła uzyskać parametry wytrzymałościowe ( $R_m$ ,  $R_e$ ) niezbędne do ustalenia obciążenia w testach zmęczeniowych. Badania mikrostrukturalne zarówno próbek ze stali w stanie dostawy, jak i po eksploatacji ujawniły strukturę odpusz-



Tabela 5.1. Skład chemiczny stali 1.4903 w stanie dostawy, po eksploatacji i według PN-EN 10216-2+A1:2020-05.

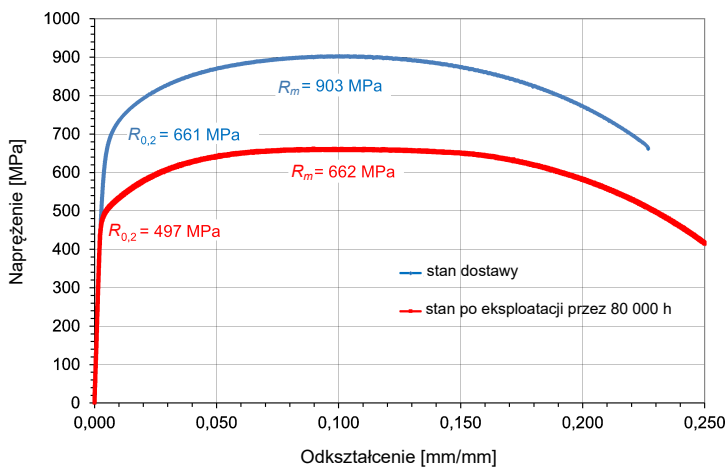
Stan stali 1.4903	C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Si	S	P
„0”	0,12	0,39	8,31	0,82	0,29	0,18	0,15	0,25	0,006	<0,001
„80 000”	0,11	0,43	8,16	0,86	0,24	0,28	0,13	0,15	0,008	0,042
Według normy	0,08–0,12	0,3–0,6	8–9,5	0,85–1,1	0,18–0,25	<0,4	<0,3	0,2–0,5	>0,01	–

czonego martenzytu z wydzieleniami węglików, których mniejszy udział stwierdzono dla stali eksploatowanej. Jak widać na rysunku 5.1, mikrostruktura stali w stanie dostawy cechuje się większą jednorodnością w zakresie rozkładu wielkości igieł martenzytu. Widoczne są także: nierozpuszczone węgliki oraz większe rozdrobienie struktury martenzytowej. Struktura po eksploatacji charakteryzuje się lokalnym rozrostem igieł martenzytu.

Rysunek 5.1. Mikrostruktura stali 1.4903 w stanie dostawy, przy powiększeniu  $\times 20$  (a) i  $\times 50$  (b), oraz po eksploatacji, przy powiększeniu  $\times 20$  (c) i  $\times 50$  (d).

Właściwości wytrzymałościowe stali 1.4903 przed i po eksploatacji określono na podstawie statycznej próby rozciągania na próbkach płaskich, wyciętych wzdłuż osi głównej elementów rurociągów. Uśrednione charakterystyki wytrzy-

małościowe stali w stanie dostawy i po eksploatacji przedstawiono na rysunku 5.2. W celu otrzymania wiarygodnych wyników próby rozciągania dla materiałów w stanie dostawy i po eksploatacji wykonano pięć niezależnych testów. Średnie wartości parametrów wyznaczonych z tych badań wraz z odchyleniem standardowym zestawiono w tabeli 5.2.



Rysunek 5.2. Uśrednione krzywe rozciągania dla próbek ze stali w stanie dostawy i po eksploatacji.

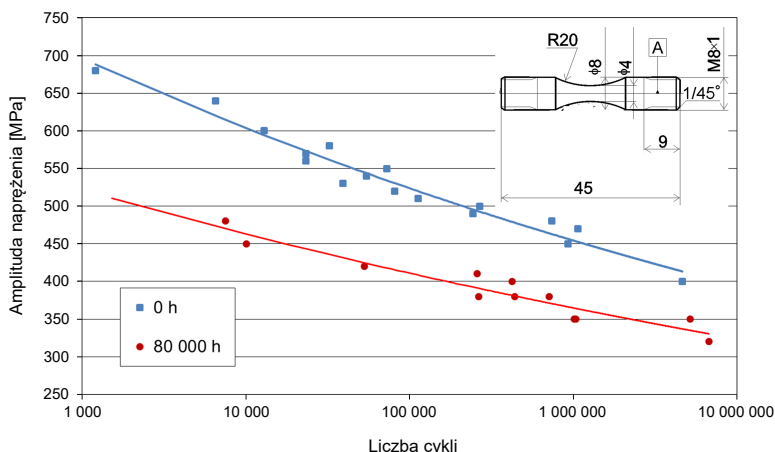
Tabela 5.2. Parametry wytrzymałościowe stali 1.4903 w stanie dostawy, po eksploatacji i według PN-EN 10216-2+A1:2020-05.

Stan stali 1.4903	$R_m$ [MPa]	$R_e$ [MPa]	$A$ [%]
„0”	$903 \pm 38$	$661 \pm 2$	$23 \pm 6$
„80 000”	$662 \pm 25$	$497 \pm 18$	$24,5 \pm 4$
PN-EN 10216-2+A1:2020-05	630–830	>450	17–19

Wyniki badań wskazują na znaczny spadek wytrzymałości stali pod wpływem eksploatacji przy niewielkim wzroście ciągliwości. Tym niemniej zmierzone parametry dla obu typów próbek mieszczą się w szerokim zakresie normy (tabela 5.2), co wskazuje, że czas 80 tys. godzin pracy nie obniża parametrów wytrzymałościowych do wartości poniżej wytycznych normy.

Kolejne badania o charakterze porównawczym dotyczyły badań trwałości zmęczeniowej próbek ze stali 1.4903 w stanie dostawy i po eksploatacji. Na podstawie wyników prób statycznych wykonano testy zmęczeniowe przy ustalonym zakresie wartości amplitudy naprężenia, tzn. 320–480 MPa dla próbek ze stali po eksploatacji oraz 400–680 MPa dla próbek ze stali w stanie dostawy.

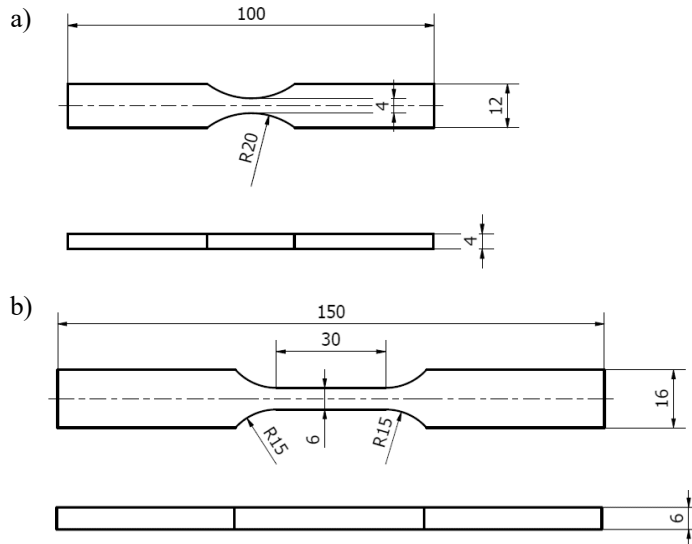
Wyniki tych badań zestawione w postaci wykresu Wöhlera przedstawia rysunek 5.3, gdzie pokazano także geometrię testowanych próbek. Wykres wskazuje wyraźny spadek wytrzymałości w całym zakresie amplitudy naprężenia. Różnica wartości trwałości zmęczeniowej dla obu stanów materiału jest mniej więcej taka sama w całym zakresie pomiarowym. Tym samym wykazano spadek tego parametru niezależnie od amplitudy naprężenia.



Rysunek 5.3. Charakterystyka zmęczeniowa stali w stanie dostawy i po eksploatacji.

Na podstawie testów zmęczeniowych wykonanych na osiowosymetrycznych próbkach klepsydrycznych wyznaczano charakterystyki zmęczeniowe materiału w stanie dostawy i po eksploatacji. Wykorzystanie metody prądów wirowych do oceny stopnia degradacji wymagało wykonania próbek płaskich w celu zapewnienia stałego, powtarzalnego kontaktu z powierzchnią próbki, w której indukowane były prądy wirowe. Wykonano zestaw płaskich próbek klepsydrycznych (rysunek 5.4a), w których kumulacja uszkodzeń zachodziła w przewężeniu próbki i w tym miejscu wykonano pomiary zmian kąta fazowego sygnału ET w kolejnych cyklach obciążenia. Dzięki temu stwierdzono wpływ stopnia uszkodzenia (zdefiniowanego wstępnie liczbą cykli) na wartość kąta fazowego sygnału ET. Na tej podstawie potwierdzono możliwość lokalizacji miejsc o największym stopniu uszkodzenia zmęczeniowego za pomocą pomiaru kąta fazowego sygnału ET.

Dalsze badania prowadzono więc na próbkach o wydłużonej części pomiarowej i geometrii pokazanej na rysunku 5.4b, gdzie umiejscowienie kumulacji uszkodzenia uwarunkowane jest nie karbem geometrycznym, ale koncentracją naprężenia. Próbki o takiej geometrii zostały przetestowane metodą prądów wirowych pod kątem możliwości wykrycia obszarów kumulacji na etapie, w którym



Rysunek 5.4. Próbkki do badań zmęczeniowych z udziałem metody ET: a) płaska z przewężeniem do identyfikacji zmian parametrów prądowych, b) płaska wydłużona do lokalizacji uszkodzenia na podstawie zmian parametrów impedancji.

nie powstały jeszcze pęknięcia. Szerokość części pomiarowej próbek zmęczeniowych badanych z wykorzystaniem tej metody była dostosowana do średnicy najmniejszej dostępnej sondy stykowej do badań prądowirowych przy uwzględnieniu efektu krawędziowego.

Badania zmęczeniowe wykonano na maszynie wytrzymałościowej MTS 858, z zakresem siły osiowej  $\pm 25$  kN, wyposażonej w sterownik cyfrowy. Próbkki osiowoosymetryczne były mocowane za pomocą specjalnych uchwytów zapewniających osiowość przyłożenia obciążenia i zapobiegających w ten sposób wyboczeniu próbki przy obciążeniach ściskających. Zastosowane uchwyty eliminują jednocześnie dodatkowe obciążenia wynikające z działania momentów zginających i skręcających, które prowadzą do złożonego stanu naprężenia. Obciążenie realizowano przy sterowaniu siłą, z utrzymywaniem zerowej jej wartości średniej w cyklu i stałej, dla danej próbki, wartości amplitudy naprężenia. W trakcie całego procesu obciążania mierzono zmianę średnicy w najmniejszym przekroju próbki, przy pomocy ekstensometru poprzecznego firmy MTS. Odkształcenie osiowe obliczano na podstawie zmiany średnicy próbki oraz przyjętej wartości współczynnika Poissona. We wszystkich badaniach stosowano wahadłowy (symetryczny) cykl obciążenia o częstotliwości 20 Hz oraz o amplitudzie naprężenia w przedziale 320–680 MPa.

Badania na próbkach płaskich klepsydrycznych wykonano również, rejestrując wartości odkształcenia poprzecznego z użyciem tego samego ekstensometru, natomiast pomiar odkształcenia na próbkach z wydłużoną częścią pomiarową realizowany był przy użyciu osiowego ekstensometru wzdłużnego firmy MTS. Podczas badań sterowanie prowadzono sygnałem przemieszczenia trawersy maszyny, siły lub odkształcenia próbki.

Testy zmęczeniowe, podczas których prowadzono badania z wykorzystaniem technik nieniszczących, wymagały zatrzymania obciążenia na różnych etapach rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego. Było to konieczne, aby umożliwić rejestrację parametrów impedancji w warunkach odciążenia próbki i uniknąć wpływu naprężenia zadawanego przez maszynę wytrzymałościową. Zatrzymania te były częstsze w ostatnim etapie testu, kiedy następował gwałtowny przyrost odkształcenia związanego z inicjowaniem mikropęknięć i tworzeniem się szczeliny dominującej. Dzięki temu uzyskano próbki o wysokim poziomie lokalnie skumulowanego odkształcenia, przy zachowaniu ich spójności. Próbki takie wykorzystano do dalszych badań w zakresie nieniszczącej detekcji uszkodzenia zarówno na poziomie lokalnych zmian mikrostrukturalnych, jak i pęknięć, które zidentyfikowano metodą prądów wirowych.

### 5.3 Rozwój parametrów uszkodzenia zmęczeniowego stali 1.4903

Opis stopnia degradacji właściwości wytrzymałościowych w próbach zmęczeniowych jest możliwy nie tylko na podstawie interpretacji przebiegu krzywej Wöhlera, ale także w postaci analizy zmian dynamiki rozwoju uszkodzenia zarówno w zakresie poziomu odkształcenia średniego, jak i amplitudy odkształcenia niesprężystego. Wspomniane wyżej zmiany w przypadku próbek ze stali 1.4903 zostały sparametryzowane za pomocą odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego ( $\Phi$ ) i parametru uszkodzenia zmęczeniowego  $D$ , opracowanego przez Sochę [141, 164]. Tego typu podejście z powodzeniem było stosowane przy opracowaniu wyników badań różnych materiałów prowadzonych w Zakładzie Wytrzymałości Materiałów IPPT PAN, pod kierownictwem prof. L. Dietricha oraz prof. Z. Kowalewskiego, a istotne szczegóły dotyczące procedury ich realizacji opisano w pracach [111, 112, 114, 143].

Na podstawie rejestracji zmian składowych odkształcenia w kolejnych cyklach obciążenia wyznaczono parametry uszkodzenia zmęczeniowego dla obu typów materiału rurociągu ze stali 1.4903. W opracowaniu uzyskanych wyników istotne było zdefiniowanie dominującego mechanizmu uszkodzenia zmęczenio-

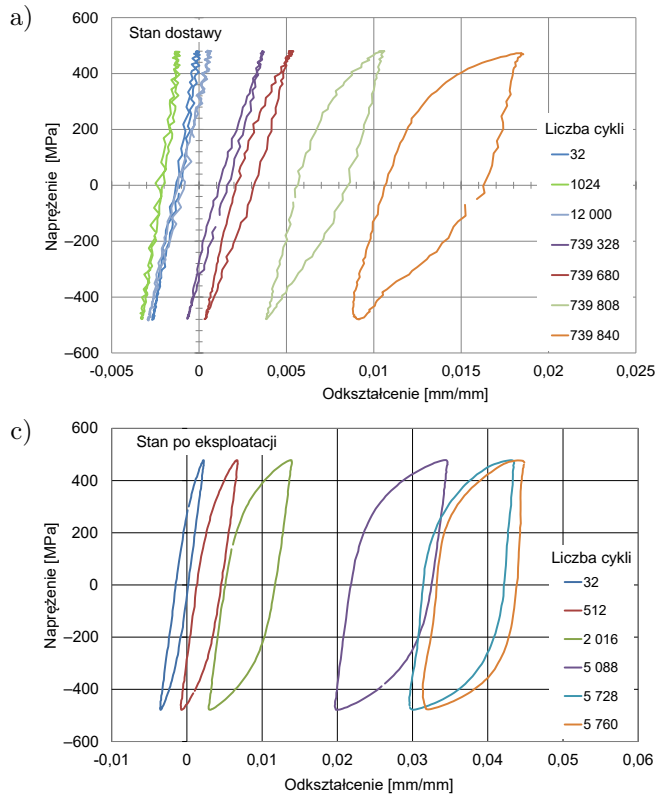
wego, wybór mierzalnej wielkości do ilościowego wyznaczenia parametru uszkodzenia zmęczeniowego oraz do określenia ewolucji procesu rozwoju uszkodzenia. Na podstawie analizy zmian pętli histerezy niemal wszystkich próbek można wskazać *ratcheting* jako mechanizm dominujący w początkowej fazie zmęczenia oraz cykliczną plastyczność, której udział w trakcie deformacji rośnie wraz ze wzrostem amplitudy naprężenia, a także liczby zadawanych cykli. W przypadku prób o amplitudzie naprężenia bliskiej wartości granicy plastyczności mechanizm cyklicznej plastyczności dominuje niemal od początku testu zmęczeniowego.

Opisane mechanizmy uszkodzenia zaprezentowane na przykładzie próbek w stanie dostawy i po eksploatacji dotyczyły jedynie rozwoju uszkodzenia generowanego w jednoosiowych testach zmęczeniowych. W dalszych badaniach podjęto próbę wykorzystania opracowanych procedur do oceny stopnia degradacji pod wpływem eksploatacji. Z wyznaczonej zależności Wöhlera wynika spadek trwałości zmęczeniowej wyrażonej wartością naprężenia, przy której nie dochodzi do rozwoju uszkodzenia w zakresie liczby cykli wynoszącej  $10^7$ .

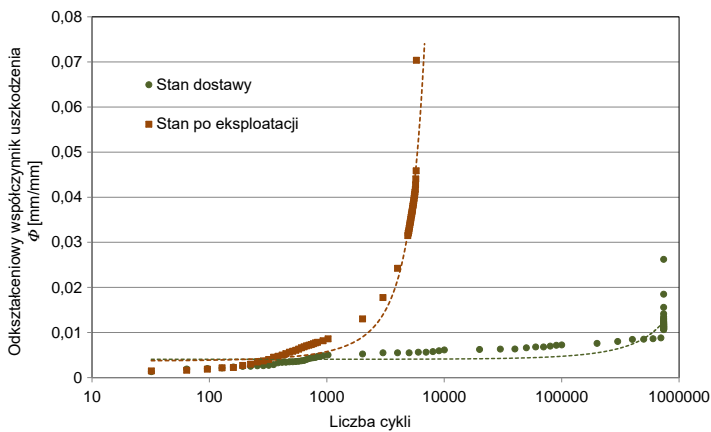
Na rysunku 5.5 przedstawiono rozwój odkształcenia w wybranych cyklach przy amplitudzie naprężenia 480 MPa dla próbki w stanie dostawy i po eksploatacji. Widoczna jest różnica w proporcji odkształcenia średniego i amplitudy odkształcenia związana z degradacją właściwości stali 1.4903 w warunkach pracy.

Efekt ten jest wyraźniejszy przy porównaniu przebiegu zmian zdefiniowanych wcześniej parametrów opisujących proces uszkodzenia dla obu rodzajów próbek. Zmiany parametru  $\Phi$  dla próbek po eksploatacji (stan „80 000”), w całym zakresie wartości amplitudy naprężenia, umożliwiają porównanie ze stanem „0” (400–480 MPa). Wskazują one od samego początku obciążenia na większą dynamikę rozwoju uszkodzenia, rosnącą wykładniczo, a także pokazują znacznie wyższy stopień odkształcenia (zarówno średniego, jak i niesprężystego w cyklu) niż w przypadku próbki z materiału w stanie dostawy (rysunek 5.6). Taki wynik sugeruje pojawienie się znacznego odkształcenia trwałego materiału pod wpływem eksploatacji, co może być związane z procesami dyfuzyjnego pełzania w warunkach pracy rurociągu. W przypadku próbek z materiału nieeksploatowanego przyrost odkształcenia jest mniejszy i ma charakter niemal liniowy w funkcji czasu, aż do ostatniego etapu rozwoju pęknięcia, kiedy to odkształcenie wzrasta gwałtownie i następuje dekohezja.

Szczegółowy opis wyników badań i analiz rozwoju parametrów uszkodzenia stali w obu stanach opublikowano w pracach [115, 165, 166] oraz prezentowano na konferencjach (np. [167]). Niezależnie od historii obciążenia próbek zwiększona dynamika rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego w początkowej fazie



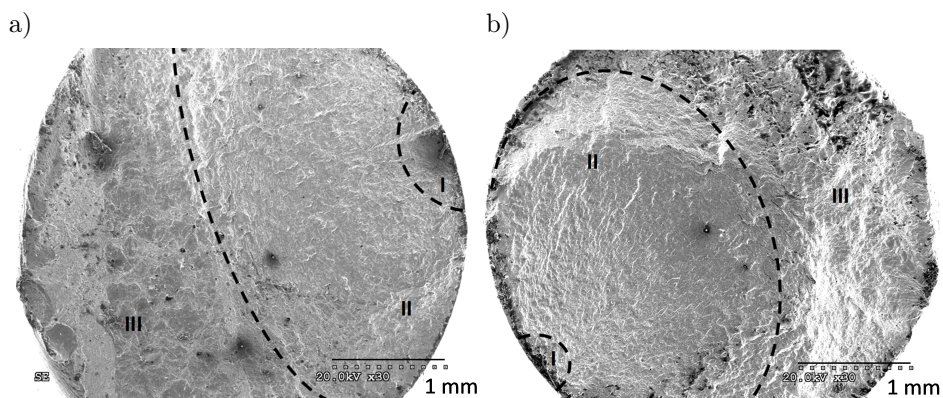
Rysunek 5.5. Rozwój odkształcenia w wybranych cyklach dla próbki przed (a) i po eksploatacji (b), amplituda napężenia 480 MPa.



Rysunek 5.6. Rozwój procesu uszkodzenia zmęczeniowego materiału przed i po eksploatacji dla amplitudy napężenia 480 MPa wyrażony zmianami odkształceniowego współczynnika uszkodzenia zmęczeniowego  $\Phi$ .

procesu wskazuje, jak istotne jest ograniczanie liczby zatrzymań technologicznych i remontowych pracujących instalacji i konstrukcji, ponieważ determinują one trwałość poszczególnych jej elementów. Każde wznowienie pracy wpływa na uruchomienie innych mechanizmów degradacji, które znacząco obniżają trwałość zmęczeniową materiału i elementów z niego wykonanych. Wartości parametru uszkodzenia wyznaczone dla próbek osiowosymetrycznych stanowią podstawę weryfikacji wartości uzyskanych dla płaskich próbek klepsydrycznych, które są następnie korelowane z wartościami parametrów impedancji uzyskanymi przy użyciu metody prądów wirowych.

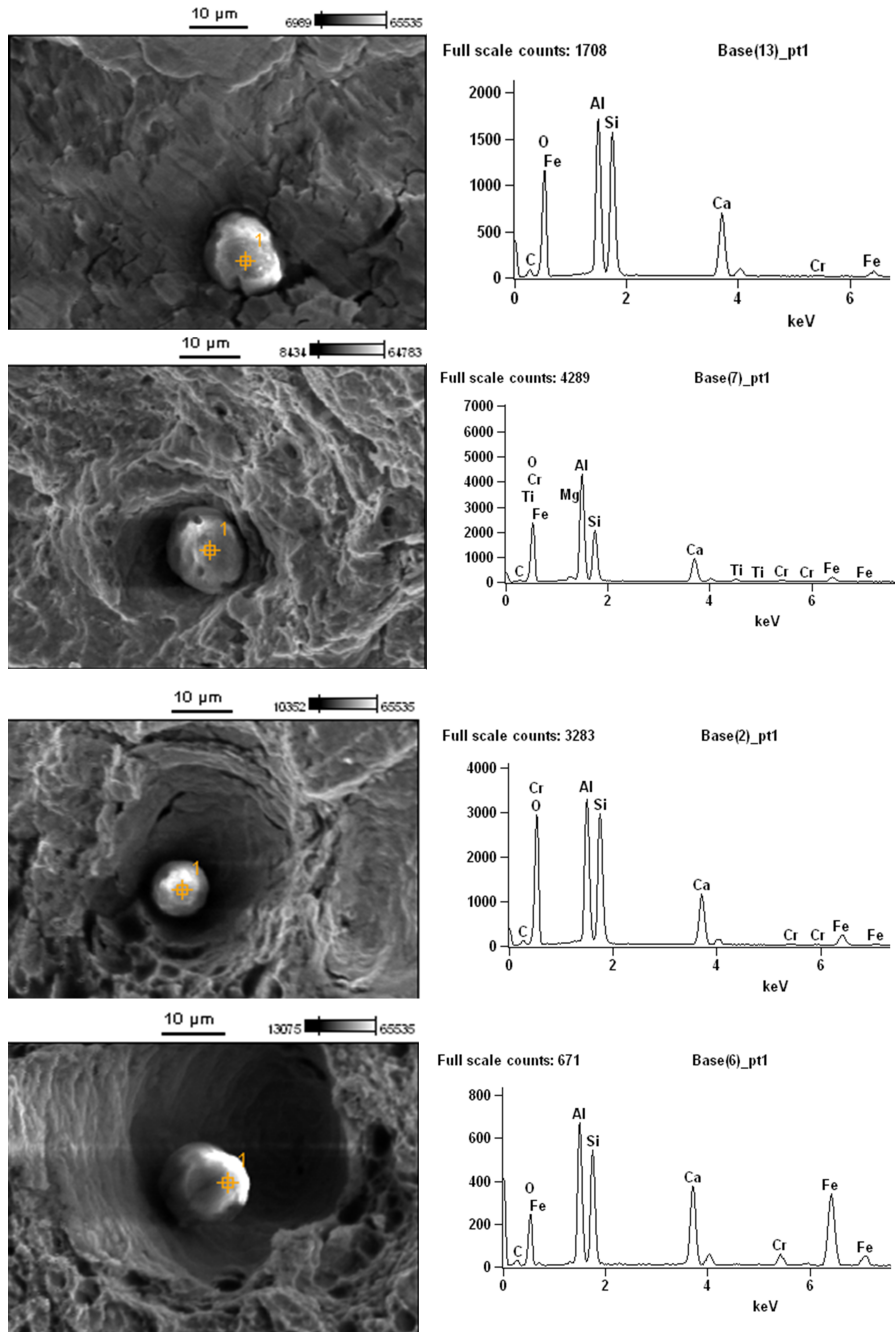
Badania zmęczeniowe przeprowadzono na zestawie próbek osiowosymetrycznych aż do chwili ich zniszczenia. Otrzymane przełomy poddano następnie badaniom fraktograficznym. Obserwacje złomów pozwoliły określić wpływ amplitudy naprężenia na ich charakter. Na rysunku 5.7 przedstawiono dwa przykładowe złomy zmęczeniowe stali 1.4903 uzyskane w procesie zmęczenia przy dwóch różnych amplitudach naprężenia, ze wskazaniem obszaru inicjowania uszkodzenia (I), strefy zmęczeniowej (II) oraz strefy resztkowej (III). Wielkość obszaru dołamania jest adekwatna do wielkości cyklicznego naprężenia, na co wskazuje większy udział tej strefy dla wyższej amplitudy naprężenia.



Rysunek 5.7. Przełomy zmęczeniowe uzyskane przy dwóch wielkościach amplitudy naprężenia: 580 MPa (a) oraz 480 MPa (b).

Badania fraktograficzne wszystkich przebadanych przełomów, wykonane na mikroskopie skaningowym HITACHI 260, wykazały obecność mniej lub bardziej licznych wtrąceń, których charakter wskazuje na wtrącenia niemetaliczne (rysunek 5.8). Potwierdzają to również wyniki analizy chemicznej wybranych wtrąceń wykonane przy użyciu spektrometru rentgenowskiego z dyspersją energii (EDS) firmy Oxford, która uwidacznia obecność związków aluminium (tlenek) oraz

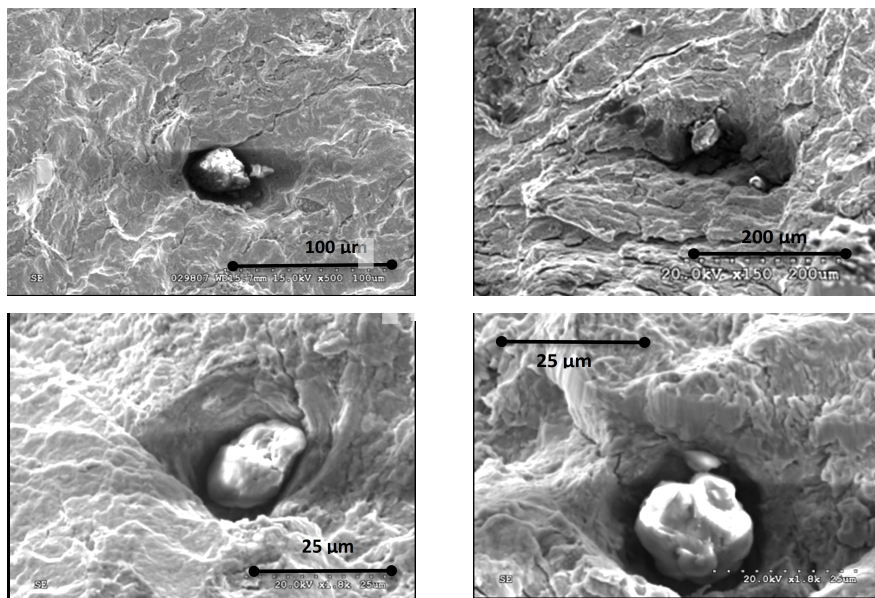




Rysunek 5.8. Przykładowe przełomy próbek zmęczeniowych z udziałem wtrąceń niemetalicznych i ich analiza EDS określająca skład chemiczny.

krzemu (tlenek lub dwutlenek). Można założyć, że te twarde wtrącenia niemetaliczne, tworząc lokalne koncentratory naprężenia, stanowiły miejsca inicjowania procesu uszkodzenia prowadzącego do utraty spójności próbek pod obciążeniem cyklicznym.

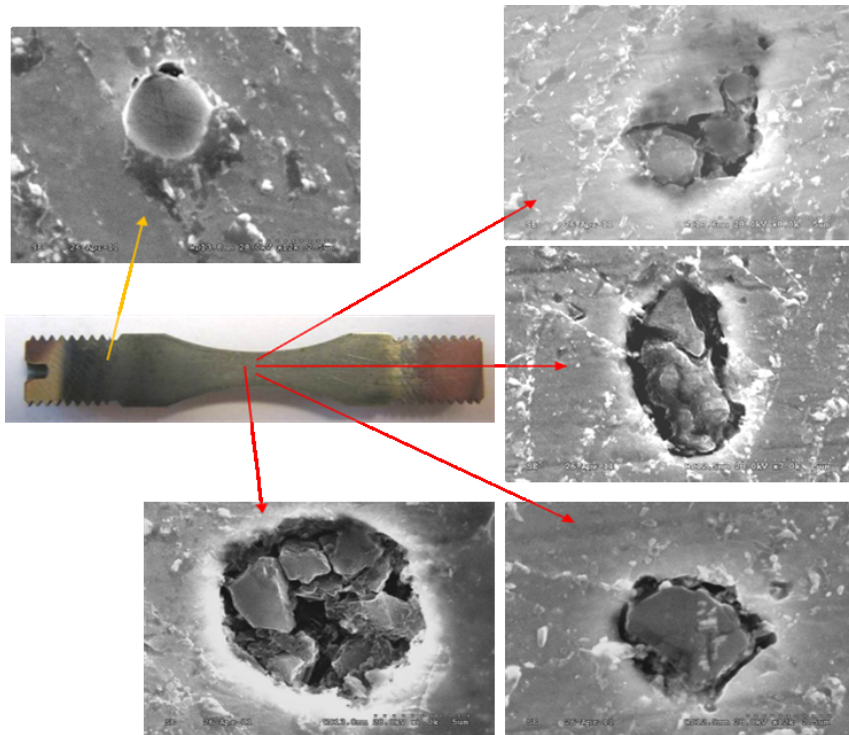
W wielu przypadkach widać, że wtrącenia zlokalizowane są w kraterach, których rozmiar jest większy niż rozmiar wtrącenia. Sugeruje to, że propagacja odkształcenia plastycznego miała swój początek w miejscu lokalizacji wtrąceń, które działały jako koncentratory naprężenia. Można tu mówić o zjawisku utraty spójności między „plastyczną” osnową stalową a twardymi i kruchymi wtrąceniami, w wyniku którego zmniejsza się powierzchnia przenoszenia obciążeń cyklicznych wraz ze wzrostem udziału wtrąceń na powierzchni przełomu. Na zdjęciach przedstawionych na rysunku 5.9 pokazano mikrostrukturę fragmentów wybranych przełomów uwidaczniających mikropęknięcia, których kierunek i położenie wskazuje możliwość ich propagacji w kierunku od wtrącenia. Można zatem wnioskować, że wtrącenia niemetaliczne stanowią miejsca potencjalnego inicjowania mikropęknięć zmęczeniowych. Potwierdzają to zdjęcia przedstawiające mikropęknięcia zapoczątkowane w obszarach wtrąceń niemetalicznych.



Rysunek 5.9. Fragmenty przełomów z pęknięciem zainicjowanym na wtrąceniu niemetalicznym.

Badania mikrostrukturalne obejmowały także obserwacje zglądów przekrojów wzdłużnych próbek poddanych obciążeniom zmęczeniowym w zakresie zna-

czącej liczby cykli, dla których przerwano testy zmęczeniowe przed pęknięciem. Dla jednej z takich próbek, poddanej próbie zmęczenia wysokocyklowego przy amplitudzie naprężenia  $\pm 400$  MPa, stwierdzono w przypadku wszystkich wtrąceń znaczące skutki oddziaływania tych obciążeń. Jak widać na rysunku 5.10, bardziej plastyczna osnowa metaliczna wokół twardych wtrąceń została od nich odspojona, a same wtrącenia w większości uległy pokruszeniu. Dla porównania przedstawiono obraz wtrącenia z części chwytowej próbki, które jest mocno zintegrowane z osnową. Różnice te wskazują na udział elementów mikrostruktury o odmiennej morfologii w mechanizmie rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego, co potwierdza jednocześnie fakt dominacji rozwoju składowych odkształcenia odpowiadających za ratcheting pod wpływem obciążeń cyklicznych związany z lokalnymi deformacjami.

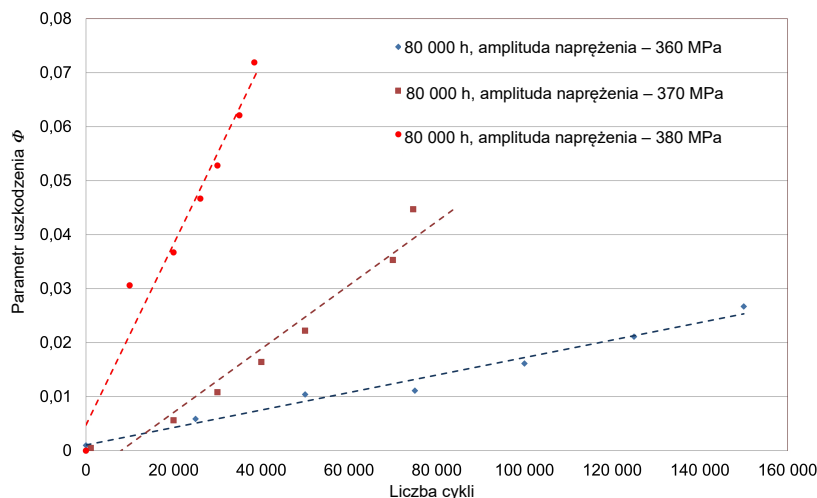


Rysunek 5.10. Wtrącenia niemetaliczne w strefie oddziaływania obciążeń zmęczeniowych i poza nią.

Wykonane badania potwierdziły hipotezę związaną z mikrostrukturalnymi uwarunkowaniami procesu degradacji zmęczeniowej determinowanej mechani-

zmem ratchetingu. Badania mikrostruktury próbek poddanych testom zmęczeniowym wykazały wystąpienie deformacji osnowy wokół twardych, ceramicznych wtrąceń oraz dezintegrację samych wtrąceń, wskazując na ich odspojenie od osnowy. Tym samym ujawniono wpływ elementów mikrostruktury o odmiennych właściwościach w stosunku do osnowy na mechanizm rozwoju degradacji zmęczeniowej, co opisano szczegółowo w pracach [115, 165]. Fakt powstawania lokalnych mikro-nieciągłości wokół wtrąceń na skutek oddziaływania zmiennych obciążeń cyklicznych pozwala przypuszczać, że tego typu defekty mogą wpływać na subtelne zmiany impedancji obszarów zdegradowanych.

W kolejnym podrozdziale przedstawiono wyniki badań w zakresie opisu tych zmian z zastosowaniem metody prądów wirowych. W tym przypadku zastosowano próbki płaskie, jako bardziej optymalne dla uzyskania powtarzalnych wyników z użyciem metody prądów wirowych techniką „lift off”. Ideą tych badań było skorelowanie uzyskanych wartości kąta fazowego z wartościami odkształceniowego parametru uszkodzenia  $\Phi$ , którego zależność od liczby cykli zmęczeniowych, dla różnej wartości amplitudy naprężenia, można aproksymować zależnością liniową, co pokazuje wykres na rysunku 5.11.



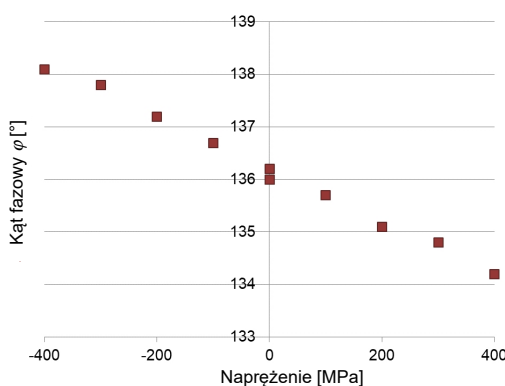
Rysunek 5.11. Zmiany parametru uszkodzenia  $\Phi$  w funkcji liczby cykli zmęczeniowych dla trzech wartości amplitudy naprężenia.

Prezentowane wyniki, uzyskane dla próbek ze stali po eksploatacji, wskazują, że dynamika wzrostu parametru uszkodzenia silnie zależy od amplitudy naprężenia, a przyrost wartości w funkcji liczby cykli jest niemal liniowy. Wyniki te potwierdziły założenie, że opracowany parametr uszkodzenia dobrze opisuje

je rozwój uszkodzenia materiału w kolejnych cyklach obciążeń zmęczeniowych, w szerokim zakresie amplitudy.

## 5.4 Metoda prądów wirowych w ocenie stopnia uszkodzenia stali 1.4903

Wykorzystanie metody prądów wirowych indukowanych w materiałach konduktywnych polega na rejestracji i analizie składowych sygnału impedancji, tzn. amplitudy i kąta przesunięcia fazowego. Do oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego, wyrażonego skumulowanym odkształceniem niesprężystym, zastosowano analizę zmian kąta fazowego impedancji. Skuteczność tego rozwiązania zweryfikowano w pierwszej kolejności w zakresie odkształcenia sprężystego. Badania te sprowadzały się do potwierdzenia możliwości detekcji zmian poziomu naprężenia przy użyciu defektoskopu prądowirowego. Dokonano pomiarów kąta fazowego  $\varphi$  na próbkach z lokalnym przewężeniem przekroju pod obciążeniem statycznym o różnej wartości naprężenia zarówno rozciągającego, jak i ściskającego w zakresie od  $-400$  do  $400$  MPa. Pomiar realizowany był przez przyłożenie sondy pomiarowej do powierzchni próbki w miejscu najmniejszego przekroju przy ustalonej wartości naprężenia sterującego maszyną wytrzymałościową. Na tej podstawie stwierdzono niemal liniową zależność kąta fazowego  $\varphi$ , uzyskanego w efekcie „lift off”, od wielkości i kierunku naprężenia, co obrazuje wykres na rysunku 5.12.



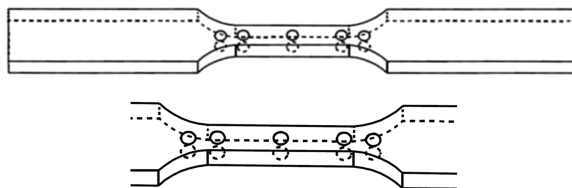
Rysunek 5.12. Zależność kąta fazowego od wartości przyłożonego naprężenia rozciągającego i ściskającego.

Na wykresie przedstawiono uśrednione wyniki pomiarów z obu stron próbki. Wartości zmierzonego kąta fazowego nie różnią się znacząco w rozpatrywa-

nym zakresie obciążenia, tym niemniej uwidoczniono zależność tego parametru od poziomu naprężenia. Ponieważ proces degradacji zmęczeniowej rozwija się lokalnie w miejscu koncentracji naprężenia, fakt czułości prądów wirowych na zmiany naprężenia jest istotny dla ich wykorzystania do monitorowania rozwoju uszkodzenia pod wpływem obciążeń cyklicznych.

Ocenę stopnia uszkodzenia próbek ze stali 1.4903 w stanie dostawy, w warunkach zmiennych obciążeń cyklicznych realizowano za pomocą aparatu NORTEC 600D firmy Olympus oraz absolutnych sond ołówkowych o częstotliwości pracy od 5 kHz do 1 MHz. Zakres częstotliwości wynikał z możliwości zastosowania jedynie sond o małej średnicy, umożliwiającących pomiar w części pomiarowej próbek o szerokości do 6 mm. Parametry pomiarów (wzmocnienie, napięcie) dobrane były pod kątem optymalnego zobrazowania zmian kąta fazowego.

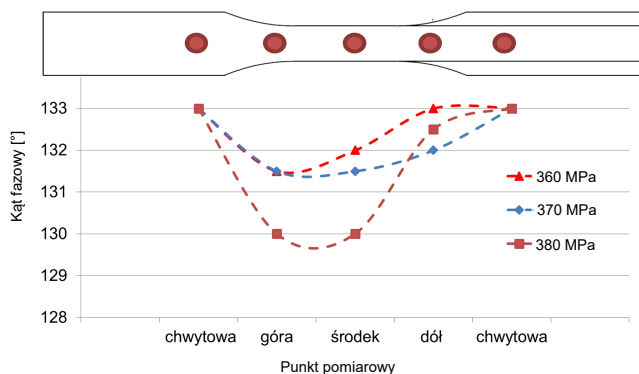
Badania z wykorzystaniem metody prądów wirowych prowadzono w trakcie obciążeń cyklicznych podczas zatrzymań po ustalonej liczbie cykli zmęczeniowych przy zerowej wartości siły. Oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego dokonano z wykorzystaniem zależności kąta fazowego od sygnału oddalenia „lift off” oraz oceny jego zmian w funkcji parametrów opisujących jego rozwój. Pomiarów wykonano w pięciu miejscach, na każdej z dwóch stron próbki, według schematu przedstawionego na rysunku 5.13. Dzięki temu wartości kąta fazowego z trzech miejsc części pomiarowej, gdzie koncentrują się odkształcenia, można było korelować z wartością kąta w miejscach o zerowej (w przybliżeniu) wartości odkształcenia. Ustalone miejsca pomiaru były w większości zgodne z lokalizacją pęknięcia.



Rysunek 5.13. Szkic obrazujący miejsca wybrane do pomiarów kąta fazowego sygnału ET.

Wyniki pomiarów kąta fazowego sygnału prądowirowego przedstawiono w zależności od amplitudy naprężenia zmęczeniowego oraz od zmiennej liczby cykli przy stałej amplitudzie obciążenia. Na tej podstawie wykazano, że dla większych wartości amplitudy naprężenia prowadzą do uzyskania większych wartości zmian kąta fazowego. Wynika z tego, że głównym czynnikiem determinującym możliwość oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego jest poziom naprężenia skumulowanego w próbce pod wpływem zmiennego obciążenia cyklicznego. Fakt ten

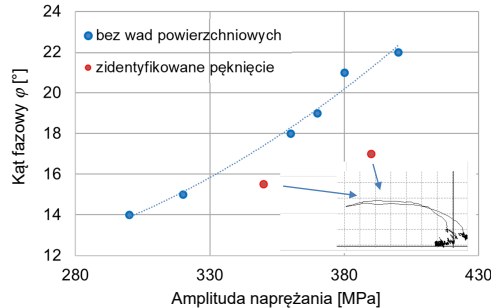
potwierdza rozkład wartości kąta fazowego  $\varphi$  w wybranych miejscach wzdłuż osi trzech próbek poddanych testom zmęczeniowym przy różnych wartościach amplitudy naprężenia do uzyskania 25 000 cykli, a następnie odciążonych i wyjętych ze szcęk maszyny wytrzymałościowej (rysunek 5.14).



Rysunek 5.14. Wartości kąta fazowego sygnału ET w wybranych miejscach pomiarowych próbek poddanych cyklicznym obciążeniom zmiennym o trzech różnych amplitudach naprężenia, do uzyskania 25 000 cykli obciążenia.

Na podstawie analizy powyższych przebiegów można wskazać jako miejsce potencjalnego rozwoju uszkodzenia obszar w górnej części każdej z trzech próbek. Inne zależności pokazują wyniki pomiaru kąta fazowego  $\varphi$  w funkcji amplitudy naprężenia. Początkowo wyniki uzyskane dla testów realizowanych przy amplitudzie w zakresie 300–400 MPa wykazywały duży rozrzut i nie wskazywały wyraźniej zależności (wykres na rysunku 5.14). Jednak po wykonaniu pomiarów kąta fazowego według ustalonej procedury wszystkie próbki, które nie uległy dekohezji, zostały poddane standardowym badaniom defektoskopowym w celu identyfikacji i lokalizacji potencjalnych pęknięć. W wyniku tych badań stwierdzono występowanie pęknięć w części pomiarowej dwóch próbek. Dla tych próbek kąt fazowy wykazywał mniejszą wartość w porównaniu z resztą pomiarów. To potwierdziło założenie o zależności kąta fazowego od stanu naprężenia w próbce, ponieważ pęknięcie spowodowało relaksację naprężenia skumulowanego w tych próbkach w trakcie obciążenia.

Efekt ten jest widoczny na rysunku 5.15, na którym przedstawiono wyniki pomiarów wielkości kąta dla próbek poddanych testom zmęczeniowym zakończonym po ustalonej liczbie 25 000 cykli obciążenia. Pomiarów kąta fazowego charakteryzują się dużą rozbieżnością wyników. Po badaniach defektoskopowych powierzchni próbek stwierdzono w dwóch przypadkach pęknięcia w strefie pomiarowej, które wpłynęły na wartość zmierzonego kąta wskutek częściowej re-



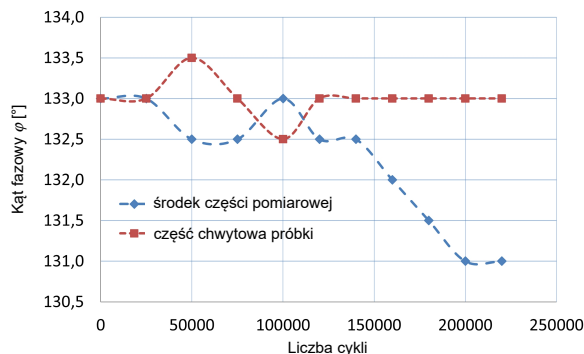
Rysunek 5.15. Zależność wartości kąta fazowego  $\varphi$  od amplitudy naprężenia dla próbek po testach zmęczeniowych zatrzymywanych przed pęknięciem oraz ze wskazaniem nieciągłości.

laksacji naprężeń resztkowych skumulowanych w wyniku obciążeń cyklicznych. Poziom tych składowych naprężenia jest oczywiście proporcjonalny do wartości amplitudy naprężenia. Pomiary kąta fazowego prowadzono przy częstotliwości prądu wzbudzającego 500 kHz, co było wartością optymalną dla badań próbek ze stali żarowytrzymałej o grubości w zakresie 4–6 mm.

Na podstawie powyższego wyniku można uznać, że pomiar kąta fazowego próbek po różnej liczbie cykli pozwala nie tylko oceniać zmiany stanu naprężenia, ale także uzyskiwać dane o zmianach właściwości i/lub mikrostruktury wynikających z procesów degradacji wywołanych zmęczeniem. Aby opisać dynamikę rozwoju procesu degradacji zmęczeniowej z wykorzystaniem prądów wirowych, konieczne było opracowanie programu badawczego uwzględniającego zakres amplitudy naprężenia odpowiedni dla wytrzymałości stali 1.4903 z różną historią eksploatacji oraz procedurę zatrzymań obciążeń cyklicznych. W pierwszych próbach pomiar parametru impedancji wykonano tylko dla środkowej części próbki oraz w części chwytowej jako wartości referencyjnej, aby potwierdzić skutki wpływu historii obciążenia na wartość mierzonego kąta fazowego  $\varphi$ . Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 5.16 w postaci zmian impedancji zmierzonej na próbkach ze stali 1.4903 po eksploatacji w funkcji liczby cykli uzyskanych przy obciążeniu zmiennym, odzerowo-tętniącym, o amplitudzie naprężenia 360 MPa, aż do uzyskania 220 000 cykli obciążenia.

Wartość kąta  $\varphi$  zaczyna się zmniejszać mniej więcej w połowie liczby cykli do zniszczenia. Jest to zakres stabilnego rozwoju procesu zmęczeniowego, na co wskazuje dynamika zmian odkształceniowego parametru uszkodzenia zmęczeniowego  $\Phi$  w funkcji liczby cykli, której przykład zaprezentowano na rysunku 5.6. Wyniki zmian parametrów impedancji w funkcji liczby cykli wskazują, że identyfikacja procesów zmęczeniowych możliwa jest już na etapie subtelných zmian mi-

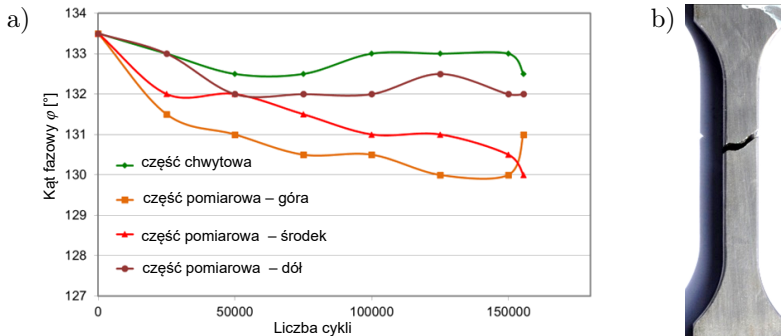




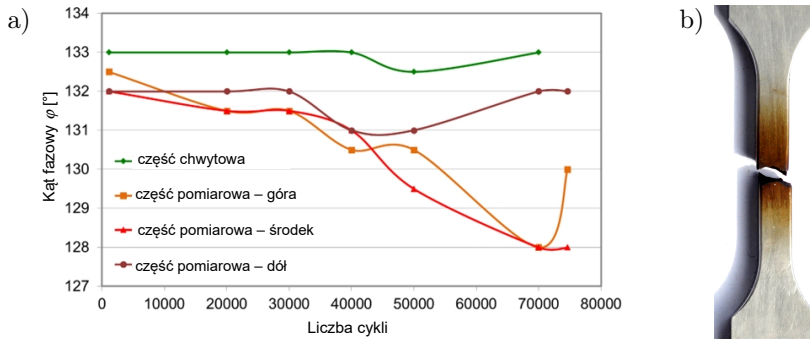
Rysunek 5.16. Wartości kąta fazowego  $\varphi$  w obszarze spodziewanej koncentracji odkształcenia oraz w części chwytowej próbki ze stali P91 poddanej obciążeniom o amplitudzie naprężenia 360 MPa.

konstrukcyjnych przed powstaniem pęknięć, których inicjowanie i propagacja cechuje ostatni etap uszkodzenia, połączony z dynamicznym wzrostem wartości odkształcenia. Jednak precyzyjne ustalenie obszaru rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego wymagało zagęszczenia punktów pomiarowych, ponieważ w przypadku pomiaru tylko w środkowej części próbki zmiany kąta fazowego zaobserwowano dopiero po 150 000 cykli obciążenia. Badania na próbkach z materiału w stanie dostawy wykazały, że koncentracja składowych naprężenia skutkująca zmianami impedancji nie zawsze ma miejsce w środku próbki.

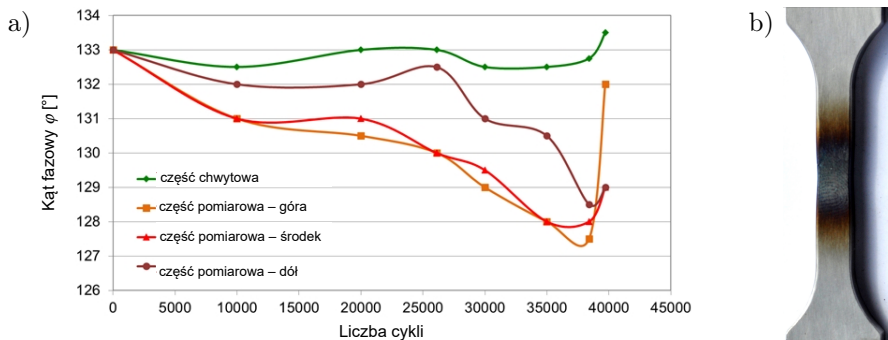
Kolejne wyniki badań dotyczą prób zmęczeniowych, podczas których wykonano pomiary przesunięcia fazowego zgodnie z opracowaną procedurą pomiarową obejmującą kilka ustalonych obszarów próbki. W celu lepszej prezentacji uzyskanych zmian wyniki przedstawiono w postaci linii łączących punkty pomiarowe. Dotyczą one wybranych próbek ze stali zarówno w stanie dostawy, jak i po eksploatacji dla zakresu amplitudy naprężenia zmęczeniowego mieszczącego się w granicach od +360 do +420 MPa. Poszczególne linie na wykresach (rysunki 5.17–5.22) przedstawiają zmianę mierzonego parametru w różnych miejscach próbki, w funkcji liczby cykli, przy czym linia zielona prezentuje wynik uśredniony dla obu części chwytowych próbki i stanowi poziom odniesienia dla zmian w pozostałych punktach. Na podstawie spadku wartości kąta fazowego wraz z rozwojem degradacji zmęczeniowej można wskazać miejsca, gdzie rozwija się ona najszybciej i gdzie można spodziewać się inicjacji pęknięcia. Do wykresów obrazujących zmiany kąta  $\varphi$  w funkcji liczby cykli obciążenia dodano zdjęcia złomów zmęczeniowych, na których widoczne miejsce pęknięcia próbki można porównać z miejscem największych zmian kąta skorelowanego z rozwojem uszkodzenia zmęczeniowego. Różnice pomiędzy wartością referencyjną kąta



Rysunek 5.17. Wartości kąta fazowego  $\varphi$  w wybranych obszarach próbki ze stali 1.4903 po eksploatacji w funkcji liczby cykli obciążenia (a) oraz zdjęcie złomu zmęczeniowego (b). Wyniki dla amplitudy naprężenia 360 MPa.



Rysunek 5.18. Wartości kąta fazowego  $\varphi$  w wybranych obszarach próbki ze stali 1.4903 po eksploatacji w funkcji liczby cykli obciążenia (a) oraz zdjęcie złomu zmęczeniowego (b). Wyniki dla amplitudy naprężenia 370 MPa.

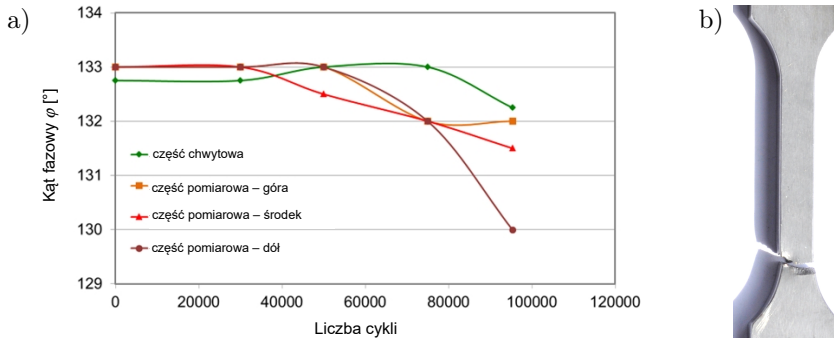


Rysunek 5.19. Wartości kąta fazowego  $\varphi$  w wybranych obszarach próbki ze stali 1.4903 po eksploatacji w funkcji liczby cykli obciążenia (a) oraz zdjęcie złomu zmęczeniowego (b). Wyniki dla amplitudy naprężenia 380 MPa.

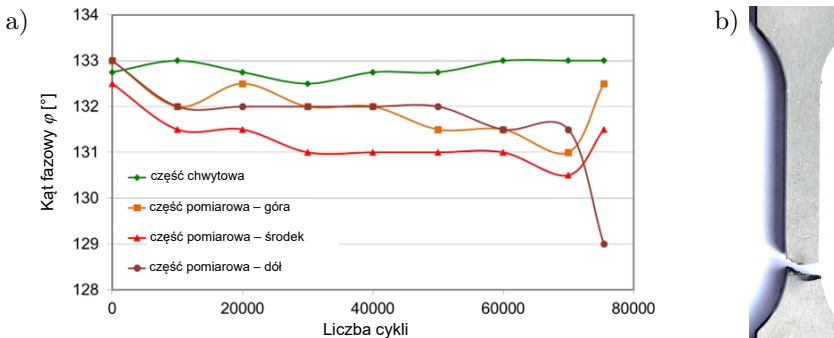
fazowego (część chwytna) a wartościami w obszarach części pomiarowej rosną wraz ze wzrostem amplitudy naprężenia. Różnice te osiągają maksymalne wartości w ostatnim etapie procesu zmęczenia, ale jeszcze przed pęknięciem próbki. W przypadku stali 1.4903 po eksploatacji subtelne zmiany parametrów prądów wirowych wzbudzanych w materiale próbki widoczne są już w pierwszym etapie zmęczenia. Efekt ten jest pokazany na rysunkach 5.17–5.19, przedstawiających opisane wyżej zależności dla trzech wybranych wartości amplitudy naprężenia.

Prezentowane wyniki pomiarów świadczą o dużej wrażliwości kąta fazowego na procesy degradacji. Rejestrowany jest spadek wartości tego parametru we wczesnym stadium zmęczenia, a wielkość tych zmian rośnie wraz ze wzrostem amplitudy naprężenia. Dla największej rozpatrywanej wartości amplitudy (380 MPa) różnice kąta między punktem referencyjnym a miejscem intensyfikacji uszkodzenia są największe i wynoszą  $5,5^\circ$ . Zmiany te można uzasadnić lokalnym wzrostem poziomu naprężenia resztkowego powstałego w wyniku obciążeń cyklicznych, inicjowaniem mikropęknięć generowanych lokalnym uplastycznieniem (np. wokół twardych wtrąceń) lub też lokalną zmianą składu fazowego spowodowaną procesami wydzieleniowymi. Wielkość tych zmian (w porównaniu z wielkością zmian wartości kąta uzyskanego dla próbki pod statycznym obciążeniem 400 MPa) oraz dynamika ich rozwoju w kolejnych cyklach zmęczenia wskazuje ich uzależnienie od procesów degradacji mikrostruktury. Ponadto, na pewnym etapie rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego pojawiają się mikropęknięcia mogące wpływać na zaburzenie linii sił wzbudzanego pola elektrycznego, a tym samym na zmianę wartości kąta fazowego. Tego typu procesy i zjawiska mogą zachodzić w materiale poddanym obciążeniom cyklicznym, a tym samym ich identyfikacja i lokalizacja możliwa jest przy wykorzystaniu metody prądów wirowych. Wraz ze wzrostem amplitudy obciążenia pojawia się także efekt lokalnego przegrzania widoczny na złomach w ostatnim etapie procesu zmęczenia, w fazie dynamicznego i niestabilnego rozwoju uszkodzenia. Dlatego też ostatnie pomiary wykonane po przerwaniu próby w związku z przekroczeniem krytycznego odkształcenia prowadzą do uzyskania wyników obarczonych wpływem relaksacji naprężenia związanej z dyssypacją skumulowanej energii w postaci ciepła. Do nagłej relaksacji naprężenia nagromadzonego podczas cyklicznych obciążeń prowadzi także pęknięcie próbki.

Następne rozpatrywane zależności parametru impedancji od poziomu uszkodzenia dotyczą próbek w stanie dostawy. Na rysunkach 5.20–5.22 przedstawiono wyniki pomiarów przesunięcia fazowego podczas testów zmęczeniowych przy amplitudzie naprężenia równej 360, 400 i 420 MPa. W tym przypadku można zauważyć podobny charakter zmian impedancji, przy czym efekt lokalizacji uszkodzenia na podstawie zmiany wartości parametru  $\varphi$  jest zauważalny znacz-



Rysunek 5.20. Wartości kąta fazowego  $\varphi$  w wybranych miejscach próbki ze stali 1.4903 obciążenia w stanie dostawy, w funkcji liczby cykli obciążenia (a) oraz zdjęcie złomu zmęczeniowego (b). Wyniki dla amplitudy naprężenia 360 MPa.

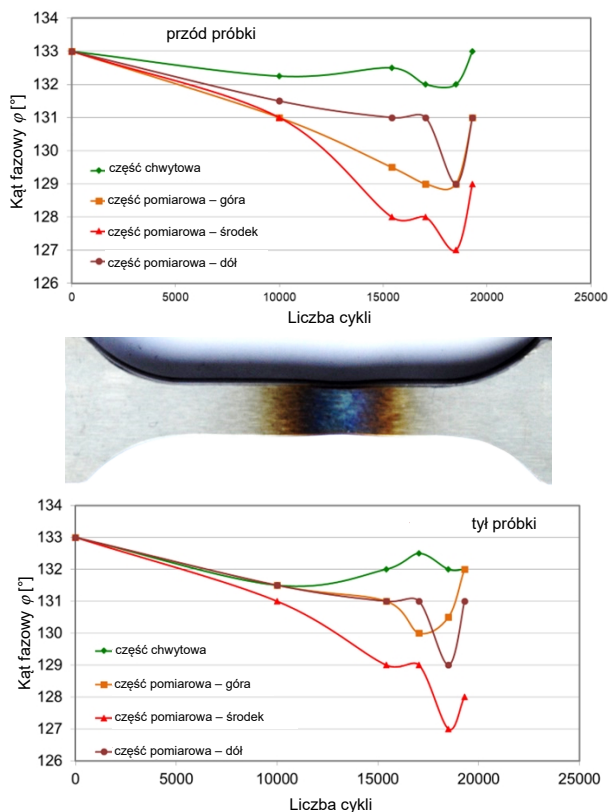


Rysunek 5.21. Wartości kąta fazowego  $\varphi$  w wybranych miejscach próbki ze stali 1.4903 w stanie dostawy, w funkcji liczby cykli obciążenia (a) oraz zdjęcie złomu zmęczeniowego (b). Wyniki dla amplitudy obciążenia 400 MPa.

nie później niż w przypadku stali po eksploatacji. Zwłaszcza przy najmniejszej wartości amplitudy naprężenia różnice wartości mierzonego kąta są znikome.

W celu dokonania oceny wpływu powierzchni i weryfikacji uzyskanych wyników pomiarów przesunięcia fazowego wykonano pomiary w ustalonych obszarach dla wybranych próbek zmęczeniowych po obu ich stronach. Przykładowy wynik takiej procedury pomiarowej pokazano na rysunku 5.22, na którym przedstawiono zmiany kąta fazowego zmierzonego po obu stronach próbki w funkcji liczby cykli obciążenia podczas próby zmęczeniowej prowadzonej dla amplitudy naprężenia 420 MPa.

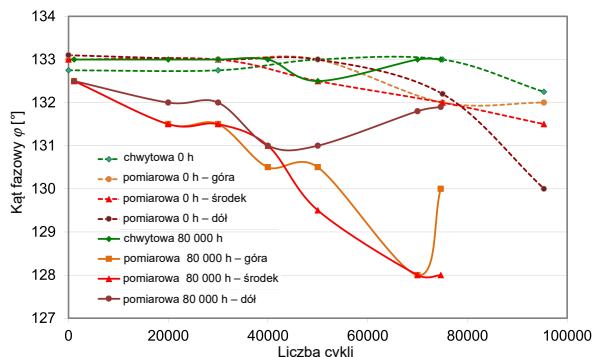
W przypadku próbek w stanie dostawy zaobserwowano wyraźny spadek wartości kąta fazowego dla testów o amplitudzie naprężenia 420 MPa (rysunek 5.22).



Rysunek 5.22. Wartości kąta fazowego  $\varphi$  zmierzone po obu stronach próbki ze stali 1.4903 w stanie dostawy, w funkcji liczby cykli obciążenia dla naprężenia 420 MPa wraz ze zdjęciem złomu zmęczeniowego.

Spadek ten miał miejsce w części środkowej próbki, gdzie nastąpiła intensyfikacja procesu degradacji. Ostatni pomiar kąta na każdej próbce tej serii był dokonywany po jej zniszczeniu, najczęściej w wyniku pęknięcia, ale także wskutek przegrzania. W takim przypadku koniec testu wynikał z przekroczenia krytycznej wartości odkształcenia. W związku z taką procedurą pomiaru częstym zjawiskiem był wzrost wartości kąta fazowego przy ostatnim pomiarze, co wynikało prawdopodobnie z faktu relaksacji naprężenia resztkowego w wyniku pęknięcia lub uplastycznienia w efekcie przegrzania.

Na rysunku 5.23 przedstawiono wynik analizy porównawczej mechanizmu rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego dla próbek ze stali 1.4903 po różnej historii pracy. Skuteczność stosowania metody prądów wirowych w monitorowaniu rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego jest widoczna dla obu rozpatrywanych stanów



Rysunek 5.23. Wartości kąta fazowego  $\varphi$  zmierzone w wybranych miejscach próbki ze stali 1.4903, w stanie dostawy (0 h) oraz po eksploatacji (80 000 h) w funkcji liczby cykli, dla amplitudy naprężenia 360 MPa.

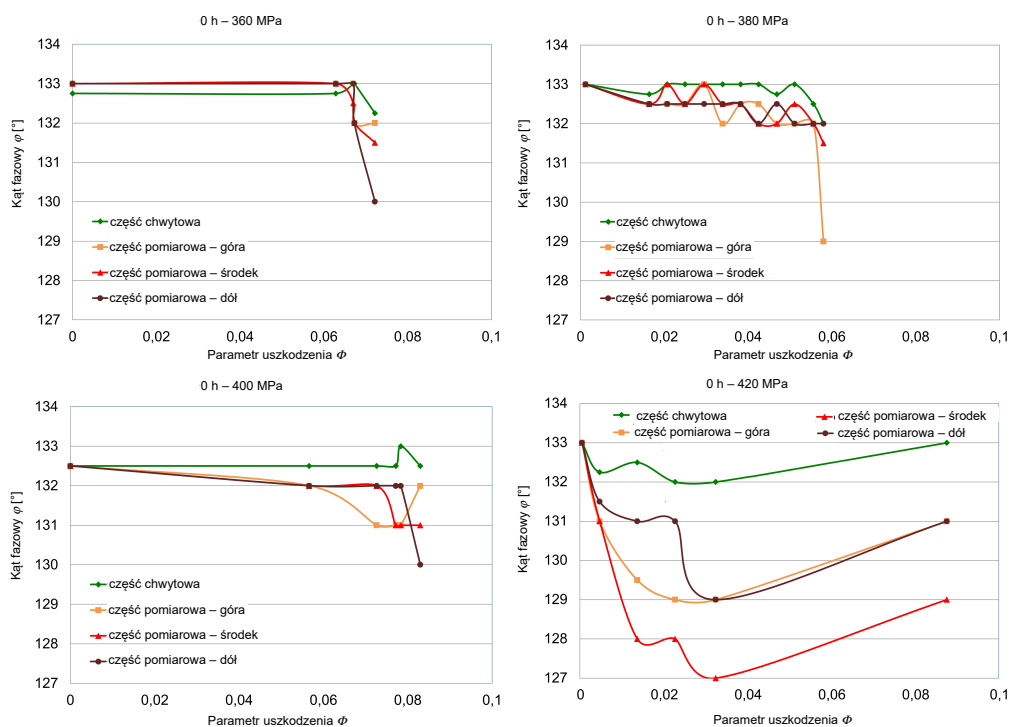
materiału, jednak znacznie wyraźniej dla próbki po blisko 10 latach pracy w warunkach podwyższonej temperatury i dynamicznych obciążeń.

W całym obszarze pomiarowym próbki po eksploatacji, w którym są skoncentrowane naprężenia w wyniku kolejnych cykli obciążenia, rejestrowany był spadek wartości mierzonego parametru już po 20 000 cykli obciążenia. Spadek ten przez kolejne cykle obciążenia jest niemal liniowy w miejscu koncentracji naprężenia, gdzie dochodzi do uszkodzenia po osiągnięciu niespełna 75 000 cykli. Przy tej samej wartości amplitudy naprężenia zmiennej próbka nieeksploatowana pękła po przekroczeniu 95 000 cykli, przy czym zmiany kąta fazowego dały się zaobserwować dopiero w ostatniej fazie zmęczenia. Różnice w wynikach uzyskanych dla obu próbek wskazują na istotny wpływ historii eksploatacji zarówno na samą wytrzymałość zmęczeniową, wyrażoną liczbą cykli do pęknięcia, jak i na proces uszkodzenia stali, uwidoczniiony dynamiką zmian parametru prądowego. Zmiany te mogą świadczyć o degradacji struktury materiału poddanego warunkom wysokiej temperatury i naprężenia, związanej z eksploatacją w wysokowydajnych zespołach wytwarzania energii cieplnej, a także o zmianie wyciężenia materiału związanego z obniżeniem odporności na obciążenia cieplno-mechaniczne.

Finalnym etapem analizy wyników uzyskanych dla stali 1.4903 było ustalenie korelacji uzyskanych wartości kąta fazowego impedancji z wartościami wyznaczonych parametrów uszkodzenia. Głównym rezultatem opracowanej metodyki szacowania uszkodzenia było potwierdzenie nieliniowego charakteru kumulacji uszkodzenia w procesie zmęczeniowym. W niemal wszystkich przebadanych próbkach parametry uszkodzenia, oparte na rozwoju składowych odkształceń, wykazywały trzy etapy wzrostu o różnej dynamice, a mianowicie: szybki ich

wzrost w pierwszych cyklach, powolny, ale stały przyrost przez większość cykli obciążenia, oraz szybkie, dynamiczne zwiększenie ich wartości w etapie poprzedzającym zniszczenie próbki. Zaobserwowany na badanej stali 1.4903 nieliniowy charakter rozwoju uszkodzenia jest typowy dla wielu gatunków stali. Na podstawie opracowanej metody pomiaru ilościowego stopnia uszkodzenia w dowolnym etapie jego rozwoju zaproponowano procedurę korelacji tych parametrów z wynikami badań nieniszczących. Dla wszystkich próbek poddanych testom zmęczeniowym wyznaczono parametry uszkodzenia w postaci odkształcenia średniego oraz amplitudy odkształcenia niesprężystego. Parametr  $\Phi$ , będący sumą obu składowych w każdym cyklu obciążenia, odwzorowuje rozwój odkształcenia w kolejnych cyklach, a parametr  $D$  opisuje dynamikę tych zmian, ponieważ odnosi się do początkowej i końcowej wartości odkształcenia.

Na rysunku 5.24 przedstawiono zależność kąta fazowego sygnału prądów wirowych od stopnia uszkodzenia opisanego parametrem odkształceniowym  $\Phi$ . Wyniki te dotyczą próbek ze stali w stanie dostawy poddawanych testom zmęczeniowym.

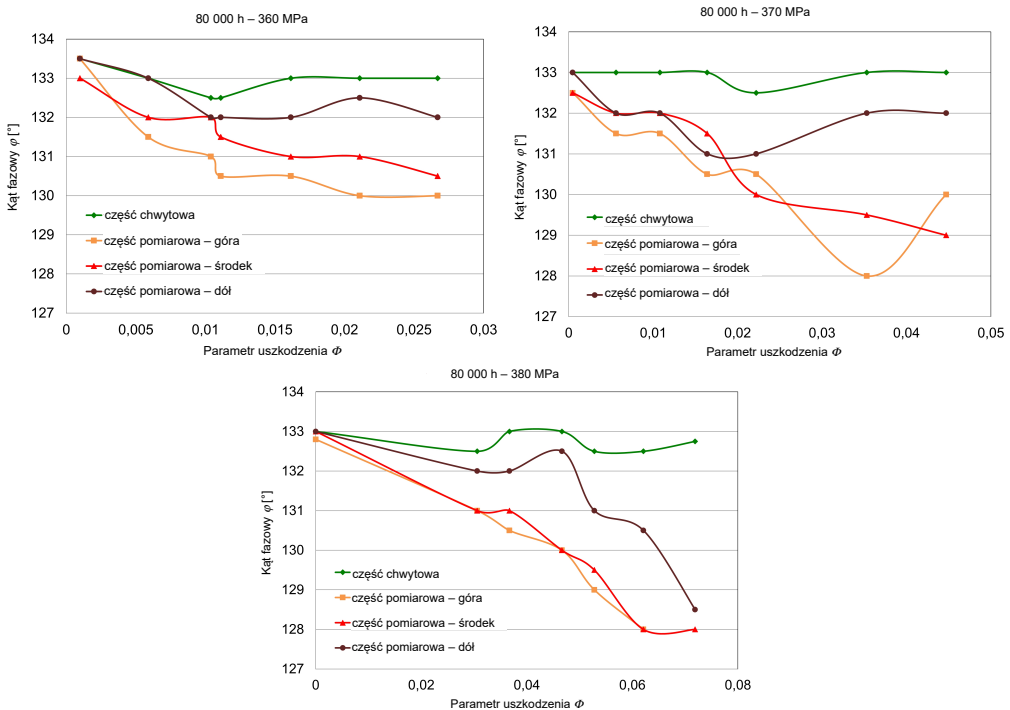


Rysunek 5.24. Wartości kąta fazowego  $\varphi$  zarejestrowane w wybranych miejscach próbek w stanie dostawy (0 h) w funkcji parametru uszkodzenia  $\Phi$ . Testy wykonano przy amplitudzie naprężenia w zakresie 360–420 MPa.

zeniowym przy amplitudzie w zakresie od 360 do 420 MPa. Punkty na wykresach odpowiadają wartościom kąta fazowego zmierzonego w wybranych miejscach na odciążonej próbce po ustalonej liczbie cykli, dla której wyznaczono parametr uszkodzenia.

Uzyskane zależności wskazują, że w przypadku stali w stanie dostawy wpływ uszkodzenia na wartość kąta fazowego jest zauważalny dopiero po jego lokalizacji w postaci przewężenia, czyli w końcowym etapie procesu zmęczeniowego. Jedyne w przypadku największej wartości amplitudy naprężenia cyklicznie zmiennego (420 MPa) zarejestrowano spadek wartości kąta już w pierwszej fazie zmęczenia. Tendencja spadkowa najbardziej widoczna w środkowej części próbki utrzymała się do momentu uplastycznienia, któremu towarzyszył efekt lokalnego przegrzania. Ostatni pomiar wykonany po zakończeniu testu wskazuje na relaksację naprężenia skumulowanego w próbce zmęczeniowej.

W przypadku próbek ze stali eksploatowanej wyniki pomiarów z wykorzystaniem prądów wirowych przedstawiono na rysunku 5.25 także w funkcji para-



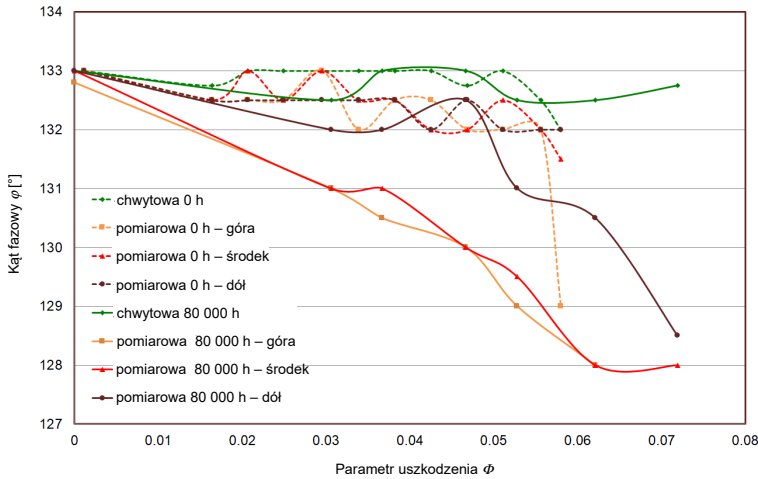
Rysunek 5.25. Wartości kąta fazowego  $\varphi$  zarejestrowane w wybranych miejscach próbek z materiału po eksploatacji (80 000 h) w funkcji parametru uszkodzenia  $\Phi$ . Testy wykonano przy amplitudzie naprężenia w zakresie 360–380 MPa.



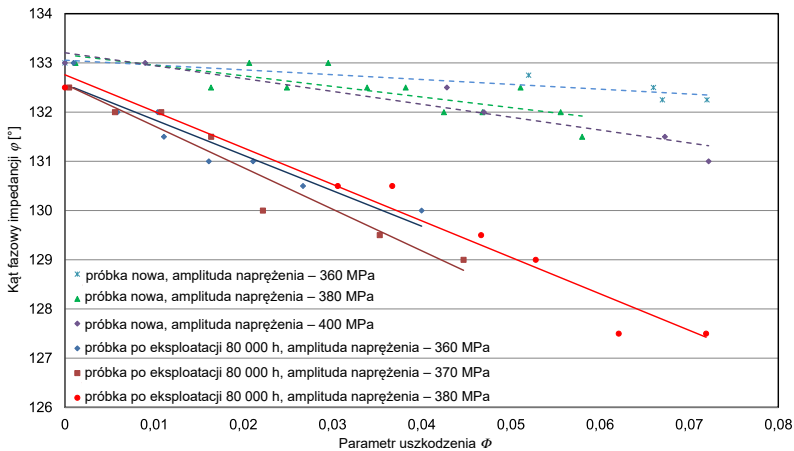
metru  $\Phi$ , co pozwala określić korelację wartości zmierzonego kąta z wielkością odkształcenia po zadanej liczbie cykli obciążenia. Wykresy przedstawiają zależności uzyskane dla amplitudy naprężenia zmiennego w zakresie 360–380 MPa.

Wyniki dla stali eksploatowanej pokazują, że już w początkowym etapie procesu zmęczeniowego kolejne cykle obciążenia wpływały na lokalną zmianę właściwości, co rejestrowano w sposób nieinwazyjny z wykorzystaniem metody prądowirowej. Pierwsze pomiary po około 10 000 cykli identyfikują różnice w cechach impedancji materiału w części pomiarowej (tj. tam, gdzie kumulowane było naprężenie) oraz w części chwytowej, w której z uwagi na ponad dwukrotnie większe pole przekroju naprężenia resztkowe są dużo mniejsze. Widoczna jest niemal liniowa zależność kąta fazowego od parametru uszkodzenia w miejscu, gdzie docelowo dochodzi do dekohezji lub uplastycznienia próbki. Efekt ten jest tym większy, im większa jest wartość amplitudy cyklicznego naprężenia i osiąga różnicę  $6^\circ$  między punktem referencyjnym a punktem kumulacji uszkodzenia przy amplitudzie 380 MPa. Analiza zmian kąta fazowego w funkcji wartości parametru uszkodzenia dla trzech wartości amplitudy naprężenia pokazuje z jednej strony wpływ poziomu odkształcenia niesprężystego na cechy wzbudzanych prądów wirowych, a z drugiej możliwość detekcji lokalnych koncentracji naprężenia. Ponieważ parametr uszkodzenia wyraża poziom uszkodzenia globalnie w odniesieniu do całej długości części pomiarowej próbki, jego wpływ jest widoczny w wartościach kąta mierzonych w trzech obszarach próbki. Natomiast różnice wartości kąta pomiędzy obszarami wskazują na lokalizację koncentracji uszkodzenia na etapie poprzedzającym pęknięcie. Tym samym wykresy te mogą stanowić swego rodzaju krzywe kalibracyjne, dzięki którym możliwe jest szacowanie stopnia uszkodzenia z zastosowaniem prądów wirowych. W celu oceny wpływu historii eksploatacji na omawiane wyżej zależności uzyskane wyniki zestawiono na wykresie (rysunek 5.26), który pokazuje zmiany kąta fazowego impedancji w funkcji parametru uszkodzenia dla materiału w stanie dostawy (0 godzin pracy) oraz po eksploatacji w czasie 80 000 godzin wskutek cyklicznych obciążeń zmiennych o amplitudzie 380 MPa.

Zestawienie tych danych pozwala stwierdzić znacznie wyższą podatność na odkształcenie materiału eksploatowanego, co widać w osiąganych wartościach uszkodzenia dla obu stanów. Ponadto widoczna jest także „wrażliwość” impedancji na zmiany w materiale poddawany zmęczeniu. Dla stali eksploatowanej detekcja kumulacji uszkodzenia z zastosowaniem metody prądów wirowych jest możliwa już we wczesnym jego etapie. Dla lepszego zobrazowania tej zależności zestawiono wyniki uzyskane dla trzech wartości amplitudy cyklicznego naprężenia zmiennego, którym poddano próbki z materiału w stanie dostawy oraz eksploatowanego (rysunek 5.27). Wyniki uzyskane dla każdego testu zmęczenio-



Rysunek 5.26. Wartości kąta fazowego  $\varphi$  zarejestrowane w wybranych miejscach próbki w stanie dostawy (0 h) i po eksploatacji (80 000 h), w funkcji parametru uszkodzenia  $\Phi$  dla amplitudy naprężenia 380 MPa.



Rysunek 5.27. Zależność kąta fazowego impedancji od wartości odkształceniowego parametru uszkodzenia wyznaczonego podczas testów zmęczeniowych w zakresie amplitudy naprężenia 360–400 MPa dla próbek z materiału w stanie dostawy i po eksploatacji.

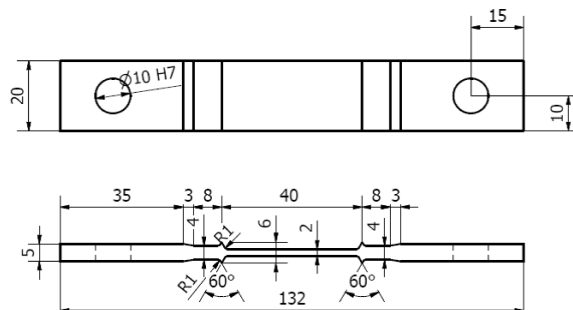
wego zostały aproksymowane linią prostą, która najlepiej odwzorowuje trend zmian a jednocześnie pozwala prognozować zmiany parametru uszkodzenia na podstawie zmierzonych wartości kąta fazowego.

Przebiegi linii aproksymacyjnych pokazują rozbieżności w dynamice zmian kąta fazowego w funkcji uszkodzenia dla próbek w stanie dostawy oraz po eks-

ploatacji. Wynika to z większej podatności na odkształcenia plastyczne w warunkach zmęczenia stali pobranej z pracującej instalacji. Charakter zmian dla tej stali jest bardzo podobny do charakteru zmian dla wartości amplitudy naprężania z zakresu 360–380 MPa, a wraz z jej wzrostem rośnie też wartość parametru uszkodzenia. Można więc założyć, że niezależnie od wielkości obciążenia wartość parametru uszkodzenia jest możliwa do opisanego kątem fazowym impedancji na podstawie liniowej zależności tych wartości. Dysponując takim zbiorem wyników dla wybranego materiału, można opracować linie kalibracyjne, które pozwolą na oszacowanie parametru uszkodzenia na podstawie wyników uzyskanych metodą prądów wirowych.

## 5.5 Nieniszcząca detekcja uszkodzenia stali 1.4903 w procesie pełzania

Magnetyczno-indukcyjne techniki nieniszczące dają także możliwość oceny skutków degradacji związanych ze zjawiskiem pełzania żarowytrzymałej stali 1.4903. Badania przeprowadzono na niestandardowych próbkach o geometrii przedstawionej na rysunku 5.28, umożliwiającej realizację testów pełzania, przy jednoczesnych pomiarach z zastosowaniem technik nieniszczących. Do badań wykorzystano metodę prądów wirowych, dokonując rejestracji kąta fazowego krzywej impedancji uzyskanej w wyniku przyłożenia i oddalenia sondy w ustalonych miejscach próbki. Przeprowadzono także badania z wykorzystaniem mostka LCR do analizy unormowanych składowych impedancji.



Rysunek 5.28. Geometria próbki opracowana w celu testowania technik nieniszczących do oceny uszkodzenia w procesie pełzania.

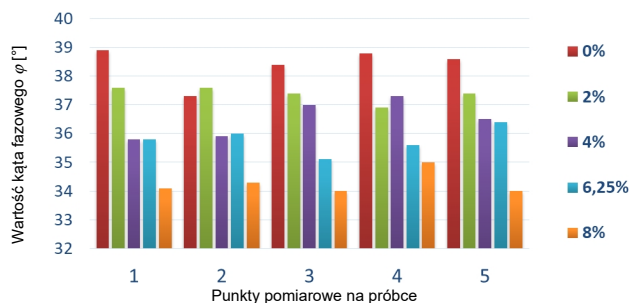
Testy pełzania przeprowadzono na zestawie 5 próbek, w temperaturze 540°C, zadając statyczne obciążenie o wartości 5 kN, co odpowiada naprężeniu wynoszącemu 80 MPa oraz warunkom pracy instalacji energetycznych. Kolejne

próby były przerywane po uzyskaniu w części pomiarowej próbki założonego odkształcenia trwałego o wartości od 0 do 8%. Na rozpatrywanym zestawie próbek o różnym stopniu odkształcenia (rysunek 5.29) wykonano pomiary kąta fazowego w ustalonych obszarach części pomiarowej próbki. W celu sprawdzenia stopnia powtarzalności pomiaru przygotowano matrycę precyzującą miejsca przykładania sondy pomiarowej, która jednocześnie zapewniała prostopadłość jej prowadzenia do i od badanej powierzchni próbki. Pomiary wykonano w szerokim zakresie częstotliwości wzbudzenia, jednak najlepsze wyniki dały pomiary przy częstotliwości 5 MHz, dla której miały one charakter powierzchniowy z uwagi na ograniczone wnikanie prądów wirowych w materiał.



Rysunek 5.29. Zestaw próbek ze stali 1.4903 po pełzaniu, o różnym stopniu deformacji. Miejsca pomiaru kąta fazowego  $\varphi$  są oznaczone na próbce 0%.

Wyniki pomiarów w postaci wykresu zależności parametru impedancji od wartości odkształcenia plastycznego są przedstawione na rysunku 5.30. Wskazują one możliwość identyfikacji skutków pełzania z wykorzystaniem metody prądów wirowych. We wszystkich miejscach testowanej próbki wartość kąta fazowego zmniejszała się wraz ze wzrostem stopnia deformacji wskutek płynięcia stali w warunkach wysokotemperaturowego obciążenia statycznego. Wpływ stopnia deformacji na wartość parametru impedancji najlepiej widoczny jest w środkowym obszarze próbek, gdzie zarejestrowano niemal liniową zależność między trwałym odkształceniem próbki a wartością parametru impedancji. Dysponując charakterystyką zmian tej wartości w funkcji stopnia odkształcenia plastycznego, uzyskanego w procesie statycznego odkształcenia na gorąco dowolnego materiału, można w sposób nieinwazyjny ocenić jego stan na elementach konstrukcji. Oczywiście należy pamiętać o ograniczeniach związanych z penetracją



Rysunek 5.30. Wartości kąta fazowego  $\varphi$  rejestrowanego w wybranych miejscach próbek o różnym stopniu odkształcenia plastycznego w wyniku pełzania wyrażonego w procentach względem długości pierwotnej.

prądów wirowych oraz wpływie innych czynników na ich indukcję w materiale ferromagnetycznym.

Przedstawione wyniki wskazują na silną zależność między stopniem odkształcenia plastycznego powstałego w wyniku pełzania dyfuzyjnego, a wartością kąta fazowego. Jest ona najbardziej widoczna dla wyników uzyskanych w środkowej części próbki, gdzie spodziewane odkształcenia dla kolejnych próbek są największe.

Podobne wyniki uzyskano, mierząc parametry elektryczne i magnetyczne próbek po pełzaniu z zastosowaniem mostka LCR. Stan materiału scharakteryzowano na podstawie szerokopasmowego pomiaru impedancji wykonanego mostkiem laboratoryjnym LCR. Taka ocena wymaga jednoczesnej analizy unormowanych składowych impedancji w funkcji częstotliwości, określonych na podstawie lokalnych pomiarów przenikalności skutecznej Förstera. W ten sposób możliwe jest uwzględnienie wpływu parametrów magnetoelastycznych na czynniki opisujące stopień degradacji materiału. Czynniki te mogą być zdefiniowane na przykład przez dopasowanie krzywej zależności indukcyjności różnicowej od stopnia deformacji [168] lub na podstawie zmienności względnej anizotropii przewodnictwa elektrycznego przy różnych poziomach odkształcenia w wyniku pełzania [169].

Stan materiału można także opisać za pomocą pomiaru zmian częstotliwości rezonansowej układu pomiarowego sonda (cewka)–materiał [170]. Proces pomiaru i diagnozowania stanu materiału na przykładzie stali P91 opisano w pracy [171], gdzie przedstawiono wyniki uzyskane z zastosowaniem mostka LCR oraz podstawy teoretyczne defektoskopii magneto-indukcyjnej w dziedzinie badań struktury i degradacji zmęczeniowej elementów ze stali ferromagnetycznych. Z kolei zasady pomiaru składowych znormalizowanej impedancji z zastosowaniem mostka z komercyjnym przetwornikiem LDC opisano w pracy [172].



# Detekcja i ocena uszkodzeń eksploatacyjnych w stopach niklu

W rozdziale przedstawiono wyniki badań nieniszczących z wykorzystaniem metody prądów wirowych oraz metod optycznych DIC i ESPI prowadzonych podczas testów zmęczeniowych stopów niklu MAR 247 oraz Inconel 718. Badania te skupiały się na identyfikacji i lokalizacji uszkodzenia zmęczeniowego na podstawie monitorowania zmian parametrów impedancji mierzonych w określonych sekwencjach oraz w ustalonych obszarach próbek poddawanych cyklicznym obciążeniom zmiennym. Jednocześnie badania defektoskopowe prowadzone na powierzchni próbek pozwoliły określić moment inicjowania pęknięcia zmęczeniowego, co zweryfikowano na podstawie wyników uzyskanych metodami optycznymi.

## 6.1 Wstęp

Elementy konstrukcji i urządzeń eksploatowanych w warunkach wysokiej temperatury i dużych obciążeń dynamicznych (branża lotnicza, energetyczna) wymagają zastosowania materiałów o wysokiej żaroodporności i żarowytrzymałości, którymi są stopy niklu. Z uwagi na ekstremalne środowisko pracy elementy te są szczególnie podatne na rozwój uszkodzeń. Ponadto stale podwyższane są parametry eksploatacji, co z jednej strony wymusza modyfikację technologii wytwarzania tych elementów (monokrystalizacja, warstwy TBC), a z drugiej – opracowanie procedur diagnostycznych zapewniających bezpieczne użytkowanie. Dlatego też przedmiotem badań nad wykorzystaniem technik nieniszczących w ocenie rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych były także stopy niklu: odlewniczy stop MAR 247 oraz utwardzany wydzieleniowo stop niklowo-chromowy Inconel 718. W przypadku badań nieniszczących tych stopów wykorzystano inne procedury pomiarowe niż w przypadku próbek ze stali żarowytrzymałej o właściwościach ferromagnetycznych. Proces degradacji zmęczeniowej ferromagnetyka powoduje zmiany zarówno przenikalności magnetycznej, jak i konduktywności,

których monitorowanie za pomocą rejestracji kąta fazowego impedancji pozwala ocenić rozwój uszkodzenia. Nikiel także jest ferromagnetykiem, ale stopy takie jak MAR 247 i Inconel 718, za sprawą dodatków stopowych (m.in. Cr, W, Al), są paramagnetykami, dla których wartość przenikalności magnetycznej jest praktycznie stała. Pomiar konduktywności daje zatem te same możliwości monitorowania zmian stanu struktury materiału nieferromagnetycznego poddanego obciążeniom eksploatacyjnym, jak pomiar parametrów impedancji w przypadku stali ferromagnetycznych

## 6.2 Ocena rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego stopu MAR 247

MAR 247 to superstop na osnowie niklu szeroko stosowany do produkcji odlewów precyzyjnych elementów gorącej sekcji turbin gazowych, takich jak łopatki turbiny wysokociśnieniowej i pierścienie łopatkowe. Ze względu na jego doskonałe właściwości termomechaniczne może pracować w środowisku gazów agresywnych w temperaturze do 1100°C. Stop ten wykazuje wysoką wytrzymałość na pełzanie i dobrą lejułość, a także doskonałą odporność na utlenianie i korozję w podwyższonej temperaturze.

W badaniach stopu MAR 247 wykorzystano różne techniki nieniszczące do oceny stopnia uszkodzenia w kolejnych cyklach obciążeń zmiennych. Metoda prądów wirowych została zastosowana zarówno w zakresie defektoskopii, czyli identyfikacji pęknięć powierzchniowych i podpowierzchniowych, jak i strukturokopii, czyli detekcji lokalnych zmian właściwości materiału związanych z rozwojem uszkodzenia zmęczeniowego (karby strukturalne, koncentracja naprężenia). Zastosowano również polowe metody optyczne do oceny zmian składowych przemieszczenia/odkształcenia w próbkach ze stopu MAR 247 w trakcie zadawania dynamicznych obciążeń. Badania miały na celu ocenę możliwości wykorzystania optycznej metody cyfrowej korelacji obrazu (DIC) oraz metody interferometrii plamkowej (ESPI) do identyfikacji pęknięć na powierzchni próbek ze stopu niklu pod wpływem cyklicznych obciążeń zmiennych realizowanych w próbach zmęczeniowych.

Zarówno badania zmęczeniowe, jak i równoległe prowadzone badania nieniszczące, wykonano na próbkach ze stopu niklu MAR 247 z ochronną warstwą aluminidkową, naniesioną w procesie chemicznego osadzania z fazy gazowej. Warstwy tego typu, stosowane w celu poprawy żaroodporności nadstopów niklu, mogą w warunkach pracy silników odrzutowych prowadzić do zróżnicowania wartości składowych naprężenia w poszczególnych warstwach materiału łopatki. Taki stan, w połączeniu z oddziaływaniem naprężeń cieplnych o zmiennym cha-

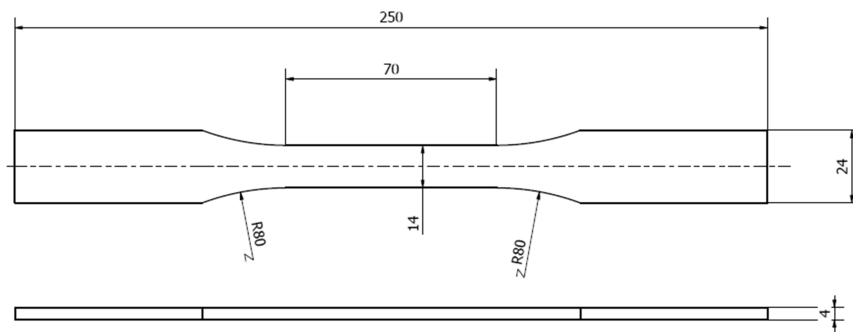


rakterze, prowadzi do występowania różnic w odkształceniu, co w konsekwencji skutkuje ich koncentracją i powstawaniem pęknięć [173]. Stąd konieczność poszukiwań nowych procedur diagnostycznych, które umożliwią detekcję obszarów stanowiących miejsce rozwoju uszkodzenia. Niezbędne jest zastosowanie nieinwazyjnych technik badawczych, umożliwiających ocenę stanu łopatki i jej dalszą bezpieczną eksploatację pod warunkiem spełnienia opracowanych kryteriów.

### 6.3 Testy zmęczeniowe stopu MAR 247

Żarowytrzymałe stopy niklu stosowane do produkcji łopatek wirujących i kierujących w turbinach gazowych muszą zapewniać bezpieczną eksploatację w czasie do kilku tysięcy godzin, w temperaturze ponad 1000°C. Łopatki turbin są w warunkach pracy narażone na oddziaływanie zmiennych w czasie pól siłowych, związanych z burzliwym przepływem spalin oraz wzajemnym oddziaływaniem elementów silnika. Prowadzi to do uszkodzenia łopatek w procesach zmęczenia oraz pełzania przy destrukcyjnym wpływie efektów korozji [174, 175]. W celu poprawy żaroodporności elementów wykonanych z tych stopów nanoszone są powłoki (lub warstwy), które ograniczają dynamikę procesów korozyjnych w warunkach eksploatacji. Najczęściej stosowane są dyfuzyjne warstwy ochronne na bazie aluminium wytwarzane metodami osadzania gazowego metodami fizycznymi (PVD), chemicznymi (CVD) lub innymi.

Testy zmęczeniowe przeprowadzono na próbkach ze stopu MAR 247 o strukturze drobnoziarnistej z warstwą uzyskaną w procesie niskoaktywnego aluminidkowania metodą CVD z par  $\text{AlCl}_3$ . Proces prowadzono w czasie 4 oraz 12 godzin, w temperaturze 1040°C, dzięki czemu uzyskano warstwy o grubości około 20 i 40  $\mu\text{m}$ . Geometrię próbek pokazaną na rysunku 6.1 zaprojektowano dla potrzeb prowadzenia badań za pomocą technik NDT.



Rysunek 6.1. Wymiary i geometria próbek do badań zmęczeniowych stopu MAR 247.

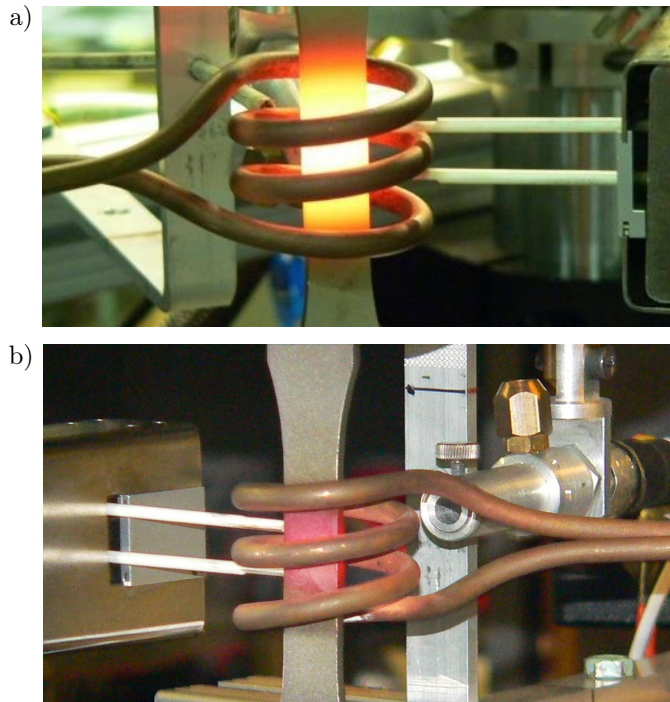
Do badań wytrzymałościowych przygotowano serie próbek, które poddano wysokocyklowym testom zmęczeniowym. Program badań zmęczeniowych zakładał wprowadzenie fazy statycznego wymuszenia naprężenia dla części próbek, realizowanego z zastosowaniem ręcznego układu obciążenia. Było to konieczne przy przeprowadzeniu pomiarów optycznych za pomocą metody ESPI, której wrażliwość uniemożliwia ich precyzyjne wykonanie podczas pracy pomp hydraulicznych obsługujących maszyny wytrzymałościowe. Zatrzymywanie pracy maszyny na czas pomiarów po ustalonej liczbie cykli było dodatkowo wskazane ze względu na pomiary dokonywane metodą prądów wirowych, która równoległe z metodą ESPI została użyta do próby identyfikacji i lokalizacji pęknięcia warstw aluminiowych na próbkach, po ustalonej liczbie cykli. Podczas zatrzymań wykonano także pomiary konduktywności w ustalonych miejscach próbek. Na podstawie wyników testów opracowana została charakterystyka Wöhlera, określająca trwałość zmęczeniową dla każdego rodzaju próbki. Standardowe badania zmęczeniowe wykonano na maszynie wytrzymałościowej MTS 810, o zakresie siły osiowej  $\pm 100$  kN.

Podczas badań zmęczeniowych kontrola testu prowadzona jest za pomocą przemieszczenia, siły lub odkształcenia. W przypadku testów zmęczeniowych próbek wykonanych ze stopu niklu MAR 247 zastosowano sterowanie siłą, a rejestrowana była odpowiedź materiału na zadane obciążenie w postaci odczytów z ekstensometru mocowanego do powierzchni pomiarowej próbki. W przypadku testów z użyciem technik nieniszczących niemożliwe było użycie ekstensometru, ale pomiar przemieszczenia wykonywano metodami optycznymi DIC lub ESPI. Na podstawie wyznaczonej w próbie rozciągania wartości umownej granicy plastyczności  $R_{0,2}$  określono zakres obciążeń zmęczeniowych dla wszystkich serii próbek. Badania zmęczeniowe przeprowadzono w zakresie wartości amplitudy naprężenia od 350 do 650 MPa. Obciążenie realizowano przy zachowaniu stałej wartości średniej naprężenia w cyklu i stałej wartości amplitudy naprężenia dla danej próbki. Zastosowano symetryczny cykl obciążenia ( $\sigma_m = 0$ ) z częstotliwością wynoszącą 20 Hz.

Z uwagi na warunki eksploatacji elementów ze stopów niklu przeprowadzono także próby zmęczenia wysokotemperaturowego w celu oceny właściwości wytrzymałościowych w temperaturze 900°C. Badaniom tym poddano dwie serie próbek, o grubości warstwy aluminiowej 20  $\mu\text{m}$  i 40  $\mu\text{m}$ , co pozwoliło ocenić wpływ parametrów warstwy na dynamikę rozwoju uszkodzenia. Wysokotemperaturowe testy zmęczeniowe realizowano w zakresie amplitudy naprężenia od 300 do 520 MPa. Próbki były mocowane w uchwytych hydraulicznych z przystawką minimalizującą błąd odchylenia kąтового od osi maszyny. Obciążenie zadawano według procedury opracowanej dla testów w temperaturze otoczenia.

Odształcenie w kolejnych cyklach mierzono wysokotemperaturowym ekstensometrem MTS.

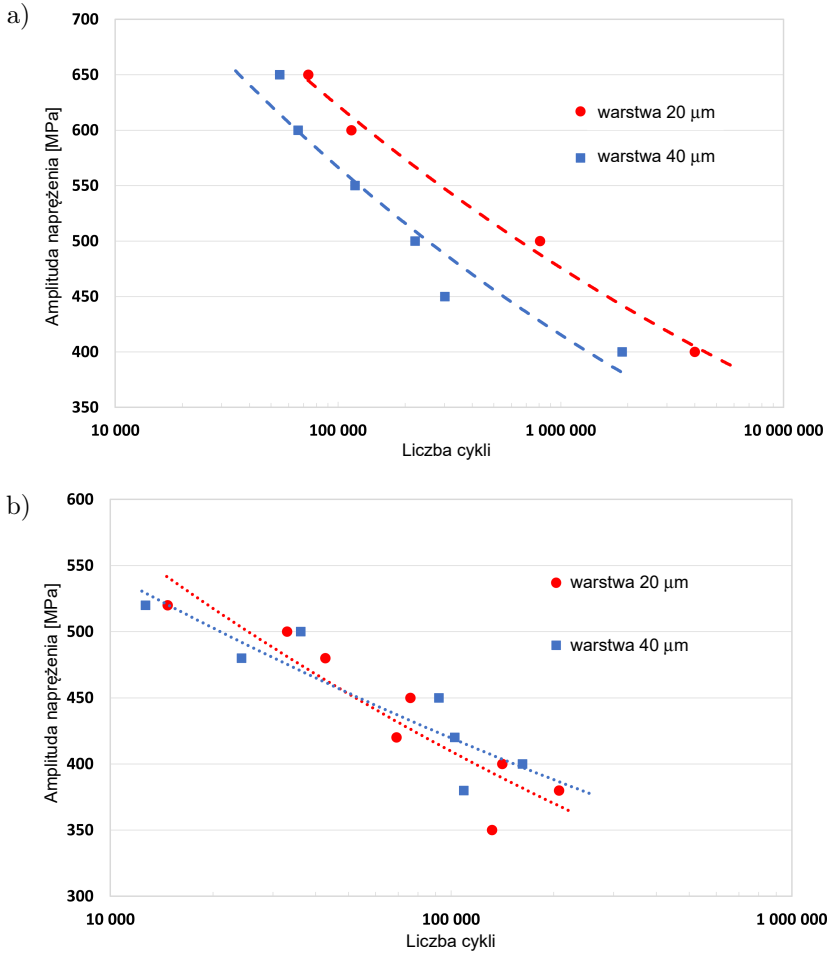
Na rysunku 6.2 przedstawiono próbkę zamontowaną w maszynie, z indukcyjną spiralą grzejącą oraz ceramicznymi nóżkami ekstensometru. Za próbką widoczny jest fragment termopary umieszczonej w górnym i dolnym obszarze części pomiarowej. Wartość temperatury kontrolowana była pirometrem dwubarwowym, widocznym na rysunku 6.2b.



Rysunek 6.2. Próbka ze stopu MAR 247 podczas testu zmęczeniowego w temperaturze 900°C.

Wyniki badań zmęczeniowych zestawiono w postaci wykresów Wöhlera opracowanych dla próbek z warstwą aluminiową o dwóch grubościach oraz z uwzględnieniem dwóch wartości temperatury, w której prowadzono testy (rysunek 6.3). Jak widać na rysunku, grubość warstwy ma wpływ na właściwości wytrzymałościowe stopu MAR 247 w różnych warunkach obciążenia.

Wyniki badań prowadzonych w temperaturze otoczenia wskazują na wyższą wartość wytrzymałości zmęczeniowej próbek ze stopu MAR 247 z warstwą o grubości 20  $\mu\text{m}$ , w całym zakresie amplitudy naprężenia zmiennego. Różnica ta jest najmniej widoczna przy maksymalnej wartości amplitudy, 650 MPa. Taki wynik



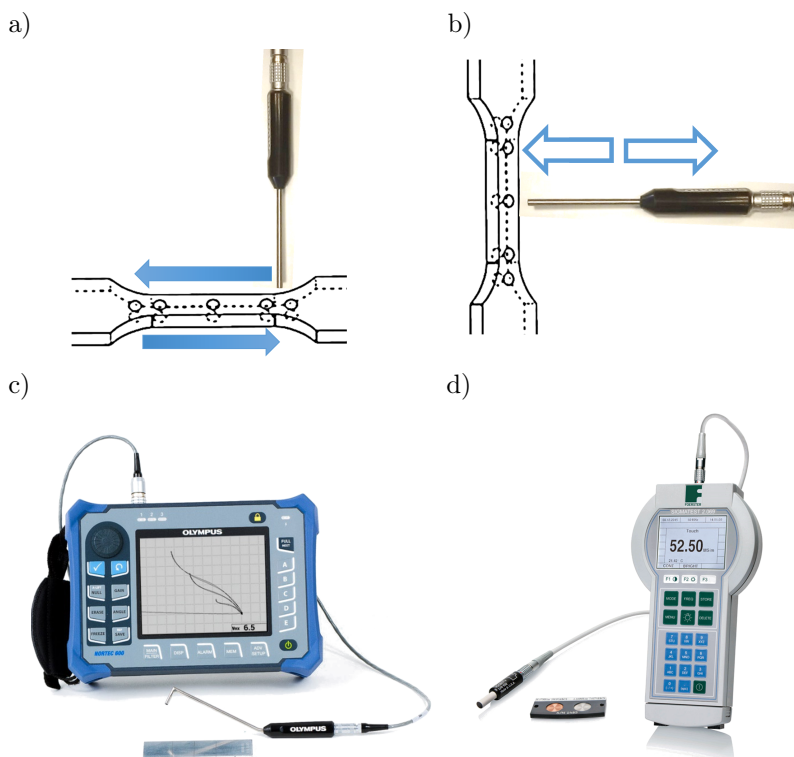
Rysunek 6.3. Charakterystyka zmęczeniowa stopu niklu MAR 247 z warstwą aluminiową o grubości 20 i 40  $\mu\text{m}$  uzyskana na podstawie testów w temperaturze pokojowej (a) oraz temperaturze 900°C (b).

wskazuje, że wraz ze wzrostem grubości warstwy zwiększa się tendencja do inicjowania pęknięć prowadzących do rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego. Jednak wyniki badań zmęczenia wysokotemperaturowego nie potwierdzają tego wniosku, bowiem liczba cykli do zniszczenia próbek jest podobna dla obu grubości warstwy przy tych samych wartościach amplitudy. Widoczny jest natomiast wyraźny spadek wytrzymałości zmęczeniowej stopu w temperaturze 900°C, w której liczba cykli do zniszczenia przy amplitudzie 500 MPa wynosi około 35 000, podczas gdy w temperaturze pokojowej próbka z warstwą o grubości 20  $\mu\text{m}$  uży-

skała wytrzymałość ponad 800 000 cykli. W rozpatrywanym zakresie grubości warstwy nie zauważono jej wpływu na wytrzymałość zmęczeniową.

## 6.4 Badania stopu MAR 247 metodą prądów wirowych

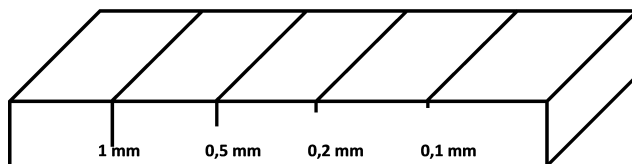
W celu opracowania procedur wczesnej detekcji pęknięć w stopach niklu wykorzystano techniki nieniszczące z zastosowaniem między innymi metody prądów wirowych. Badania defektoskopowe prowadzono w trybie skanowania powierzchni próbki wzdłuż osi głównej w obszarze części pomiarowej, gdzie spodziewano się powstawania pęknięć. Badania strukturoskopowe realizowano z wykorzystaniem efektu oddalenia przez przykładanie sondy pomiarowej w ustalone miejsca części pomiarowej próbki. Schemat wykonania pomiarów przedstawiono na rysunku 6.4 wraz ze zdjęciami urządzeń pomiarowych wykorzystywanych w testach.



Rysunek 6.4. Metodyka wykonania badań w zakresie defektoskopii (a) i strukturoskopii (b) oraz urządzenia pomiarowe wykorzystywane w ocenie stopnia degradacji: defektoskop NOR-TEC 600 D (c) i konduktometr FOERSTER SIGMA TEST 2.069 (d).

#### 6.4.1 Wynik badań defektoskopowych

Badania w zakresie identyfikacji i lokalizacji pęknięć próbek ze stopu MAR 247 prowadzono podczas prób zmęczeniowych, w trakcie zatrzymań testów przy ustalonej liczbie cykli, przy statycznym obciążeniu próbki. W celu kalibracji urządzenia wykonano wzorce z nieciągłościami referencyjnymi ze stopu niklu MAR 247 z warstwą aluminidkową o dwóch ustalonych grubościach. Opierając na literaturze i przeprowadzonych dotychczas testach, założono, że warstwa aluminidkowa na powierzchni stopu niklu pęka jako pierwsza przed pęknięciem próbki. Stąd konieczność wykonania próbek wzorcowych z warstwą o grubości 20 oraz 40  $\mu\text{m}$ . Na powierzchni wzorców wykonano nacięcia techniką elektroerozyjną. Zastosowano następujące głębokości nacięć: 0,1; 0,2; 0,5 oraz 1 mm i szerokości wynikającej z grubości drutu tnącego w maszynie elektroiskrowej (ok. 0,13 mm). Schemat wzorca nieciągłości pokazano na rysunku 6.5.



Rysunek 6.5. Próbka referencyjna z nacięciami wzorcowymi do kalibracji sygnału.

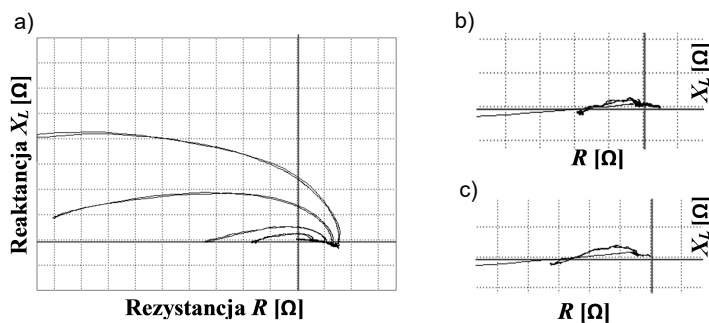
Wielkość nacięć zaprojektowano zgodnie z normą PN-EN 12084 *Badania nieniszczące – Badania metodą prądów wirowych – Zasady ogólne i wytyczne*. Tak przygotowane wzorce umożliwiają zoptymalizowanie parametrów pod kątem precyzyjnej detekcji dla każdego typu warstwy na podłożu ze stopu niklu.

Badania dotyczące ujawnienia pęknięć pod obciążeniem cyklicznym prowadzono z zastosowaniem ołówkowych sond stykowych o średnicach w przedziale od 1,8 do 3,2 mm. Polegały one na skanowaniu obu powierzchni bocznych w obszarze przewężenia przy statycznym obciążeniu odpowiadającym wartości amplitudy naprężenia zmęczeniowego po ustalonej liczbie cykli zmęczeniowych. Procedura wykonania badania przy maksymalnej wartości naprężenia rozciągającego pozwala na najbardziej efektywną detekcję nieciągłości, co potwierdzają wskazania od wad wzorcowych. Pomiarów wykonano na wszystkich próbkach poddanych obciążeniom cyklicznym z wyłączeniem próbek, na których prowadzono rejestracje odkształcenia połowymi metodami optycznymi ESPI oraz DIC.

W zależności od wartości amplitudy naprężenia badanie prowadzono według dwóch procedur. Dla mniejszych wartości amplitudy, przy których próbki wytrzymywały od kilkudziesięciu tysięcy do kilku milionów cykli obciążenia,

pomiary wykonywano w czasie zatrzymania próby zmęczeniowej po ustalonej liczbie cykli. Częstotliwość pomiarów zwiększano wraz z liczbą cykli, czyli wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa pojawienia się pęknięcia. Skanowanie próbki w części pomiarowej prowadzono przy zerowej sile oraz przy maksymalnej sile, równej amplitudzie naprężenia zmęczeniowego, w celu łatwiejszej detekcji nieciągłości. W przypadku próbek poddanych testom zmęczeniowym o największej amplitudzie naprężenia (650 MPa) badania prowadzono w trybie ciągłym, podczas dynamicznego obciążania próbek od pierwszych cykli, aż do chwili pęknięcia.

Na rysunku 6.6 pokazano zmiany impedancji uzyskane na wzorcu o nieciągłościach referencyjnych 0,1; 0,2; 0,5 oraz 1 mm (rys. 6.6a) oraz w miejscu pęknięcia próbki, zarejestrowane przy naprężeniu zerowym (rys. 6.6b) oraz naprężeniu 600 MPa równym amplitudzie zmęczeniowej (rys. 6.6c). Na podstawie analizy porównawczej sygnałów można oszacować wielkość (głębokość) pęknięcia (ok. 0,1–0,2 mm), przy czym widać, że wskazanie od nieciągłości jest większe dla obciążonej próbki niż dla próbki nieobciążonej.


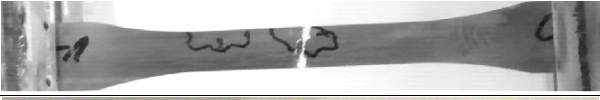





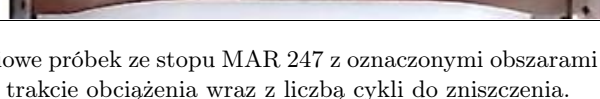


Rysunek 6.6. Zmiany impedancji na nieciągłościach próbki referencyjnej (a) oraz w miejscu pęknięcia próbki nieobciążonej (b) oraz próbki obciążonej (c).

Pęknięcia zidentyfikowano na różnym etapie rozwoju procesu zmęczenia próbki, ale zawsze przed utratą jej spójności. Proces pęknięcia był inicjowany na powierzchni pokrytej warstwą aluminidkową, a pęknięcie propagowało się przez warstwę w głąb materiału podłoża. Teoretyczny próg detekcji pęknięć wynosił około 100  $\mu\text{m}$ , ponieważ taka była głębokość najmniejszej nieciągłości na wzorcu. W praktyce możliwa jest detekcja pęknięć o mniejszej głębokości, ale ocena ich wielkości może być utrudniona. Aby zwiększyć próg detekcji wad, należało zatrzymać obciążenia cykliczne.

Dla większości prób zidentyfikowano wiele pęknięć, z których jedno rozwijało się w szczelinę dominującą i prowadziło do dekohezji próbki. W jednej z pró-

bek stwierdzono nawet sześć wskazań od nieciągłości. Na rysunku 6.7 pokazano zdjęcia złomów zmęczeniowych, z zaznaczonymi obszarami detekcji nieciągłości, które stanowiły źródło ich zniszczenia, co potwierdzają miejsca pęknięć widoczne na zdjęciach złomów. Wyjątkiem jest ostatnia z testowanych próbek (nr 8), dla której obciążenie zatrzymano w trakcie testu zmęczeniowego. Pęknięcia zidentyfikowano po 50 000 cyklach, a zniszczenie nastąpiło po ponad 76 000 cyklach.

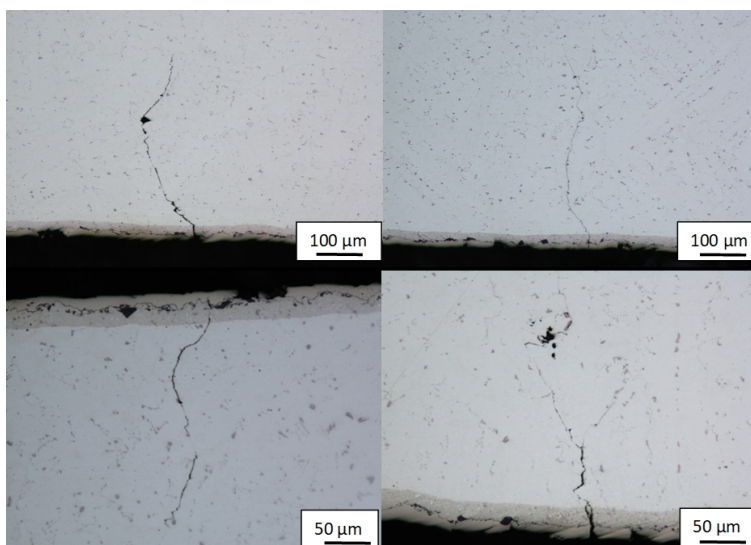
Amplituda naprężenia [MPa]	Liczba cykli do pęknięcia	Zdjęcie złomów zmęczeniowych próbek
650	9 890	
650	10 638	
600	22 134	
600	24 476	
550	43 074	
500	74 235	
450	95 169	
500	50 000	

Rysunek 6.7. Złomy zmęczeniowe próbek ze stopu MAR 247 z oznaczonymi obszarami detekcji pęknięć zidentyfikowanych w trakcie obciążenia wraz z liczbą cykli do zniszczenia.

Wyniki tych badań potwierdziły możliwość zastosowania metody prądów wirowych w detekcji pęknięć, a nawet mikropęknięć pojawiających się w drugim etapie procesu zmęczeniowego, czyli w trakcie stabilnego rozwoju uszkodzenia. Na tej podstawie można wnioskować, że monitorowanie powierzchni materiału konstrukcji pracującej w warunkach obciążenia zmiennego pod kątem identyfikacji nieciągłości umożliwia kontrolowanie ryzyka potencjalnej awarii związanej z utratą spójności.



Część prób zmęczeniowych została zatrzymana po detekcji pierwszych uszkodzeń na powierzchni próbek. Z przekrojów wzdłużnych tych próbek wykonano zglądy metalograficzne w celu potwierdzenia występowania pęknięć oraz oceny ich wymiarów. Obserwacje przeprowadzone za pomocą mikroskopu świetlnego wykazały pęknięcia po obu stronach próbek. Na rysunku 6.8 przedstawiono wybrane pęknięcia ujawnione przy użyciu mikroskopu świetlnego NIKON EIPHOT 200.

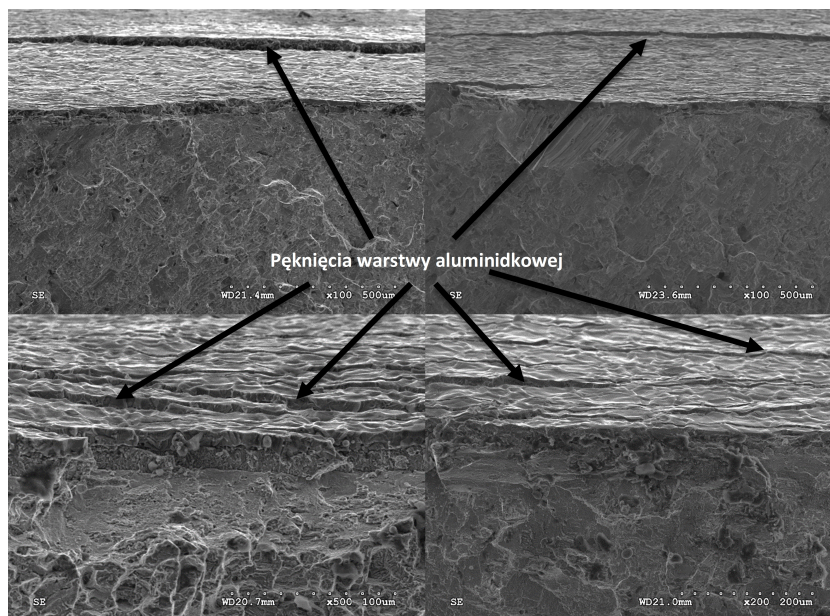


Rysunek 6.8. Pęknięcia zainicjowane na powierzchni warstwy aluminikowej i propagujące w głąb osnowy ze stopu niklu.

Wyniki badań mikrostrukturalnych potwierdziły skuteczność metody prądów wirowych nie tylko w zakresie identyfikacji pęknięć, ale także ilościowej oceny ich głębokości na podstawie analizy porównawczej ze wskazaniami uzyskanymi dla próbki referencyjnej. W detekcji pęknięć lepsze efekty uzyskano, prowadząc badania na powierzchni próbek w stanie obciążenia statycznego podczas zatrzymania testu zmęczeniowego. W przypadku badań realizowanych na powierzchni próbek poddawanych cyklicznym obciążeniom zmiennym o dużej wartości amplitudy naprężenia (600 i 650 MPa) skanowanie nie ujawniło żadnych nieciągłości. Oznacza to konieczność zatrzymywania obciążenia dynamicznego do identyfikacji uszkodzeń zmęczeniowych.

Obecność pęknięć powstających podczas testów zmęczeniowych na powierzchni warstwy aluminikowej i propagujących wewnątrz rdzenia ze stopu niklu potwierdziły także badania fraktograficzne. Obserwacje przełomów zmęczenio-

wych przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego uwidoczniły liczne pęknięcia na fragmentach powierzchni bocznych części pomiarowych próbek. Przykładowe zdjęcia przełomów z pęknięciem (lub pęknięciami równoległymi do powierzchni przełomu) przedstawiono na rysunku 6.9.



Rysunek 6.9. Zdjęcia przełomów zmęczeniowych próbek ze stopu MAR 247 z widocznymi pęknięciami warstwy aluminiowej na powierzchniach bocznych.

#### 6.4.2 Wyniki strukturoskopi prądowirowej

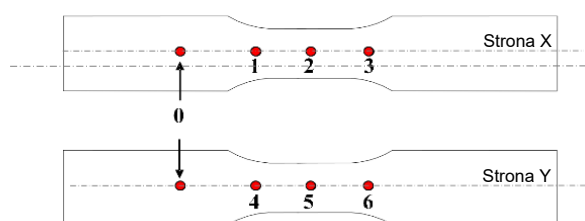
Metodę prądów wirowych wykorzystano także do identyfikacji uszkodzenia zmęczeniowego próbek ze stopu niklu, we wczesnym stadium rozwoju wad, poprzez ujawnienie lokalnych zmian parametrów elektromagnetycznych powstałych podczas testów zmęczeniowych. Ponieważ stop MAR 247 jest paramagnetykiem, w którym wartość przenikalności magnetycznej nie zmienia się pod wpływem indukcji prądów wirowych, przeprowadzono próby identyfikacji lokalnych zmian przewodności, jako składowej impedancji, mogących wskazywać na miejsce inicjowania uszkodzenia zmęczeniowego. Pomiar przewodności elektrycznej (konduktywności) został wykonany w części pomiarowej próbek przyrządem FOERSTER SIGMATEST 2.069 przy użyciu sondy 2.069US 9068074 S/N 594 (rysunek 6.4). Urządzenie to umożliwia:

- pomiar konduktywności materiałów nieferromagnetycznych z wykorzystaniem metody prądów wirowych w zakresie częstotliwości wzbudzenia od 60 do 960 kHz;
- precyzyjną penetrację powierzchniową z zastosowaniem wysokich częstotliwości;
- „wniknięcie” zmiennym polem na większe głębokości przy mniejszych wartościach częstotliwości wzbudzenia;
- rejestrację lokalnego spadku wartości przewodności elektrycznej, wynikającego z miejscowego mikropęknięcia, koncentracji naprężenia wokół karbu strukturalnego itp.

Ilościowy wynik zmian wartości przewodności elektrycznej może pomóc w zwiększeniu precyzji określania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych zarówno ze stopów niklu, jak i innych materiałów nieferromagnetycznych.

Pomiary wykonano przy częstotliwości 240 kHz, uzyskując głębokość wnikania prądów wirowych do około 1 mm, oraz przy częstotliwości 960 kHz ograniczającej wnikanie prądów wirowych na głębokość do około 0,5 mm. Kalibracja parametrów pomiaru wykonana została na wzorcu konduktywności S/N 898. Temperatura zmierzona urządzeniem SIGMATEST wynosiła 20°C.

Pomiar z wykorzystaniem opracowanych procedur wykonano w wybranych punktach, według schematu zamieszczonego na rysunku 6.10, tzn. w części chwytowej i w trzech miejscach po obu stronach części pomiarowej próbki w obszarze jej przewężenia. Są to obszary spodziewanego rozwoju uszkodzenia pod wpływem cyklicznych obciążeń zmiennych. Pomiar w części chwytowej miał na celu uzyskanie wartości referencyjnej, która w kolejnych cyklach obciążenia nie uległa zmianie.



Rysunek 6.10. Szkic obrazujący miejsca wybrane do pomiarów kąta fazowego sygnału ET.

Pomiary konduktywności wykonywano na kilku próbkach w trakcie testów zmęczeniowych po ustalonej liczbie cykli, zatrzymując zadawanie obciążenia i odcinając próbkę (pomiar przy zerowej sile). Pomiary wykonano także na

złomach zmęczeniowych próbek po testach zarówno w temperaturze otoczenia, jak i w temperaturze 900°C.

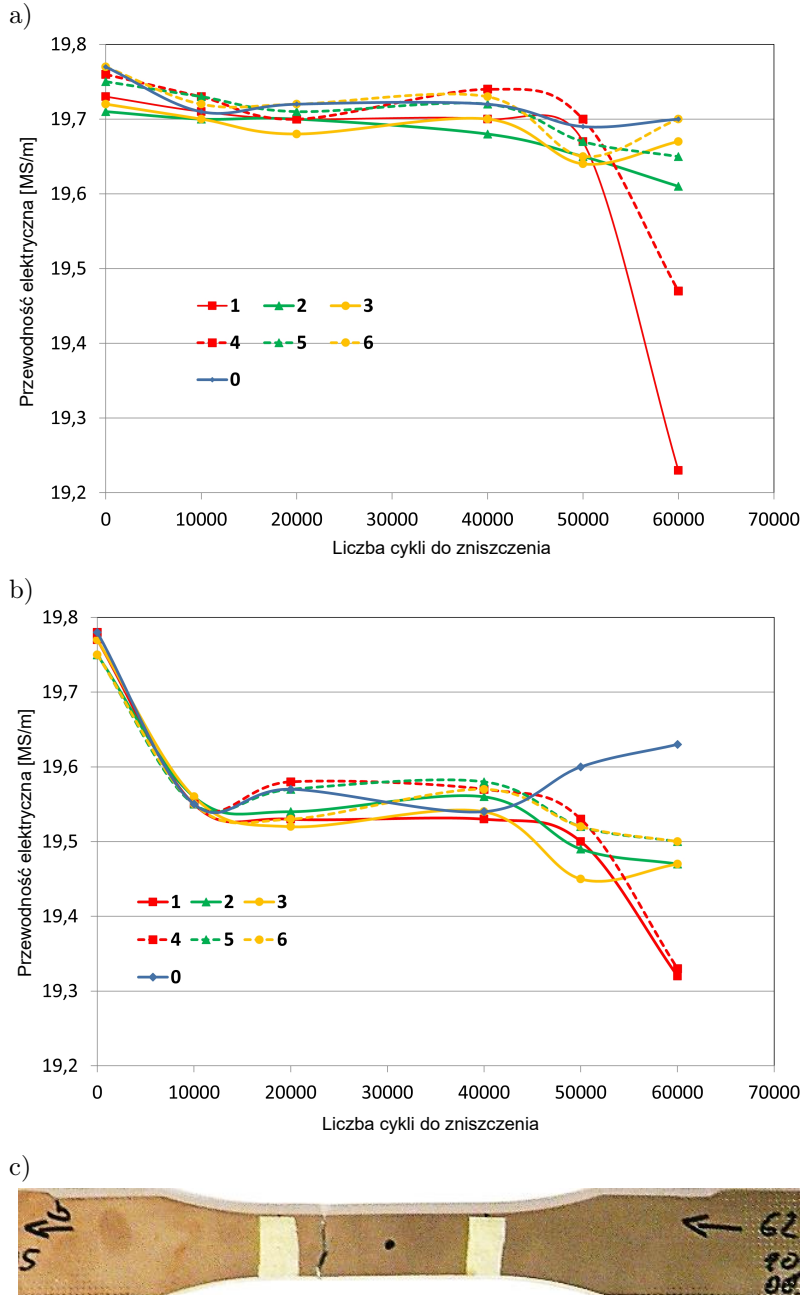
Wyniki pomiarów większości próbek wykazały lokalny spadek konduktywności w obszarze, gdzie doszło do pęknięcia próbki. Zmiany te były z reguły identyfikowane podczas ostatniego zatrzymania testu zmęczeniowego, ale przed pojawieniem się pęknięć, które poszukiwane były w trybie defektoskopowym, przez skanowanie próbki defektoskopem.

Na rysunkach 6.11 i 6.12 przedstawiono zależności konduktywności mierzonej w ustalonych obszarach próbki w funkcji liczby cykli. Są to przykładowe wyniki uzyskane dla dwóch wartości amplitudy naprężenia, 600 i 650 MPa, oraz dwóch wartości częstotliwości prądu wzbudzającego, 240 oraz 960 kHz. Na wykresie każda linia prezentuje zmiany konduktywności w jednym obszarze próbki według następującego porządku:

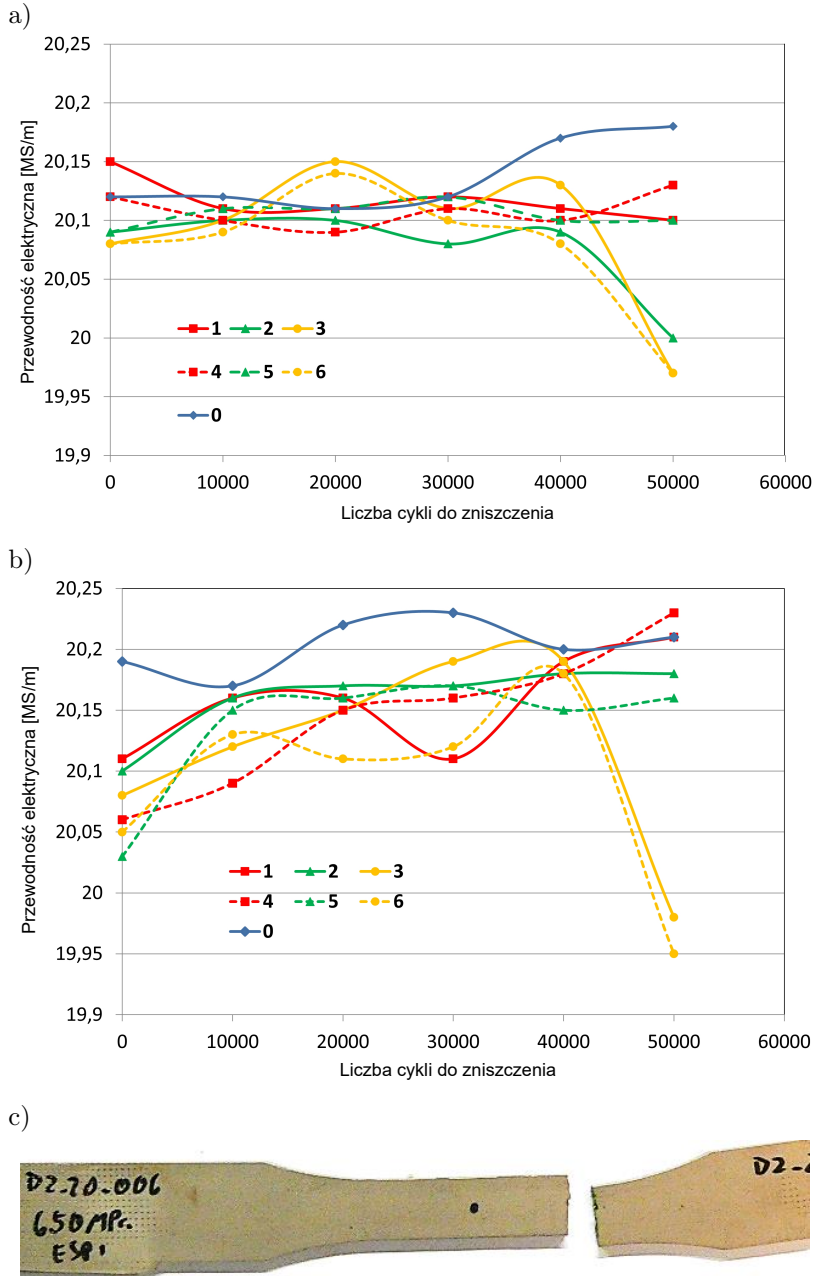
- niebieska linia ciągła – obszar referencyjny (część chwytowa próbki);
- czerwona linia ciągła – górny obszar części pomiarowej strona X;
- zielona linia ciągła – środkowy obszar części pomiarowej strona X;
- pomarańczowa linia ciągła – dolny obszar części pomiarowej strona X;
- analogicznie, z użyciem linii **przerywanej** oznaczono przebiegi zmian konduktywności po stronie Y.

Zarejestrowane zmiany przewodności elektrycznej zmierzone podczas testów zmęczeniowych są bardzo subtelne i mieszczą się w zakresie 19,3–20,25 MS/m. Wykresy na rysunku 6.11 wskazują na lokalny spadek przewodności próbek obciążanych zmiennym naprężeniem o wartości 600 MPa w obszarze, w którym doszło do pęknięcia. Fakt ten potwierdza zdjęcie próbki z widocznym miejscem pęknięcia. Spadek ten zarejestrowano po obu stronach próbki, przy czym dla częstotliwości 960 kHz był on większy, co sugeruje powierzchniowy charakter anomalii konduktywności w tym miejscu. Ponieważ zgodnie z mechanizmami pęknięcia zmęczeniowego pęknięcie rozpoczyna się zwykle w ognisku zlokalizowanym w pobliżu powierzchni, gdzie działają największe naprężenia [109], zmianę przewodności przy powierzchni górnej części próbki można powiązać z procesami degradacji w tym obszarze, prowadzącymi do rozwoju uszkodzenia.

Podobne zmiany towarzyszą zmęczeniu próbki obciążonej cyklicznie zmiennym naprężeniem o amplitudzie 650 MPa, co obrazują wykresy na rysunku 6.12 (części a i b rysunku) oraz lokalizacja pęknięcia widoczna na złomie (rysunek 6.12c). Uzyskany wynik potwierdza fakt, że w końcowym etapie procesu zmęczenia materiału próbki, ale przed pojawieniem się pęknięć prowadzących do powstania szczeliny dominującej, następują w materiale lokalne zmiany



Rysunek 6.11. Zmiany przewodności elektrycznej w funkcji liczby cykli dla wybranych obszarów próbek poddanych zmęczeniu o amplitudzie naprężenia 600 MPa, przy częstotliwości 240 kHz (a) oraz 960 kHz (b), oraz widok próbki z miejscem jej pęknięcia (c).



Rysunek 6.12. Zmiany przewodności elektrycznej w funkcji liczby cykli dla wybranych obszarów próbek poddanych zmęczeniu o amplitudzie naprężenia 650 MPa, przy częstotliwości 240 kHz (a) oraz 960 kHz (b), oraz widok próbki z miejscem jej pęknięcia (c).

właściwości, których identyfikacja i lokalizacja jest możliwa z zastosowaniem nieniszczących technik diagnostycznych, m.in. metodą prądów wirowych.

Zaobserwowane zmiany te mogą wynikać z kumulacji odkształcenia w miejscu potencjalnego rozwoju uszkodzenia związanego z koncentracją naprężenia w miejscu karbu strukturalnego lub geometrycznego. Spadek wartości konduktywności może również wynikać z pęknięcia, niewykrytego techniką defektoskopową. Więcej wyników badań oraz prób ich interpretacji przedstawiono w publikacjach naukowych z dziedziny szeroko rozumianej diagnostyki przemysłowej oraz badań wytrzymałościowych elementów maszyn i konstrukcji [118, 119, 176].

## 6.5 Identyfikacja i analiza rozwoju uszkodzenia metodami optycznymi

W związku z założeniem, że zmiany konduktywności w obszarach rozwoju uszkodzenia związane są z lokalną akumulacją odkształcenia niesprężystego, podjęto próby oceny rozwoju odkształcenia na płaszczyźnie próbki poddanej zmęczeniu przy wykorzystaniu technik optycznych. Techniki takie jak cyfrowa korelacja obrazu (DIC – *Digital Image Correlation*) czy elektroniczna interferometria plamkowa (ESPI – *Electronic Speckle Pattern Interferometry*) dają możliwość identyfikacji zmian w strukturze powierzchniowej i podpowierzchniowej materiału poddawanego oddziaływaniu cyklicznego naprężenia zmiennego na poziomie mikroskali, co z kolei pozwala na lokalizację obszaru inicjowania uszkodzenia przed jego dynamicznym rozwojem.

Wymienione metody różnią się zarówno w zakresie rozdzielczości pomiarowej, jak i techniki rejestracji danych. Metoda DIC umożliwia ciągły monitoring zmian rozkładu odkształcenia, a dynamika rejestracji uzależniona jest jedynie od parametrów kamery (lub pary kamer, w przypadku pomiarów 3D) i mocy obliczeniowych stacji roboczej użytych w systemie pomiarowym. Pozwala także na wyznaczanie składowych odkształcenia z rozdzielczością rzędu  $5 \cdot 10^{-4}$ . Metoda ESPI jest dedykowana do badań w warunkach statycznych, co wynika z czasu rejestracji przemieszczenia mierzonego na podstawie odkształcenia prążków interferencyjnych, których uzyskanie wymaga kilku sekund. Otrzymanie stabilnego obrazu interferencyjnego wymaga zatrzymania siły, czyli rejestrowane są zmiany powierzchniowego rozkładu odkształcenia tylko w wybranych cyklach obciążenia, ale przy większej rozdzielczości, rzędu  $10^{-6}$ .

Badania zmęczeniowe z jednoczesną rejestracją map przemieszczenia prowadzone są w celu lokalizacji miejsca inicjowania uszkodzenia zmęczeniowego i monitorowania jego rozwoju, a także w ocenie propagacji pęknięcia wywołanego

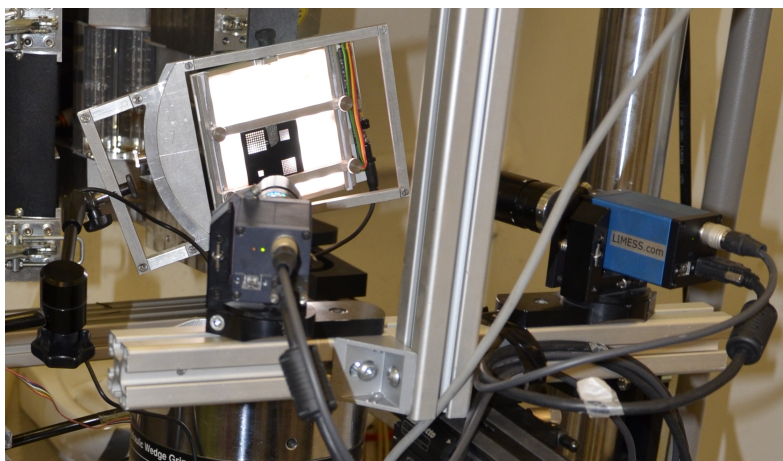
cyklicznym obciążeniem zmiennym. Metoda cyfrowej korelacji umożliwia precyzyjny pomiar zarówno globalnych, jak i lokalnych pól deformacji powstałych w procesie zmęczenia i pełzania. Tego typu badania prowadzone były z powodzeniem na próbkach z papieru [177]. Badania na próbkach ze stopu aluminium 2024 po obróbce cieplnej T4 pozwoliły ocenić wpływ korozji na ewolucję uszkodzeń, inicjowanie i propagację pęknięć [178]. Wyniki tych badań wykazały wpływ korozji na przyspieszoną akumulację uszkodzeń, które wywoływały przedwczesne powstawanie pęknięć zmęczeniowych i wpływały na lokalizację zarodkowania pęknięć, orientację pęknięć i ścieżkę pęknięcia. Obserwacje metodą DIC podczas testów zmęczeniowych wykazały skuteczne prognozowanie wzrostu pęknięć zmęczeniowych i uszkodzenia z pojedynczego, dominującego, zlokalizowanego obszaru korozji. Za pomocą techniki cyfrowej korelacji obrazu zmierzono pola deformacji wierzchołka pęknięcia oraz proces otwierania pęknięcia podczas badania propagacji pęknięć zmęczeniowych stopu Ti-6Al-4V [179]. Na podstawie pomiarów określono eksperymentalnie zarówno odkształcenia wierzchołka pęknięcia, jak i rozmiary stref plastycznych dla czterech przypadków przeciążenia zmęczeniowego. Podobne badania, skupione na analizie zachowania się zainicjowanych pęknięć w kolejnych cyklach obciążeń zmiennych, prowadzono na próbkach ze stali austenitycznej [180] oraz stopach miedzi [181].

Elektroniczna interferometria plamkowa z uwagi na konieczność zachowania stabilnych warunków pomiarowych jest mniej popularna w badaniach zmęczeniowych. Jednak daje ona możliwość pomiaru przemieszczeń 3D z dużą dokładnością przestrzenną w szerokim zakresie amplitudy obciążenia zmęczeniowego. Dzięki temu metoda ta znalazła zastosowanie w pomiarach lokalnego odkształcenia na spawanym złączu krzyżowym poddanym niskocyklowemu zmęczeniu [182]. Metoda ESPI, dzięki dynamicznej akwizycji danych wygenerowanych z zastosowaniem demodulatora optycznego, pozwala także na opracowanie procedur szacujących trwałość zmęczeniową elementów konstrukcji, co opisano na przykładzie badań izotropowej płyty aluminiowej [183]. Nieniszczący charakter badań metodami optycznymi i elektromagnetycznymi umożliwia ich równoległe zastosowanie w testach zmęczeniowych, a tym samym weryfikację uzyskanych wyników. Takie rozwiązanie zastosowano w badaniach zmęczeniowych próbek ze stopu aluminium AA6082, które następnie obciążono statycznie w warunkach jednoosiowego rozciągania, a do rejestracji danych eksperymentalnych zastosowano dwie wspomniane techniki optyczne [184]. Uzyskane dane przyrostu składowych odkształceń w obszarze pęknięcia wykorzystano do obliczania współczynnika intensywności naprężenia i monitorowania ewolucji rozwoju uszkodzenia. Podobne podejście zastosowano w badaniach własnych próbek ze stopu MAR 247.



### 6.5.1 Badania z wykorzystaniem cyfrowej korelacji obrazu (DIC)

Badania z wykorzystaniem metody DIC wykonano w celu ilościowej oceny przemieszczenia/odkształcenia na powierzchni próbki pod wpływem zadawania cyklicznych obciążeń zmiennych. Obszar rejestracji pola odkształcenia obejmował część pomiarową próbki o geometrii pokazanej na rysunku 6.1. Stanowisko badawcze i jego przykładową konfigurację podczas badań laboratoryjnych przedstawiono na rysunku 6.13.



Rysunek 6.13. Stanowisko do pomiarów 3D DIC wraz z kalibratorem.

Wykonanie badań metodą DIC wymaga przeprowadzenia procedury kalibracyjnej. Polega ona na wykonaniu serii kilkunastu do kilkudziesięciu zdjęć siatki kalibracyjnej o ustalonych wymiarach, umieszczonej pod różnymi kątami względem kamer. Oprogramowanie 3D DIC na podstawie analizy zdjęć siatki dokonuje obliczeń położenia kamer względem siebie oraz badanego obiektu, następnie wyznacza korekty zniekształceń obrazu wprowadzanych przez obiektywy. W przypadku pól obserwacji o wielkości kilku milimetrów kwadratowych kalibrację przeprowadzono z wykorzystaniem specjalnie zaprojektowanego kalibratora. Umożliwiał on obrót siatki w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, utrzymując siatkę w obszarze obserwacji kamer. Zapewniał również podświetlenie o regulowanej intensywności, wymagane w przypadku stosowania siatek drukowanych na szkle. W badaniach wykorzystano kwadratową siatkę z 81 punktami oddalonymi od siebie o stałą odległość 0,45 mm. Kalibrator ma możliwość montażu w uchwycie magnetycznym, co ułatwia kalibrację również w warunkach przemysłowych.

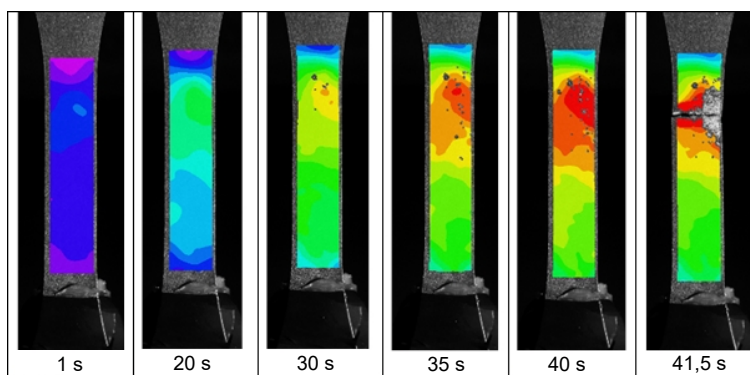
W celu uzyskania odpowiedniego kontrastu na próbki rozpylono farbę, uzyskując unikalny wzór pozwalający porównywać obrazy punktów charakterystycznych po kolejnych cyklach zmęczenia. Opracowano procedurę nanoszenia zawiesiny do badań penetracyjnych (kolor biały), na którą rozpylono następnie farbę grafitową, tworząc kontrastowy wzór plamek. Próbkę po testach z widoczną, naniesioną do badań warstwą przedstawiono na rysunku 6.14.



Rysunek 6.14. Pęknięte próbki z warstwą kontrastową poddane badaniu DIC.

W pierwszej kolejności przeprowadzono badania z zastosowaniem metody DIC w warunkach statycznego rozciągania, aby zoptymalizować zarówno parametry układu pomiarowego, jak i ustawienia maszyny wytrzymałościowej. Wyniki tych pomiarów w postaci map odkształcenia w wybranych sekwencjach

próby rozciągania dla wybranej próbki ze stopu niklu MAR 247 pokazano na rysunku 6.15.

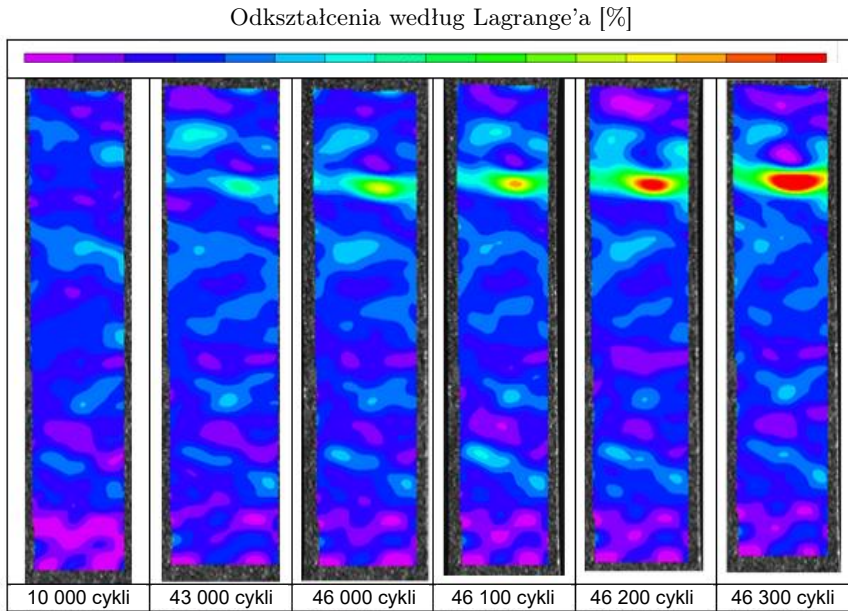


Rysunek 6.15. Mapy odkształcenia powierzchni próbki w wybranych sekwencjach statycznej próby rozciągania.

Uzyskane wyniki wskazują miejsca akumulacji odkształcenia w końcowej fazie rozciągania, poprzedzającej pęknięcie próbki o ponad 10 s. Od tego momentu odkształcenie rozwija się jedynie w obszarze powstałej akumulacji, aż do osiągnięcia krytycznej wartości naprężenia i pęknięcia próbki. We wszystkich wykonanych próbach pęknięcie rozwijało się w obszarze lokalnego wzrostu poziomu odkształcenia rejestrowanego przez układ kamer.

Testy zmęczeniowe z jednoczesnym pomiarem metodą DIC prowadzono dla amplitudy naprężenia z zakresu 550–650 MPa oraz przy częstotliwości zadawania obciążenia 20 Hz. Mapy przemieszczenia rejestrowano w trybie ciągłym, w sekwencjach pięciosekundowych. Ograniczenie to wynika z możliwości przetwarzania i zapisu danych w systemie DIC. W rezultacie powstało kilkanaście animacji przedstawiających zmiany rozkładu przemieszczenia podczas prób zmęczeniowych oraz obrazy pól odkształcenia co 100 cykli. Na rysunkach 6.16–6.18 pokazano przykładowe sekwencje map odkształcenia zarejestrowane przy ustalonej liczbie cykli dla dwóch wartości amplitudy naprężenia zmiennego. Obrazy przedstawiają głównie końcowy etap zmęczenia, z zagęszczonym zobrazowaniem ostatnich zarejestrowanych cykli, gdzie widać lokalizację odkształcenia i jej rozwój, aż do momentu poprzedzającego zerwanie próbki.

Pierwsze oznaki lokalizacji odkształcenia widoczne były po 43 000 cykli obciążenia w górnym obszarze części pomiarowej próbki, co jest widoczne na rysunku 6.16. Na tym etapie brak było wskazań przy użyciu metody prądów wirowych, potwierdzających umiejscowienie źródła inicjowania uszkodzenia. Kolejne



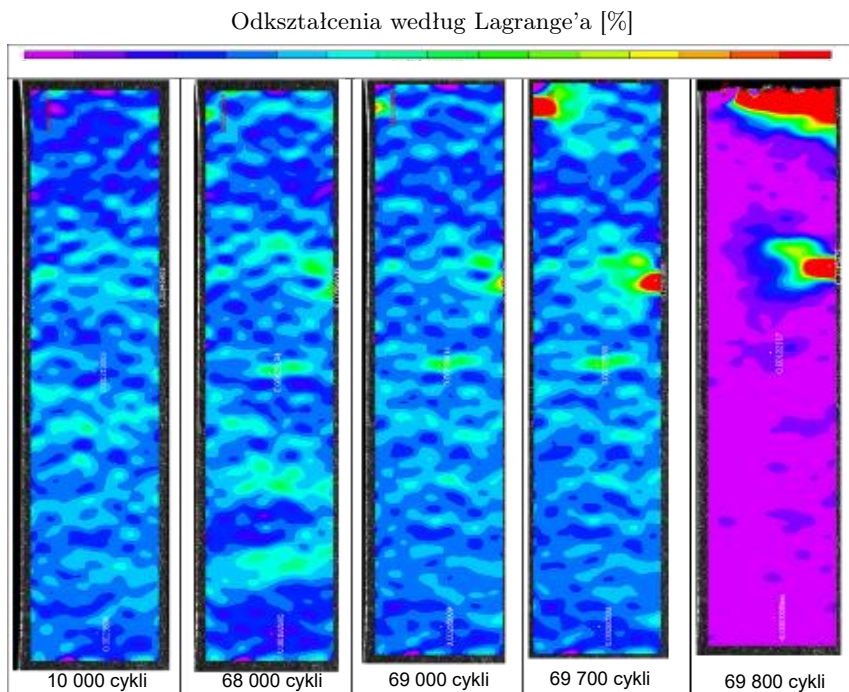
Rysunek 6.16. Mapy odkształcenia w wybranych sekwencjach dla naprężenia zmiennego o amplitudzie 600 MPa.

badanie, które pozwoliło zarejestrować wskazanie od nieciągłości, wykonano po 46 200 cyklach. Skutek akumulacji odkształcenia, będący wynikiem koncentracji naprężenia, zarejestrowano na ponad 3000 cykli przed zerwaniem próbki, która pękła po 46 364 cyklach.

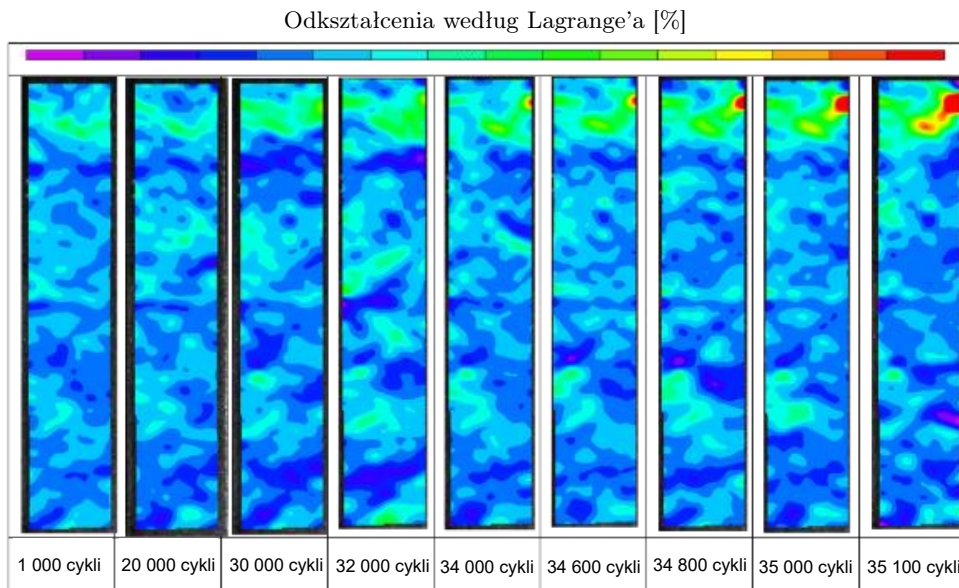
Z uwagi na obecność warstwy kontrastowej naniesionej na powierzchni próbek niemożliwe było zastosowanie metody ET w celu potwierdzenia pojawienia się nieciągłości w obszarze koncentracji naprężenia.

Następna próba była realizowana przy amplitudzie cyklicznego obciążania o wartości 550 MPa i dała podobne wyniki. Pierwsze oznaki koncentracji naprężenia, uwidocznione na mapach rozkładu odkształcenia, pojawiły się na 2000 cykli przed pęknięciem, które nastąpiło po osiągnięciu 69 785 cykli. Na drugiej mapie przemieszczenia, przedstawionej na rysunku 6.17, również jest widoczna lokalna koncentracja odkształcenia, prowadząca do uszkodzenia próbki.

Analiza obrazów rozkładu przemieszczenia uzyskanych podczas testów zmęzeniowych przy naprężeniu zmiennym o amplitudzie 650 MPa (rysunek 6.18) pozwala określić obszar przypuszczalnego rozwoju uszkodzenia już po pierwszych cyklach obciążenia. Na mapie zapisanej po 1000 cykli widać obszar zakumulowanego odkształcenia, który utrzymuje się do końca próby. Jednak dopiero



Rysunek 6.17. Mapy odkształcenia w wybranych sekwencjach dla naprężenia zmiennego o amplitudzie 550 MPa.



Rysunek 6.18. Mapy odkształcenia w wybranych sekwencjach dla naprężenia zmiennego o amplitudzie 650 MPa.

po 34 000 cykli poziom deformacji osiąga wartość, która może wskazywać na pojawienie się pęknięcia. Od tego momentu widać już wyraźne maksimum odkształcenia, w którym dochodzi do zerwania próbki po kolejnych 1200 cyklach. Próbka została poddana badaniom metodą prądów wirowych po wykonaniu 35 000 cykli i przy braku wskazań nieciągłości. Zarejestrowano spadek wartości kąta fazowego w górnej części próbki, czyli tam, gdzie doszło do akumulacji odkształcenia, a w konsekwencji do pęknięcia próbki. Wyniki badań stopu MAR 247 z wykorzystaniem techniki DIC oraz innych technik nieniszczących zostały opisane w pracach [185, 186].

Metoda DIC przy pewnych ograniczeniach dokładności pomiaru odkształcenia jest stosunkowo łatwą techniką diagnozowania uszkodzenia rozwijającego się w strefie powierzchniowej lub podpowierzchniowej. Metoda ta została zastosowana także do monitorowania zmian odkształcenia w wysokotemperaturowych próbach zmęczeniowych, jednak użycie grzałki indukcyjnej znacząco ograniczyło pole widzenia kamery. Tym niemniej wykorzystanie cyfrowej korelacji obrazu do ceny powierzchniowych zmian rozkładów odkształcenia umożliwia monitorowanie rozwoju uszkodzenia na badanej powierzchni, w tym identyfikację momentu pojawienia się akumulacji odkształcenia prowadzącej do powstawania pęknięć. Możliwości pomiarowe metody pozwalają identyfikować uszkodzenia na ostatnim etapie zmęczenia poprzedzającym pęknięcie próbki, jednak w pewnych przypadkach lokalizacja uszkodzenia pojawia się już w pierwszym etapie procesu zmęczeniowego. Metoda DIC może znaleźć zastosowanie w nieinwazyjnej diagnostyce wytężonych obszarów, krytycznych elementów instalacji i konstrukcji. W miejscach spodziewanej koncentracji naprężenia może być cennym narzędziem w prognozowaniu czasu bezpiecznej eksploatacji.

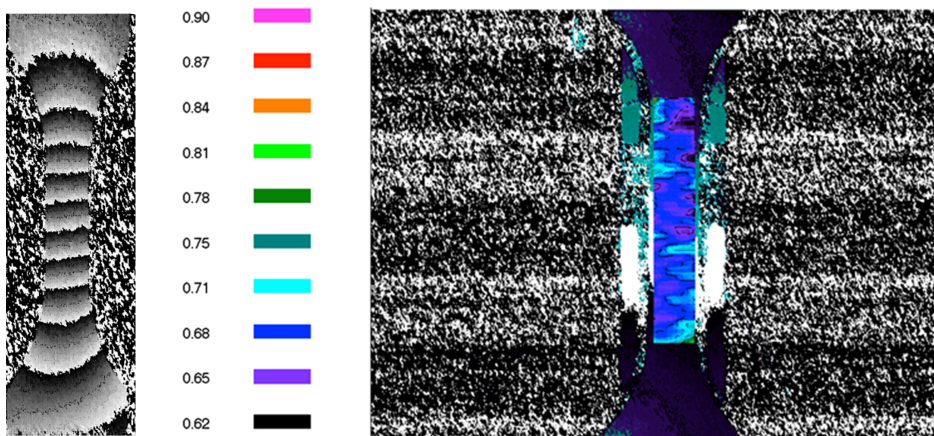
### 6.5.2 Ocena uszkodzeń metodą interferometrii plamkowej (ESPI)

Elektroniczna interferometria plamkowa jest optyczną metodą pomiaru deformacji powierzchni badanych elementów opartą na analizie światła laserowego rozproszonego na optycznie chropowatej powierzchni. W procesie interferencji biorą udział dwie wiązki: pierwsza oświetla badaną powierzchnię, a odbite od niej światło interferuje z drugą, tzw. wiązką odniesienia (może to być wiązka równoległa bądź rozproszona na chropowatej powierzchni). Wynik interferencji rejestrowany jest w postaci obrazów plamkowych przy użyciu kamery. Przez proces odejmowania rozkładów intensywności (obrazów plamkowych) przed i po deformacji otrzymujemy prążki korelacyjne, z których generowane są mapy fazowe. Mapy fazowe zawierające informacje o kierunku i wartości deformacji są podstawą do wyznaczenia polowych rozkładów przemieszczenia dla każdego kie-

runku z osobna. Połowe rozkłady odkształcenia oraz naprężenia są wyznaczone algorytmicznie przy zadanych warunkach brzegowych (podane wymiary obszaru pomiarowego) oraz parametrach materiałowych (moduł sprężystości podłużnej oraz współczynnik Poissona).

Zastosowany w badaniach układ pomiarowy ESPI to system DANTEC DYNAMICS o oznaczeniu Q-300, którego czułość pomiarowa wynosi  $0,03\text{--}1\ \mu\text{m}$  w zależności od kierunku pomiaru oraz odległości czujnika od badanego obiektu (rozdzielczość pomiaru).

Pomiar odkształcenia z zastosowaniem kamery ESPI polega na analizie porównawczej zmian położenia prążków interferencyjnych widocznych na specjalnie przygotowanej powierzchni próbki pod wpływem przyłożonego obciążenia. Na rysunku 6.19 pokazano schemat wyznaczania mapy odkształcenia w systemie pomiarowym ESPI.



Rysunek 6.19. Obraz interferencyjny z nałożonym obrazem mapy odkształcenia w części pomiarowej próbki wygenerowanym przez system ESPI.

Wykonano ocenę zmian składowych przemieszczenia/odkształcenia w próbkach ze stopu MAR 247 w celu oceny możliwości wykorzystania metody ESPI do identyfikacji pęknięcia pod wpływem cyklicznych obciążeń zmiennych realizowanych w próbach zmęczeniowych. Rozkład składowych naprężenia wyznaczony na podstawie rozkładu odkształcenia w płaszczyznach próbek ze stopu niklu z zastosowaniem systemu ESPI pozwolił uzyskać informację o miejscach inicjowania procesu uszkodzenia.

Próbki do badań zmęczeniowych z wykorzystaniem kamery ESPI były pokryte zawiesziną ZP-9F stosowana do badań penetracyjnych w celu uniknięcia refleksów od powierzchni metalicznej próbki i uzyskania warunków optymalnych

do wykonywania pomiarów przemieszczenia ww. metodą. Geometrię próbek pokazano na rysunku 6.1.

Próby mające na celu identyfikację momentu pęknięcia na podstawie rozkładów pól odkształcenia uzyskanych za pomocą metody ESPI wykonano podczas testów zmęczeniowych prowadzonych dla amplitudy naprężenia w przedziale 500–700 MPa. Badania te realizowano w kolejnych dwóch wybranych cyklach obciążenia zmęczeniowego, począwszy od cyklu pierwszego. Powtórzenie pomiaru w cyklu następnym umożliwiała weryfikację uzyskanego wyniku. Kolejne pomiary przeprowadzono po ustalonej liczbie cykli, w zależności od amplitudy naprężenia i spodziewanej liczby cykli do zniszczenia próbki. Identyfikację pęknięć podczas obciążenia zmiennego z wykorzystaniem metody ESPI ograniczono do dużych wartości amplitudy naprężenia, tzn. 600 oraz 650 MPa, tak aby możliwie szybko uzyskać efekt pęknięcia. Ponadto, te same warunki testów zmęczeniowych jak w przypadku badań metodą DIC umożliwiły porównanie możliwości obu technik pomiarowych. Na podstawie opracowanych wcześniej wykresów Wöhlera i oszacowanej liczby cykli do zniszczenia ustalono procedurę rejestracji odkształcenia w wybranych cyklach. Rejestrowano mapy odkształcenia co 10 000 cykli, z założeniem zwiększenia liczby pomiarów po pojawieniu się lokalnych akumulacji odkształcenia. Układ pomiarowy wraz z próbką umieszczoną w maszynie jest pokazany na rysunku 6.20.

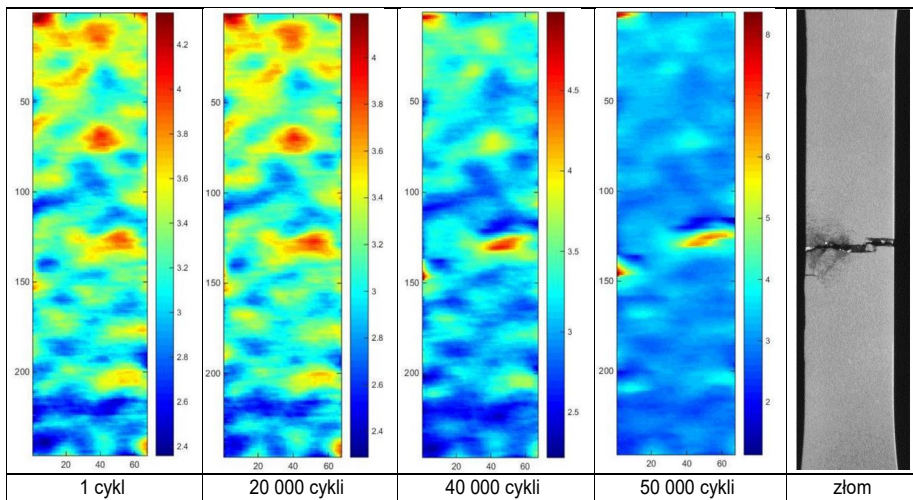


Rysunek 6.20. Stanowisko badawcze do oceny rozkładu deformacji metodą ESPI.

Obciążanie próbek wykonywano w sekwencjach w taki sposób, aby była zachowana stabilność prążków interferencyjnych, co umożliwiała pomiar przemieszczenia w wybranych cyklach obciążenia. Globalne odkształcenia mierzono za pomocą ekstensometru wzdłużnego firmy MTS z bazą pomiarową 30 mm. Dla każdej z badanych próbek wykonywano od 5 do 12 map przemieszczenia, co pozwoliło obserwować rozwój uszkodzenia próbki w postaci lokalnej koncentracji przemieszczenia.



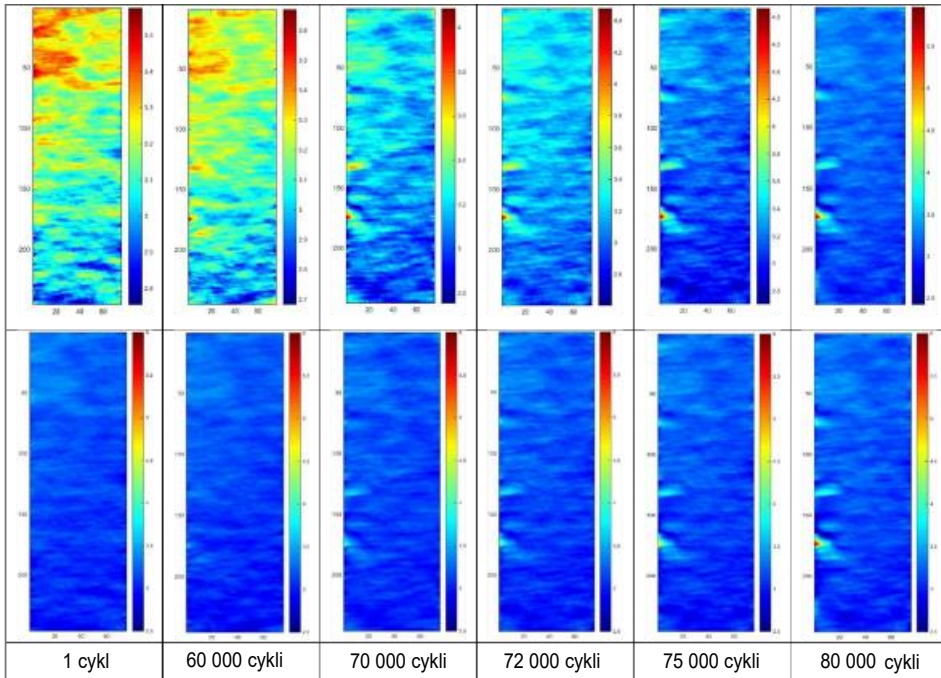
Na rysunku 6.21 przedstawiono wybrane mapy przemieszczenia próbki podanej zmiennemu naprężeniu o amplitudzie wynoszącej 600 MPa. Zapisane obrazy pokazują stan po 1 cyklu zmęczenia oraz po 20, 40 i 50 tysiącach cykli. Próbka uległa pęknięciu po uzyskaniu liczby cykli  $N_f = 54315$ . Od pierwszego cyklu widoczne są liczne obszary akumulacji odkształcenia, z których jedno rozwija się aż do utworzenia pęknięcia. Lokalne akumulacje wraz z rozwojem zmęczenia i powstaniem dominującego uszkodzenia częściowo zanikają i na obrazie po 50 000 cykli pozostał tylko jeden obszar akumulacji odkształcenia. Efekt ten jest wizualnie spotęgowany na ostatniej mapie przemieszczenia poprzez zmianę zakresu skali barw.



Rysunek 6.21. Obrazy map odkształcenia próbki ze stopu MAR 247 w wybranych cyklach obciążenia zmęczeniowego o amplitudzie 600 MPa.

Mapy uzyskane w testach zmęczeniowych kolejnej próbki przedstawiono dla wybranych chwil procesu na rysunku 6.22. W tym przypadku rejestracja rozkładów odkształcenia została zatrzymana po 80 000 cykli, po stwierdzeniu zainicjowania i rozwoju miejscowego odkształcenia. Próbka ta została poddana badaniom nieniszczącym oraz badaniom mikrostrukturalnym na przekrojach wzdłużnych. W celu lepszego zobrazowania lokalnego rozwoju odkształcenia wynikającego z pojawienia się koncentracji naprężenia dokonano przeskalowania wartości odkształcenia do wartości maksymalnych uzyskanych w miejscu rozwoju uszkodzenia.

Wyniki wskazują na bardzo wczesne oznaki lokalizacji odkształcenia w trzech miejscach. Po osiągnięciu 70 000 cykli na wszystkich mapach dała się zauważyć

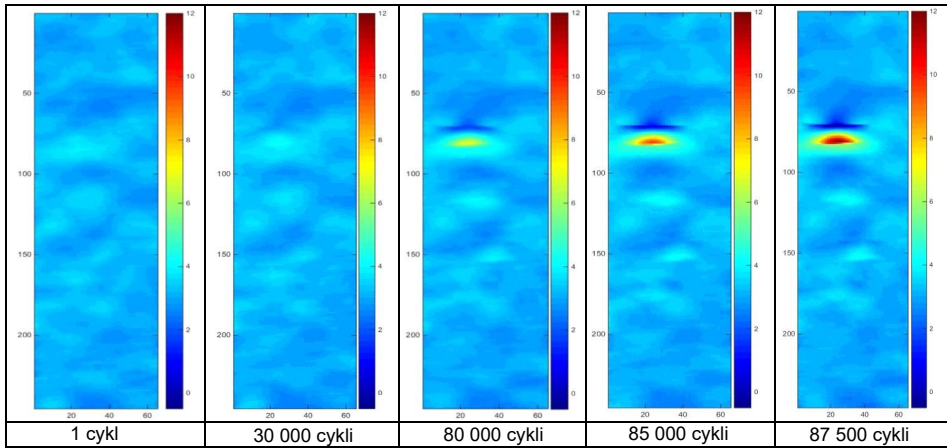


Rysunek 6.22. Obrazy map odkształcenia próbki ze stopu MAR 247 w wybranych cyklach obciążenia zmiennego o amplitudzie 600 MPa. W drugim wierszu wszystkie mapy przeskalowano do wartości odkształcenia uzyskanego przy 80 000 cykli.

obecność pęknięć, co zostało potwierdzone badaniami metodą prądów wirowych po zakończeniu testu. Pęknięcia te, jak wykazały badania mikrostrukturalne przekroju wzdłużnego, sięgały na głębokość 100–150  $\mu\text{m}$ . Efekt pojawienia się lokalnej akumulacji odkształcenia był zauważalny po 60 000 cykli, co widać także po przeskalowaniu wartości odkształcenia do wartości maksymalnych.

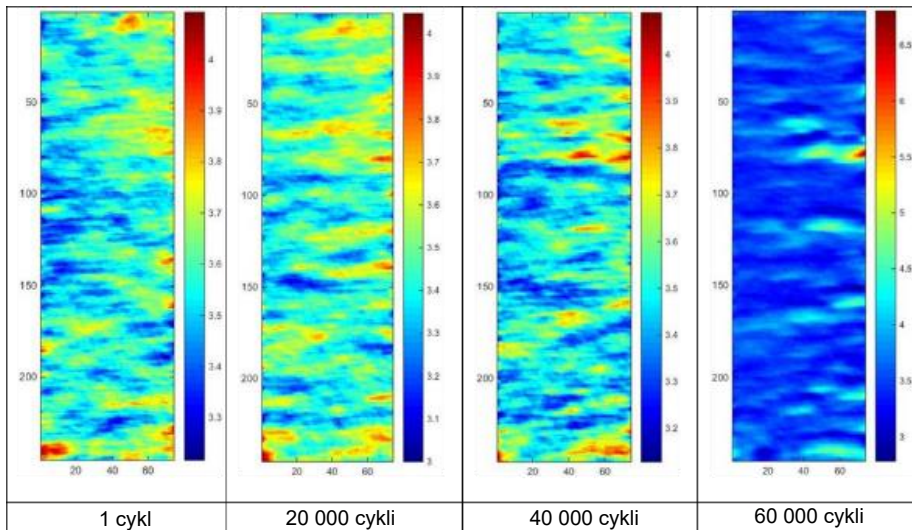
Kolejne wyniki uzyskane dla próbek poddanych zmęczeniu przy amplitudzie naprężenia 600 MPa są podobne i potwierdzają możliwość detekcji uszkodzenia materiału próbki z wykorzystaniem metody ESPI na etapie poprzedzającym inicjację pęknięcia. Na rysunku 6.23 przedstawiono wynik w postaci map odkształcenia po pierwszym cyklu oraz po 60, 80 i 85 tysiącach cykli. Ostatni zapis zarejestrowano dla 87 501 cyklu i w celu ujednolicenia obrazu kolejnych sekwencji przeskalowano zakres odkształcenia w pozostałych obrazach do wartości odkształcenia tej mapy.

Wyniki uzyskane dla największej amplitudy naprężenia zmiennego (650 MPa) są analogiczne jak w przypadku mniejszych wartości amplitudy. Na rysunku 6.24



Rysunek 6.23. Obrazy map odkształcenia (o ujednocionym zakresie odkształcenia) próbki ze stopu MAR 247 w wybranych cyklach obciążenia zmiennego o amplitudzie 600 MPa.

jest pokazany rozwój uszkodzenia, którego lokalizację można wskazać jako miejsce akumulacji odkształcenia już po 40 000, a nawet po 20 000 cyklach. Jednak na tym etapie procesu zmęczenia można zidentyfikować jeszcze kilka innych obszarów akumulacji i stąd trudno jest wskazać, które z nich będzie źródłem

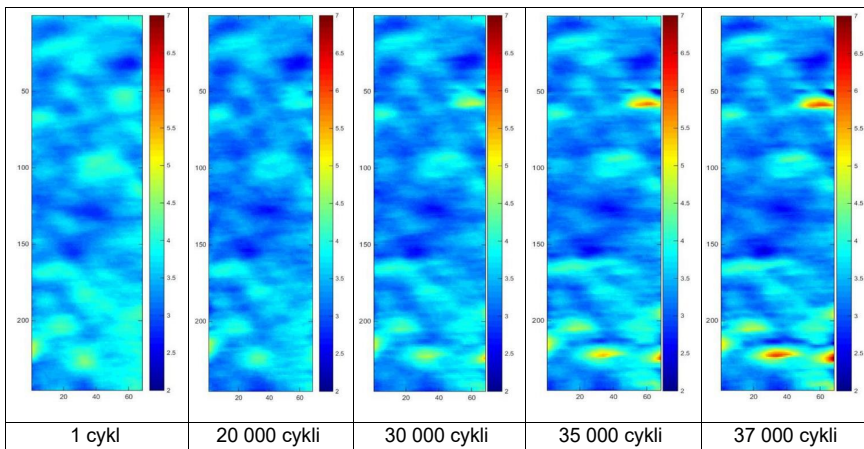


Rysunek 6.24. Obrazy map odkształcenia (o ujednocionym zakresie odkształcenia) próbki ze stopu MAR 247 w wybranych cyklach obciążenia zmiennego o amplitudzie 650 MPa.

powstania pęknięcia. Te wątpliwości można rozstrzygnąć przez monitorowanie zmian rozkładu przemieszczenia na powierzchni próbki lub na powierzchni detali poddanych diagnostyce pod kątem rozwoju procesów degradacji zmęczeniowej.

Próbka pękła po 61 968 cyklach, czyli na krótko po ostatnim zarejestrowanym rozkładzie odkształcenia. Stąd też dobrze widoczna jest akumulacja na ostatnim zarejestrowanym rozkładzie odkształcenia, której towarzyszy pojawienie się nieciągłości, co zostało potwierdzone defektoskopem prądowirowym.

Ostatni przykład zmian rozkładów odkształcenia przy amplitudzie 650 MPa pokazano na rysunku 6.25. Do pęknięcia doszło po 39 086 cyklach, a ostatnia zarejestrowana mapa dotyczy stanu po 37 tysiącach cykli. Obrazy tych map pokazano po przeskalowaniu do największych wartości odkształcenia.



Rysunek 6.25. Obrazy map odkształcenia (o ujednoczonym zakresie odkształcenia) próbki ze stopu MAR 247 w wybranych cyklach obciążenia zmiennego o amplitudzie 650 MPa.

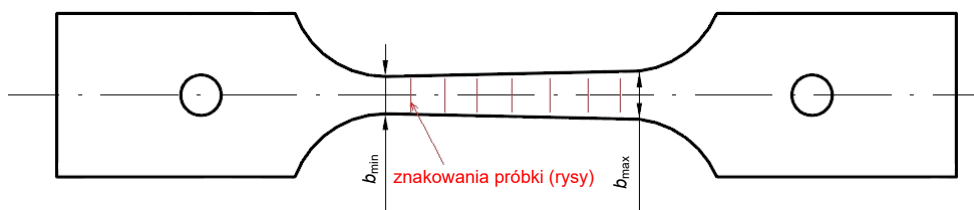
Metodyka analizy rozkładów połowych odkształcenia z zastosowaniem systemu ESPI umożliwia ocenę wpływu przyłożonego obciążenia na dynamikę i charakter rozwoju uszkodzenia na podstawie identyfikacji i pomiaru lokalnego odkształcenia. Jednocześnie możliwa jest ocena jednorodności rozkładu odkształcenia w badanym materiale w funkcji przyłożonego obciążenia oraz detekcja lokalnych korbów strukturalnych. Wykonane badania wskazują na możliwość wykorzystania opisanej techniki pomiarowej do lokalnego monitorowania powierzchni elementów pracujących w warunkach cyklicznych obciążeń zmiennych pod kątem detekcji uszkodzeń zdefiniowanych jako koncentracja odkształcenia. Ponadto, na podstawie oceny wartości maksymalnego odkształcenia umiejscowionego w obszarze inicjowania uszkodzenia można szacować trwałość zmęczeniową.

niową jako liczbę cykli do pojawienia się pęknięcia. W połączeniu z innymi metodami nieniszczącymi, jak na przykład metoda prądów wirowych, które umożliwiają identyfikację nieciągłości powierzchniowych i podpowierzchniowych, możliwe jest zwiększenie precyzji pomiaru i jednocześnie jego weryfikacja.

Wyniki badań z wykorzystaniem techniki ESPI oraz ich porównanie z innymi technikami nieniszczącymi przedstawiono w pracach [185, 187–189].

## 6.6 Ocena stopnia uszkodzenia stopu niklu INCONEL 718

Badania na próbkach ze stopu niklu Inconel 718 miały inny charakter, ponieważ realizowane były w warunkach obciążenia statycznego podczas próby rozciągania. Prowadzono je na próbkach o niestandardowej geometrii (zaprojektowanych przez zespół G. Sochy z Instytutu Lotnictwa), którą cechowało zmienne pole przekroju na całej długości części pomiarowej. Dzięki temu możliwe było uzyskanie różnych poziomów lokalnego odkształcenia plastycznego podczas testu jednej próbki o geometrii pokazanej na rysunku 6.26. Takie rozwiązanie miało na celu uzyskanie pola deformacji, której wartość zmienia się wzdłuż osi próbki. Znajomość wartości odkształcenia trwałego w danym przekroju próbki w połączeniu z analizą parametrów impedancji wzbudzonej metodą prądów wirowych pozwala prześledzić ewolucję uszkodzenia struktury materiału wywołanej jego trwałą deformacją.



Rysunek 6.26. Geometria próbki ze stopu Inconel 718 do oceny stopnia degradacji [105].

Zestaw próbek, po zdefiniowaniu obszarów badawczych i wyznaczeniu w nich wartości pól przekroju, został poddany próbom statycznego rozciągania. Następnie dokonano pomiarów odkształcenia trwałego w ustalonych przekrojach, w obu kierunkach prostopadłych do osi próbki. Z warunku nieściśliwości materiału obliczono wartość odkształcenia w kierunku osi próbki. Na podstawie uzyskanej wartości odkształcenia obliczono z użyciem modelu Johnsona wartości parametru uszkodzenia  $D$ , będącego ilorazem bieżącej wartości odkształcenia w kierunku osi próbki i wartości odkształcenia przy zerwaniu próbki. Parametr

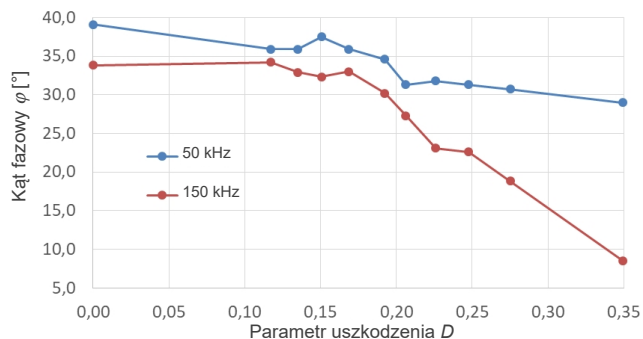
uszkodzenia, wyrażony miarą lokalnego odkształcenia, zmienia się w funkcji odległości od przełomu próbki. Pozwoliło to przeprowadzić ilościową ocenę stopnia degradacji w dowolnym miejscu próbki, a uzyskany wynik skorelowano z wynikami badań nieniszczących wykonanych z zastosowaniem metody prądów wirowych. Przeprowadzono punktowe pomiary kąta fazowego sygnału prądowirowego wzdłuż osi próbki przy użyciu defektoskopu NORTEC 600D.

Pomiary kąta fazowego  $\varphi$  na próbkach w stanie wyjściowym przeprowadzono w celu oceny jednorodności mierzonego parametru na całej powierzchni próbki. Badania zrealizowano przy częstotliwości prądu cewki 50 kHz oraz 150 kHz, co pozwoliło uzyskać penetrację prądów wirowych  $\delta$  wewnątrz badanego materiału odpowiednio na głębokość około 2,53 mm oraz 1,46 mm. Minimalna częstotliwość została tak dobrana, aby głębokość wnikania nie przekraczała grubości próbki w najmniejszym przekroju. Na podstawie pomiarów stwierdzono wpływ geometrii próbki (zmiennie pole powierzchni) na wartość kąta fazowego mierzonego na powierzchni czołowej. Jest to związane ze zróżnicowaniem obszaru objętego oddziaływaniem prądów wirowych wzdłuż osi próbki (zmienna szerokość próbki). W celu uniknięcia wpływu geometrii pomiary prowadzono na bokach części pomiarowej próbki, o jednakowej szerokości na całej długości części pomiarowej.

Kolejne badania dotyczyły złomów próbek po statycznej próbie rozciągania. Pomiar prowadzono od największego przekroju części pomiarowej aż do miejsca pęknięcia próbki w najmniejszym przekroju. Pomiaru dokonywano przez przyłożenie i oddalenie sondy od powierzchni, rejestrując charakterystykę impedancji od efektu oddalenia.

Zaobserwowano ogólną zależność pomiędzy wartościami kąta fazowego impedancji w stopie niklu a stanem jego deformacji i określonym na tej podstawie parametrem uszkodzenia. Wynik uzyskany dla obu częstotliwości pokazano na rysunku 6.27.

Przedstawiony wynik wskazuje na zależność mierzonego kąta fazowego impedancji od parametru uszkodzenia dla obu częstotliwości prądu wzbudzającego. Od wartości parametru uszkodzenia równej około 0,2 widać wzrost dynamiki zmian kąta fazowego uzyskanego dla częstotliwości 150 kHz. Ponieważ częstotliwość prądu wzbudzającego prądy wirowe wpływa na głębokość ich wnikania w materiał, można uznać, że mniejsza głębokość penetracji daje większy efekt zmian kąta w funkcji stopnia uszkodzenia. Dla częstotliwości 150 kHz wnikanie prądów ogranicza się do głębokości niespełna 1,5 mm, a dla 50 kHz jest większa niż 2,5 mm. W wynikach zmian rejestrowanych dla większej grubości materiału efekt wynikający z uszkodzenia jest rozmyty, ponieważ uszkodzenie jest skoncentrowane na powierzchni próbki. Można zatem uznać, że proces uszkodzenia



Rysunek 6.27. Przebiegi zmian wartości kąta fazowego  $\varphi$  w funkcji parametru uszkodzenia  $D$ .

materiału pod wpływem statycznego obciążenia jest inicjowany na powierzchni próbki i w tym też obszarze się rozwija. Szczegóły dotyczące metodyki prowadzonych badań oraz wyniki zostały przedstawione w pracach [116, 117].





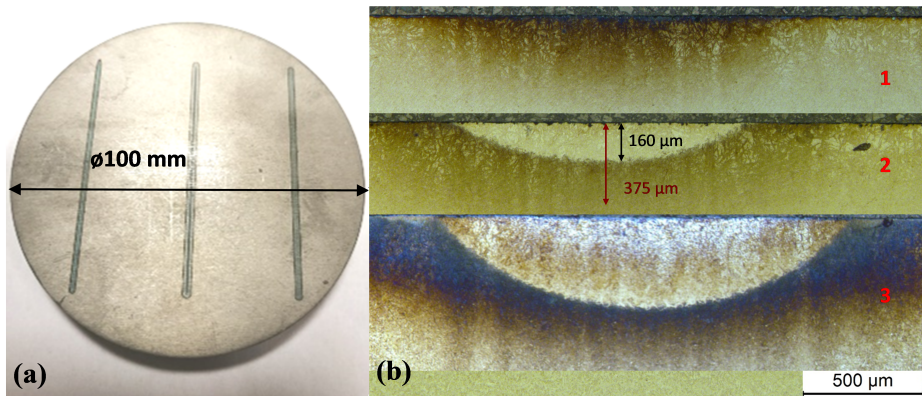
## Inne przykłady oceny uszkodzeń badanych metodą prądów wirowych

W rozdziale tym pokazano możliwości metody prądów wirowych w zakresie detekcji i opisu uszkodzeń związanych z warunkami pracy lub obróbki materiału. Zaprezentowano wyniki badań przypaleń szlifierskich stali stopowej, które wskazały na możliwość charakteryzacji tego typu wad metodą ET nie tylko w zakresie ich głębokości, ale i zmian twardości. Pokazano różnice w sygnale impedancji uzyskane na powierzchni stali austenitycznej po wodorowaniu, które umożliwiły wykrycie skutków degradacji wodorowej, a także ocenę jej głębokości. Ostatni przykład dotyczył wykorzystania prądów wirowych do nieniszczącej oceny stopnia zgniotu uzyskanego w procesie walcowania stali. W tym przypadku wyniki badań skorelowano z pomiarem gęstości dyslokacji próbek o różnym stopniu umocnienia odkształceniowego.

### 7.1 Identyfikacja i ocena przypaleń szlifierskich w stali AISI 9310

Metoda prądów wirowych może znaleźć zastosowanie w detekcji i opisie defektów niemających charakteru nieciągłości, ale lokalnych zmian właściwości, które mogą wynikać z technologii wytwarzania elementu, błędów w obróbce powierzchniowej lub miejscowego oddziaływania warunków eksploatacji. Jednym z takich defektów są przypalenia szlifierskie, czyli miejscowe przegrzania materiału powstałe w wyniku obróbki powierzchniowej elementów utwardzonych powierzchniowo. Powodują one zwiększenie dynamiki degradacji i mogą prowadzić do niekontrolowanego rozwoju uszkodzenia. Dlatego też podjęto badania w zakresie oceny możliwości identyfikacji i ilościowego opisu lokalnych zmian właściwości w materiale warstw hartowanych wywołanych przepaleniami szlifierskimi. W tym celu przygotowano na materiale wyjściowym AISI 9310 szereg defektów z zastosowaniem technik laserowych imitujących przypalenia szlifierskie. Kontrolując moc i prędkość wiązki laserowej oraz gęstość jej mocy, uzy-

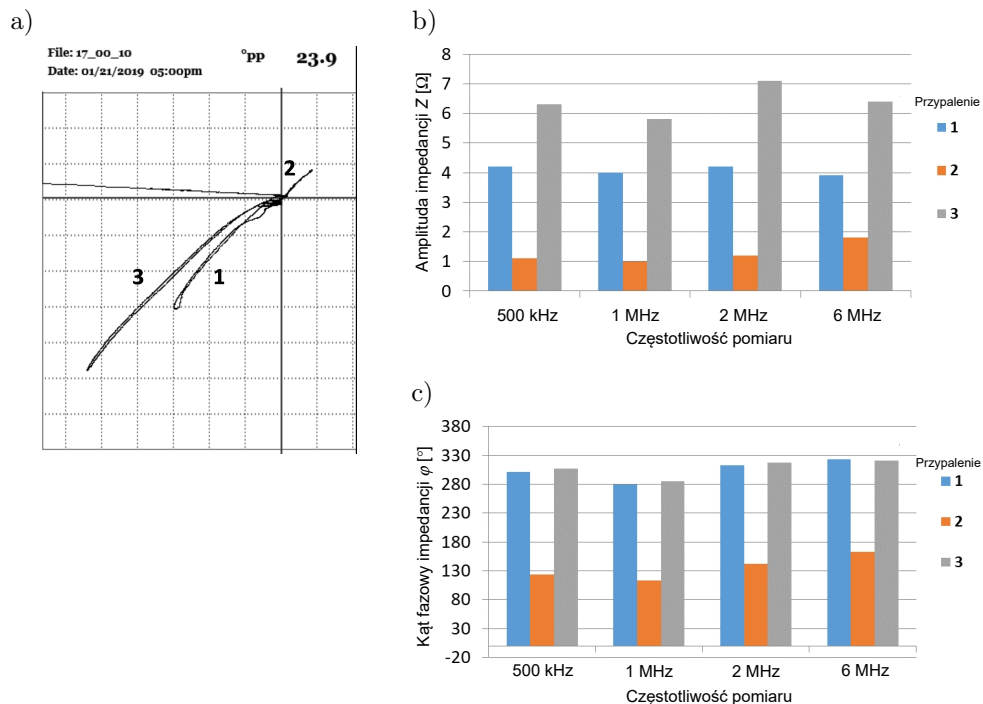
skano trzy różne symulacje wypalania kamieniem szlifierskim. Przypalenia te zostały scharakteryzowane pod względem zmian mikrostruktury oraz twardości na przekrojach poprzecznych. Na tej podstawie oceniono głębokość oddziaływania strefy ciepła od narzędzia szlifującego. Próbkę z trzema symulowanymi przypaleniami uzyskanymi dla różnych parametrów wiązki laserowej poddano badaniom metodą prądów wirowych pod kątem ilościowego opisu każdej z wad. Badanie to wykonano w trybie skanowania próbki sondą ołówkową. Na rysunku 7.1 przedstawiono zdjęcie próbki z trzema przypaleniami wykonanymi laserowo oraz zdjęcia przekroi poprzecznych tej próbki ujawniające mikrostrukturę przepaleń oraz strefy wpływu ciepła.



Rysunek 7.1. Zdjęcie próbki z liniowymi przypaleniami (a) oraz zdjęcia przekroi poprzecznych ujawniające głębokość i mikrostrukturę przepaleń oraz stref wpływu ciepła uzyskane na mikroskopie świetlnym (b).

Przed przygotowaniem próbek metalograficznych wykonano badanie dla czterech częstotliwości wzbudzenia prądów wirowych w celu uzyskania różnych głębokości ich wnikania w warstwę wierzchnią próbki. Dla każdego liniowego skanu rejestrowano parametry sygnałów w postaci amplitudy i kąta fazowego impedancji. Wyniki w postaci wskazań na ekranie defektoskopu uzyskanych dla częstotliwości 500 kHz oraz zmierzone parametry dla wszystkich użytych częstotliwości zestawiono na wykresach przedstawionych na rysunku 7.2.

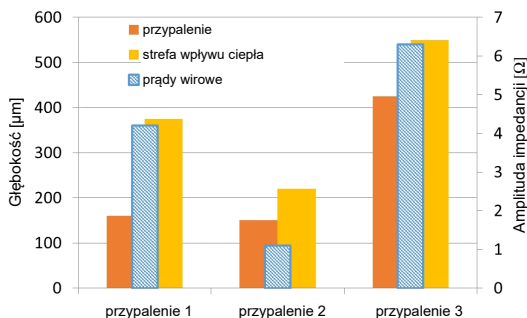
Na prezentowanych wykresach można zauważyć niewielkie różnice wartości obu parametrów w zależności od częstotliwości pomiarowej. Jest to prawdopodobnie spowodowane wysoką wartością przenikalności magnetycznej warstwy zahartowanej, która ogranicza wnikanie prądów wirowych do głębokości kilkuset mikrometrów w głąb materiału. W tym zakresie głębokości rejestrowane zmiany sygnału były niewielkie.



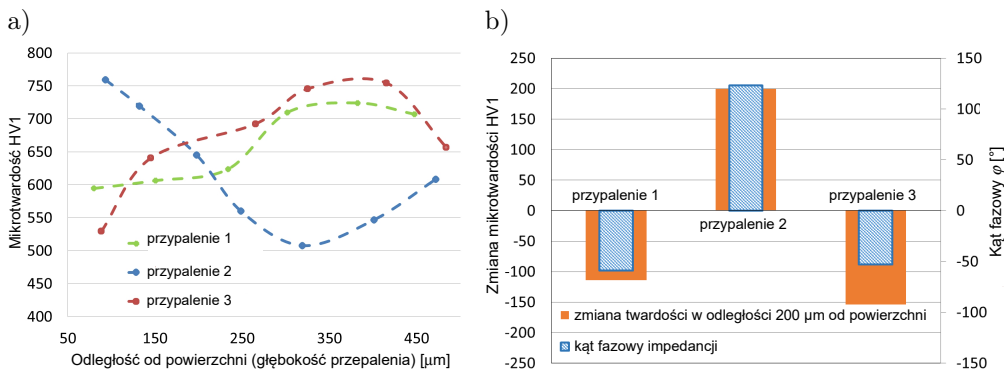
Rysunek 7.2. Widok ekranu z trzema wskazaniem od przypaleń (a) oraz wyniki pomiarów amplitudy impedancji (b) oraz kąta fazowego (c) dla czterech częstotliwości pomiarowych.

Na podstawie zdjęć przekrojów poprzecznych dokonano ilościowej oceny głębokości zarówno przypaleń, jak i stref wpływu ciepła, a także wykonano profile twardości wzdłuż osi każdego z przypaleń, pozwalające ocenić zmiany tego parametru w funkcji odległości od powierzchni. Badania mikrostruktury oraz profile mikrotwardości opracowano na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Wyniki tych pomiarów skorelowano z wartościami parametrów impedancji (kąt fazowy oraz amplituda) i przedstawiono na wykresach na rysunkach 7.3 i 7.4.

Przedstawione wyniki wskazują na korelację między wielkością przegrzania i impedancją, przy czym zależność dotyczy bardziej całego obszaru przegrzania, choć w przypadku przypalenia nr 2 granica między przegrzaniem a SWC jest trudna do ustalenia. Tym niemniej, na przykładzie trzech wariantów przypaleń wykazano słuszność założenia, że na podstawie nieniszczącej diagnostyki metodą ET możliwa jest nie tylko detekcja przypaleń szlifierskich, ale też ich jakościowa ocena. Ponadto, dysponując procedurą pomiarową oraz szeregiem pró-



Rysunek 7.3. Głębokość stref wpływu ciepła (SWC) oraz przepaleń w zestawieniu z wartością amplitudy impedancji uzyskaną za pomocą metody prądów wirowych.



Rysunek 7.4. Profile mikrotwardości na przekroju poprzecznym przypaleń wzdłuż ich osi (a) oraz zmiany mikrotwardości każdego z przypaleń na głębokości 200 μm (b).

bek referencyjnych z precyzyjnie opisanymi przypaleniami szlifierskimi, można także dokonać ilościowej oceny przypaleń. Chodzi tu nie tylko o ocenę głębokości przypalenia, ale także i zmiany twardości, które mu towarzyszą.

Na rysunku 7.4 pokazano wyniki pomiarów mikrotwardości w postaci profili w funkcji odległości od powierzchni próbki oraz zestawienie zmian mikrotwardości na odcinku 400 μm z wartościami kąta fazowego charakterystyki impedancyjnej każdego z przypaleń. Wartości kąta wykorzystane w tym zestawieniu uzyskano przy najniższej zastosowanej częstotliwości pomiarowej, 500 kHz, przy której uzyskano największą głębokość wnikania prądów wirowych. Dla wyznaczonych parametrów elektromagnetycznych warstwy hartowanej (przenikalność magnetyczna i przewodność elektryczna) głębokość ta wynosi około 170–200 μm. Dlatego też dokonano porównania zmian twardości na głębokości 200 μm z war-

tościami kąta fazowego impedancji, które charakteryzują właściwości struktury w tym samym obszarze.

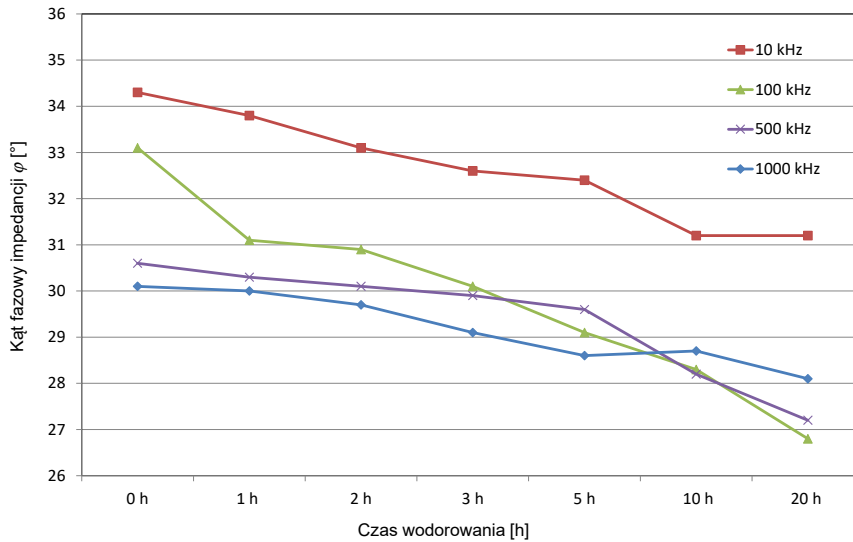
Wyniki badań pokazują, że zarówno wartości amplitudy, jak i kąta fazowego sygnału impedancji od różnego typu wad wskazują na możliwości identyfikacji przypaleń wraz z ich ilościowym opisem. Na podstawie wielkości amplitudy wskazania dla każdego z defektów możliwa jest ocena jego wielkości (głębokości). Natomiast różnice wielkości kąta fazowego sygnału mogą wskazywać na stopień przegrzania próbki w obszarze indukcji prądów wirowych. Jednak zmiany profili twardości wykonanych na przekrojach poprzecznych trudno odnieść do wyników uzyskanych za pomocą prądów wirowych z uwagi na brak możliwości oszacowania głębokości ich wnikania w ferromagnetyczny materiał badanych próbek. Jednak uzyskana zależność parametrów prądowirowych od cech wad materiałowych pozwala na założenie, że na podstawie opracowanej procedury pomiarowej i kalibracji sygnału na dobrze scharakteryzowanych próbkach referencyjnych możliwa jest analiza i charakterystyka wad strukturalnych wynikających z lokalnego przegrzania. Metodyka badań i wyniki zostały opisane w pracy [190].

## 7.2 Ocena degradacji wodorowej stali 316

Możliwości, jakie daje metoda prądów wirowych w identyfikacji i ocenie uszkodzeń eksploatacyjnych zostały zweryfikowane także w przypadku zmian powierzchniowych stali austenitycznej poddanej działaniu środowiska wodorowego. Przyjęto założenie, że degradacyjne oddziaływanie wodoru wpłynie na zmianę konduktywności stali w warstwie wierzchniej. Badaniom poddano próbki ze stali austenitycznej 316L w postaci krążków o grubości 5 mm i średnicy 20 mm, które po polerowaniu nasycano wodorem, stosując polaryzację katodową w celu wywołania przyspieszonej degradacji wodorowej. Do wodorowania używano 0,5M roztworu  $H_2SO_4$  z dodatkiem  $1\text{ mg/dm}^3$   $As_2O_3$  stanowiącego promotor wnikania wodoru. Czas wodorowania wynosił 3 i 20 h, a gęstość prądu katodowego była równa  $100\text{ mA/cm}^2$ . W rezultacie uzyskano próbki o różnych stadiach degradacji wodorowej.

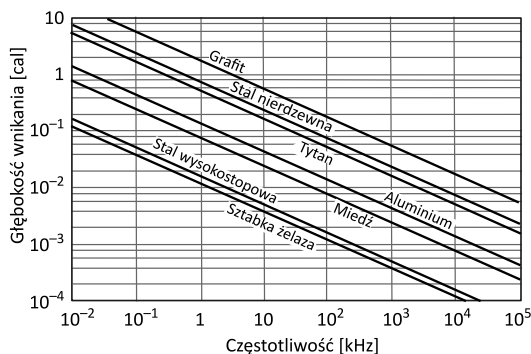
W celu rozpoznania zmian wywołanych oddziaływaniem wodoru wykonano obserwacje metalograficzne na zglądach przekroi poprzecznych, które wykazały powstawanie siatki mikropęknięć na powierzchni próbki tym intensywniej, im dłuższy był czas wodorowania. Dla próbek wodorowanych przez 3 godziny mikropęknięcia sięgały 2–3  $\mu\text{m}$  od powierzchni, natomiast w przypadku 20 godzinowego wodorowania stwierdzono zwiększoną liczbę mikropęknięć o nieznacznie

większej głębokości dochodzącej do około 4  $\mu\text{m}$ . Na powierzchni każdej próbki dokonano rejestracji charakterystyk impedancyjnych, wykorzystując efekt oddalenia przy pomiarze sondą stykową dla sygnału pomiarowego o częstotliwościach od 10 do 1000 kHz. Zestawienie wielkości kąta fazowego mierzonego przy trzech wartościach częstotliwości w zależności od czasu wodorowania przedstawiono na rysunku 7.5.



Rysunek 7.5. Zależność kąta fazowego od czasu wodorowania dla różnych wartości częstotliwości wzbudzenia.

Pojedyncze mikropęknięcia wywołane degradacją wodorową nie są wykrywalne metodą prądów wirowych, ale istnieje możliwość stwierdzenia obecności tych nieciągłości na podstawie zmian parametrów prądowiowych, takich jak kąt fazowy czy amplituda. Rozbieżności w uzyskanych wartościach parametrów impedancji wynikają bezpośrednio ze zmian przede wszystkim przewodności elektrycznej, a te z kolei są skutkiem zjawisk zachodzących w mikrostrukturze podczas wodorowania, związanych z powstawaniem licznych mikropęknięć i ich rozrostem. Dla całego zakresu częstotliwości pomiarowych zarejestrowano niemal liniową zależność kąta fazowego od czasu wodorowania, przy czym największe zmiany wartości tego parametru stwierdzono dla częstotliwości 100 kHz, dla której głębokość wnikania prądów wirowych w materiał sięgała około 1,4 mm. Głębokość wnikania prądów wirowych oszacowana została także dla pozostałych prób zgodnie z zależnością przedstawioną na rysunku 7.6, a jej wartości dla poszczególnych częstotliwości podano w tabeli 7.1.



Rysunek 7.6. Standardowe głębokości wnikania dla różnych metali i stopów w funkcji częstotliwości [191].

Tabela 7.1. Głębokość wnikania prądów wirowych w stal 316 dla czterech wartości częstotliwości.

Częstotliwość [kHz]	10	100	500	1000
Głębokość wnikania $\delta$ [mm]	4,35	1,38	0,62	0,44

Najmniejsze zmiany kąta fazowego w funkcji czasu wodorowania uzyskano dla częstotliwości 1 MHz, dla której głębokość wnikania sięga około 0,44 mm, oraz dla częstotliwości 10 kHz, dla której głębokość wnikania wynosiła około 4,35 mm. Wynika z tego, że największe zmiany w mikrostrukturze pod wpływem agresywnego oddziaływania wodoru zachodzą w obszarze przypowierzchniowym o głębokości około 2–3 mm. Zbyt mała głębokość wzbudzenia powoduje ograniczenie badanego obszaru, co utrudnia ujawnienie różnic wynikających z rozwoju degradacji wodorowej za pomocą prądów wirowych. Przy zastosowaniu częstotliwości, która umożliwia wzbudzenie prądów wirowych na większej głębokości, pojawia się ryzyko, że sygnał będzie pochodził z obszaru, do którego nie dotarł wódór, co także zatrze różnice w sygnale rejestrowanym od powierzchni przed i po wodorowaniu.

Dokonując kalibracji sygnału impedancji na zestawie próbek referencyjnych z danego materiału, po różnym czasie wodorowania można ocenić jakościowo skutki oddziaływania środowiska wodorowego na powierzchnię tego materiału. Natomiast wykorzystując algorytmy opracowane na podstawie krzywych kalibracyjnych, można także dokonać ilościowej oceny degradacji materiału oraz jej głębokości w warunkach oddziaływania wodoru. Takie dane mogą być pomocne nie tylko w ocenie stopnia degradacji i stanu konstrukcji, ale i w prognozowaniu jej dalszej, bezpiecznej eksploatacji.

Wykorzystując efekt oddalenia w badaniu próbek z żarowytrzymałej stali niskostopowej 15HM po wodorowaniu, stwierdzono także różnicę w przebiegu charakterystyk impedancyjnych przy różnych wartościach częstotliwości wzbudzenia. Badania przeprowadzono na dwóch próbkach po wodorowaniu oraz na próbce wyjściowej przy zastosowaniu trzech częstotliwości pomiarowych 5 kHz, 50 kHz oraz 2 MHz. W przypadku materiału ferromagnetycznego, jakim jest stal 15HM, trudniej jest oszacować głębokość wnikania, ponieważ poza zależnością od częstotliwości wzbudzenia oraz konduktywności, dochodzi wpływ przenikalności magnetycznej, której wysokie wartości znacząco ograniczają wnikanie prądów wirowych. Przy założeniu stałej wartości przenikalności stali w warunkach pomiaru oszacowano głębokość wnikania dla zastosowanych częstotliwości na około 10  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  oraz 150  $\mu\text{m}$ . Wyniki pomiarów wartości kąta fazowego zestawiono w tabeli 7.2, a trajektorie zmian impedancji przedstawiono na rysunku 7.7.

Tabela 7.2. Wartości kąta fazowego dla próbek przed i po wodorowaniu dla trzech wartości częstotliwości.

Częstotliwość pomiarowa/głębokość wnikania prądów wirowych	2 MHz/10 $\mu\text{m}$	50 kHz/50 $\mu\text{m}$	5 kHz/150 $\mu\text{m}$
Przed wodorowaniem	65,5°	66,0°	65,0°
Po wodorowaniu 10 h – p1	69,5°	68,0°	66,0°
Po wodorowaniu 10 h – p2	69,0°	67,5°	65,5°

Zmiany kąta fazowego próbek ze stali 15HM po wodorowaniu i przed wodorowaniem wynikają ze zmiany przewodności materiału wywołanej zmianami strukturalnymi. Zmiany te są wyraźne przy częstotliwości 2 MHz, czyli dla penetracji prądów wirowych na głębokość około 10  $\mu\text{m}$ , i zanikają przy częstotliwości 5 kHz, co odpowiada głębokości wnikania prądów wirowych na głębokość około 150–200  $\mu\text{m}$ . Na tej podstawie można stwierdzić, że proces wodorowania powoduje zmiany strukturalne w materiale próbki ze stali 15HM w warstwie o grubości nie większej niż 200  $\mu\text{m}$ .

Uzyskane wyniki badań w zakresie oceny degradacji wodorowej zostały podane analizie porównawczej z wynikami uzyskanymi z zastosowaniem innych technik nieniszczących co opisano w pracy [192].

### 7.3 Ocena stanu naprężenia stali S235 po walcowaniu

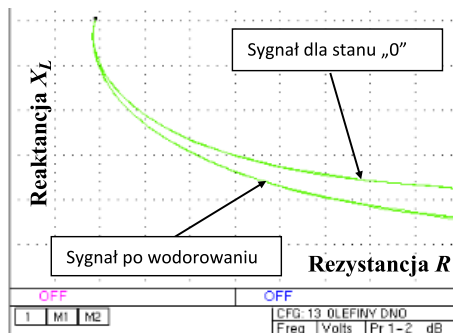
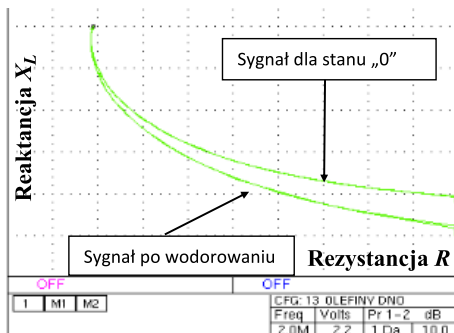
Możliwość efektu oddalenia wykorzystano także do oceny zmian parametrów impedancji dla stali 235 po procesie obróbki plastycznej. Zgniot wywołany



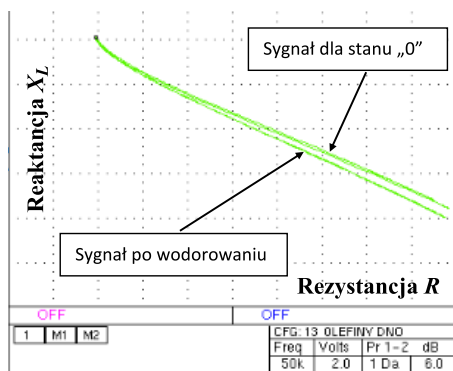
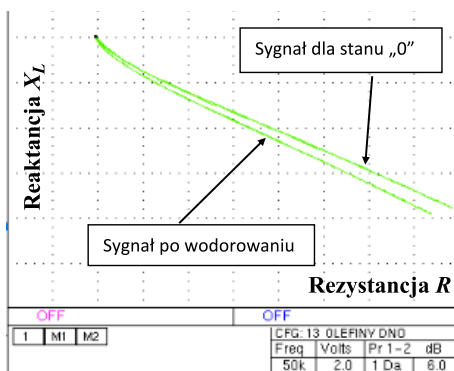
Próbka 1

Próbka 2

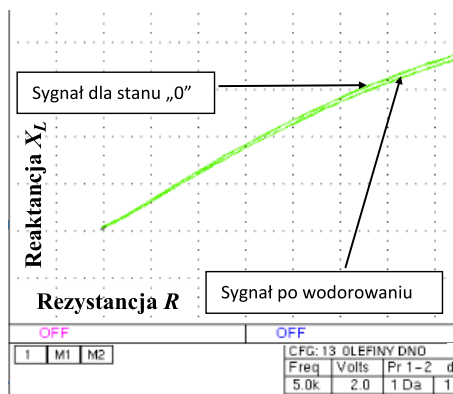
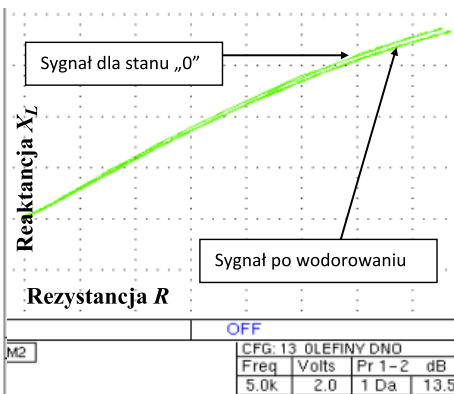
2 MHz – głębokość wnikańia – około 10  $\mu\text{m}$



50 kHz – głębokość wnikańia – około 50  $\mu\text{m}$



5 kHz – głębokość wnikańia – około 150  $\mu\text{m}$



Rysunek 7.7. Różnice wartości kąta fazowego impedancji pomiędzy materiałem w stanie wyjściowym i po wodorowaniu dla różnych częstotliwości pomiarowych.

walcowaniem na zimno powoduje nie tylko zmiany mikrostruktury oraz stanu naprężenia resztkowego, ale także zmiany konduktywności oraz, w przypadku ferromagnetyków, przenikalności magnetycznej. Na próbkach ze stali S235 o różnym zgnioście uzyskanym w procesie walcowania na zimno przeprowadzono badania mikrostruktury, a następnie badania z wykorzystaniem metody prądów wirowych. Obserwacjom poddano mikrostrukturę w stanie wyjściowym próbek z blachy o grubości 12 mm oraz próbek po procesie walcowania blachy na grubość 8 i 6 mm. Do obserwacji mikrostruktury wykorzystano mikroskopię świetlną oraz elektronową mikroskopię transmisyjną (TEM), dzięki czemu oszacowano gęstość dyslokacji w materiale próbek przed i po procesie walcowania. Oceny tej dokonano przez naniesienie 5 linii prostych o różnej, przypadkowej orientacji kątowej, a następnie zliczono przecięcia z dyslokacjami. Analizie poddano zdjęcia wykonane przy powiększeniach 50 000 oraz 100 000 razy. Gęstość dyslokacji oszacowano na podstawie zależności:

$$\rho = N/L_r T, \quad (7.1)$$

gdzie  $N$  to liczba punktów przecięcia dyslokacji z linią prostą,  $L_r$  to całkowita długość wszystkich naniesionych linii w odpowiedniej skali, a  $T$  – grubość folii przyjęta dla pocieniania elektrolitycznego,  $T = 200$  nm.

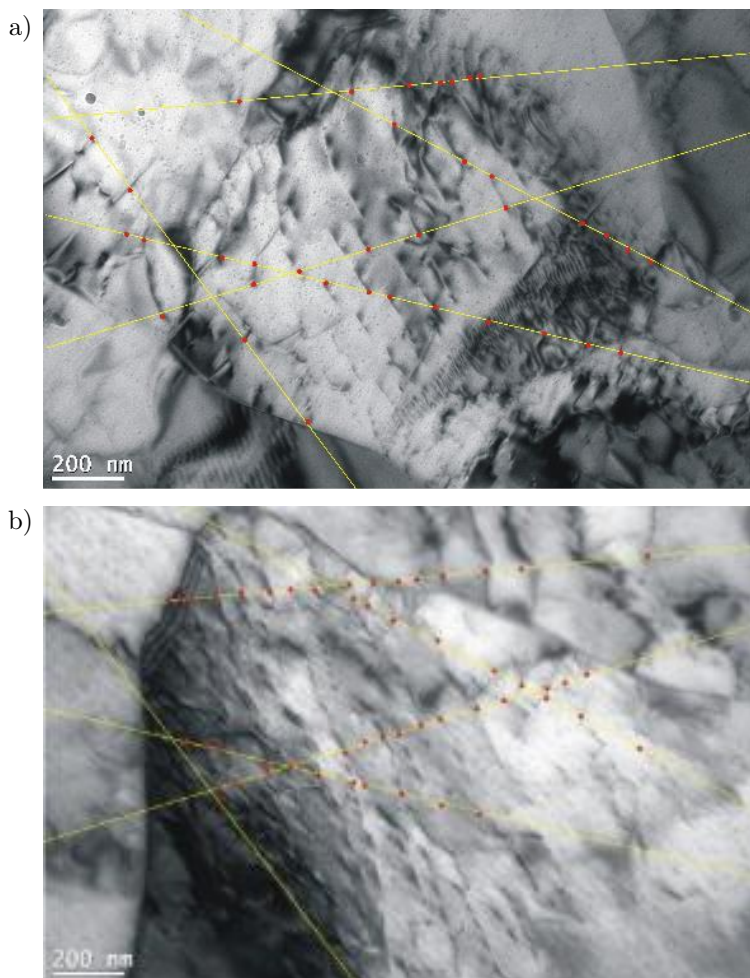
Na rysunku 7.8 przedstawiono przykładowe zdjęcia struktur dyslokacyjnych z naniesioną siatką linii oraz punktami przecięć z dyslokacjami dla stali S235 w stanie po walcowaniu na grubość 8 mm (rys. 7.8a) oraz 6 mm (rys. 7.8b).

Dla każdego stanu wykonano od 5 do 10 zdjęć struktur dyslokacyjnych oraz pomiary gęstości dyslokacji. Wartości średnie gęstości dyslokacji dla stanu wyjściowego (próbka S) oraz po walcowaniu na grubości 8 mm (próbka S1) i 6 mm (próbka S2) są podane w tabeli 7.3.

Tabela 7.3. Wartości uśrednione gęstości dyslokacji w próbkach ze stali S235 o różnym zgnioście, oszacowane na podstawie mikroskopii TEM.

Próbka	Gęstość dyslokacji
S (stan dostawy, grubość <b>12 mm</b> )	$5,5 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-2}$
S1 (walcowanie na <b>8 mm</b> )	$9,14 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-2}$
S2 (walcowanie na <b>6 mm</b> )	$11 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-2}$

Przeprowadzone badania wskazują niemal dwukrotny wzrost gęstości dyslokacji po obróbce mechanicznej walcowania blachy z grubości 12 mm na 8 mm oraz nieznaczny przyrost gęstości po kolejnym walcowaniu na grubość 6 mm. Wzrost gęstości dyslokacji w wyniku obróbki plastycznej wiąże się z procesem



Rysunek 7.8. Obraz mikrostruktury próbki stali S235 z widocznymi dyslokacjami oraz siatką linii do szacowania ich gęstości po walcowaniu na grubość: a) 8 mm, b) 6 mm.

umocnienia odkształceniowego, któremu towarzyszą zmiany właściwości mechanicznych, a także niektórych właściwości fizycznych, na przykład przewodności elektrycznej. Zmiana gęstości dyslokacji wpływa także na zmianę stanu naprężenia resztkowego skumulowanego w materiale podanego obróbce plastycznej.

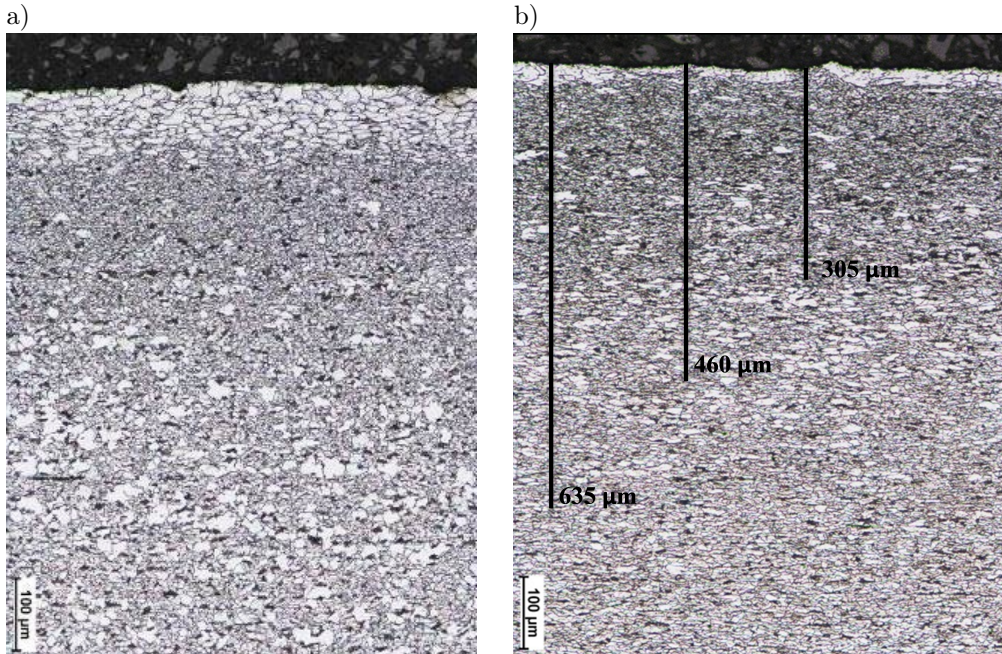
Przeprowadzone badania z wykorzystaniem indukcji prądów wirowych miały na celu weryfikację tych założeń oraz ewentualną ocenę zależności między stopniem zgniotu a parametrem impedancji. Wykonano testy techniką „lift off”, przykładając jednocewkową sondę absolutną do powierzchni próbek wyciętych

z blach o różnym stopniu zgniotu i rejestrując zmiany charakterystyk impedancyjnych. W badaniach zastosowano trzy wartości częstotliwości, dzięki czemu uzyskano wnikanie prądów wirowych na trzy różne głębokości, których wartość oszacowano przy założeniu stałej przenikalności magnetycznej badanej stali. Wartości zastosowanych częstotliwości oraz odpowiadające im głębokości penetracji wzbudzanych prądów wirowych podano w tabeli 7.4.

Tabela 7.4. Wartości częstotliwości wzbudzenia prądów wirowych oraz odpowiadające im głębokości ich wnikania w stal S235.

Częstotliwość pomiarowa	Szacunkowa głębokość wnikania [ $\mu\text{m}$ ]
100 kHz	635
750 kHz	457
1,5 MHz	304

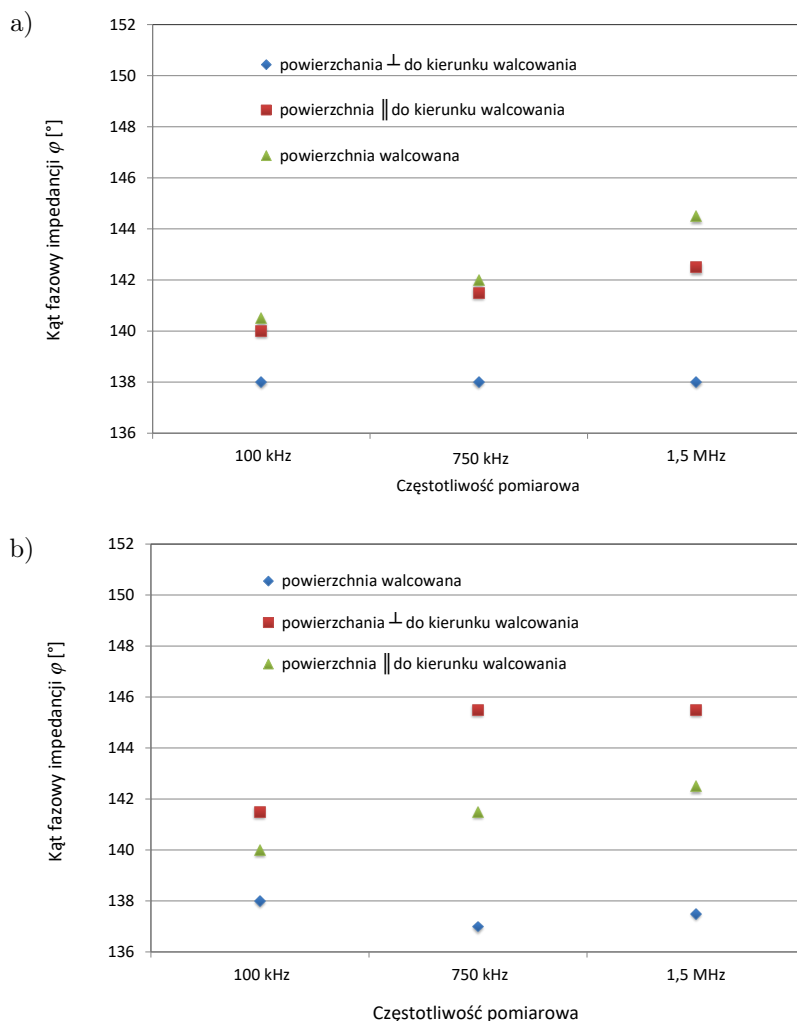
Rysunek 7.9 przedstawia zdjęcia mikrostruktury przekroji wzdłużnych próbek S1 oraz S2 wyciętych z blach po walcowaniu. Obok tekstury widoczne jest także rozdrobnienie ziaren w strefie przypowierzchniowej. Na zdjęciu po prawej nanie-



Rysunek 7.9. Mikrostruktura przekroji wzdłużnych próbek ze stali S325 po walcowaniu na grubość 8 mm (a) oraz 6 mm (b) z oznaczeniem zasięgu wnikania prądów wirowych indukowanych od strony powierzchni walcowanej.

siono markery oznaczające zasięg prądów wirowych wzbudzanych przy trzech wartościach częstotliwości po przyłożeniu sondy do powierzchni walcowanej.

Pomiary kąta fazowego impedancji wykonano także od strony przekroju poprzecznego w jego środkowej części, w pewnej odległości od krawędzi powierzchni walcowanej, oraz od strony przekroju wzdłużnego, równoległego do kierunku walcowania. Wyniki wszystkich pomiarów zaprezentowano na rysunku 7.10 dla obu grubości blach.



Rysunek 7.10. Zmiany wartości kąta fazowego w zależności od miejsca pomiaru oraz częstotliwości sygnału pomiarowego dla próbki S1 walcowanej na grubość 8 mm (a) oraz próbki S2 walcowanej na grubość 6 mm (b).

Wyniki wykazują wpływ zgniotu, wyrażonego grubością walcowanej blachy, na wartości kąta fazowego, gdzie w zależności od miejsca pomiaru wartości tego parametru dla blachy 6 mm są większe od  $2^\circ$  do  $4^\circ$  w stosunku do blachy o grubości 8 mm. Największe różnice osiągnięto dla wysokich częstotliwości wzbudzenia prądów wirowych, co odpowiada małej głębokości ich wnikania. Jest to uzasadnione faktem, że efekt zgniotu w postaci orientacji ziaren i ich rozdrobnienia oraz zwiększenia poziomu naprężenia resztkowego jest skumulowany na powierzchni blachy, zwłaszcza po stronie walcowanej.

Jak widać na zdjęciach przekroju wzdłużnego blachy walcowanej o grubości 6 mm (rysunek 7.9b), prądy wzbudzone polem o najwyższej częstotliwości obejmują jedynie strefę o silnej teksturze (orientacji struktury), podczas gdy najmniejsza częstotliwość (100 kHz) pozwala dotrzeć w znacznej części do obszarów, gdzie ziarna są bardziej równoosiowe, a poziom naprężenia resztkowego – niższy. Wpływ poziomu naprężenia na wartość kąta fazowego potwierdziła także korelacja z wynikami szacowania gęstości dyslokacji, która rośnie wraz ze zgniotem, podobnie jak parametry prądowirowe. Dzięki tej zależności oraz opracowanym zestawom wzorcowym można identyfikować wadliwie obrobione obszary o anomalnych wartościach parametru prądowirowego, a także oceniać w sposób jakościowy stopień zgniotu materiału po obróbce plastycznej na zimno bez konieczności pobierania próbek.

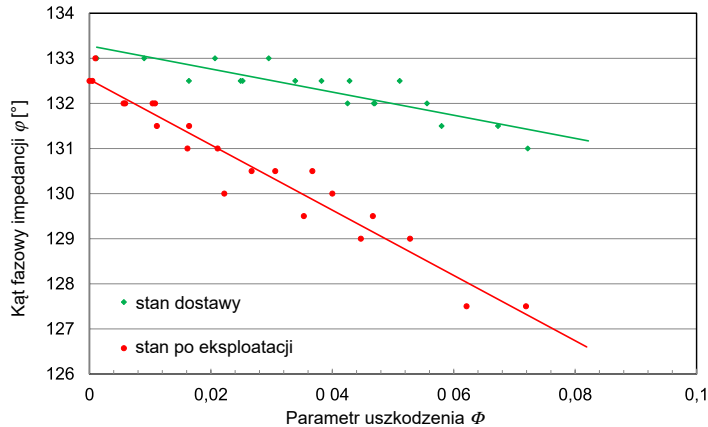
Wyniki uzyskane z wykorzystaniem techniki prądów wirowych zostały skorelowane także z innymi wynikami badań materiałowych, co opisano w publikacji [176].

# Podsumowanie

## 8.1 Wnioski końcowe

Wyniki przeprowadzonych badań pokazują szereg możliwości zastosowań metody prądów wirowych w diagnostyce elementów instalacji i konstrukcji pracujących w warunkach dynamicznych obciążeń mechanicznych, a także w ocenie jakości elementów po obróbce mechanicznej i cieplnej, ale przede wszystkim w detekcji obszarów degradacji związanych z lokalną zmianą właściwości poprzedzającą pojawienie się nieciągłości. Najistotniejszym aspektem jest w tej dziedzinie metoda nieniszczącej oceny stopnia uszkodzenia generowanego cyklicznym obciążeniem zmiennym z wykorzystaniem metody prądów wirowych opracowana przez autora. Metoda ta umożliwia nieniszcząca identyfikację obszarów koncentracji naprężenia, które stanowią miejsca tworzenia mikropeknięć i/lub uruchomienia mechanizmów lokalnego odkształcenia plastycznego oraz ich dalszego rozwoju, aż do utarty spójności. Dzięki dedykowanym dla konkretnych konstrukcji programom diagnostycznym, opartym na wspomnianej procedurze istnieje możliwość oceny stanu materiału eksploatowanego w warunkach zmęczenia oraz monitorowania rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego na etapie jego stabilnego wzrostu, poprzedzającego dynamiczną i niekontrolowaną propagację pęknięcia dominującego. Ocena taka dokonywana jest przez korelację wartości parametrów prądów wirowych wzbudzanych w badanym materiale (kąta fazowego impedancji) z wartościami parametrów uszkodzenia wyznaczonymi na podstawie rozwoju składowych odkształcenia (odkształcenie średnie i amplituda odkształcenia) w kolejnych cyklach obciążenia zmęczeniowego. Dysponując wynikami testów zmęczeniowych przeprowadzonych w szerokim zakresie amplitudy, można wyznaczyć wartości odkształceniowego parametru uszkodzenia  $\Phi$ , opisującego stan degradacji materiału w warunkach zmęczenia. Jednocześnie, podczas każdego testu zmęczeniowego rejestrowana jest wartość kąta fazowego impedancji po ustalonej (innej dla każdej amplitudy naprężenia) liczbie cykli. Zestawienie tych wyników w postaci wykresu zbiorczego, który wykonano przy-

kładowo dla stali 1.4903 i pokazano na rysunku 8.1, daje możliwość aproksymacji liniowej, stanowiącej linię kalibracyjną do oszacowania stopnia uszkodzenia na podstawie zmierzonej wartości kąta fazowego.



Rysunek 8.1. Zależność kąta fazowego impedancji  $\varphi$  od odkształceniowego parametru uszkodzenia  $\Phi$  aproksymowana linią prostą dla dwóch stanów stali 1.4903.

Uzyskane w ten sposób wytyczne dają możliwość oszacowania stopnia uszkodzenia w niemal dowolnym obszarze instalacji lub konstrukcji wykonanej z tego typu stali związanego z lokalnym rozwojem mechanizmów odkształcenia plastycznego. Punktem odniesienia jest tu wartość kąta fazowego krzywej impedancyjnej uzyskana dla próbki, w której osiągnięto makroskopowe odkształcenie plastyczne, czyli poziom odkształcenia zgodny z zadaniem naprężenia przekraczającego wartość granicy plastyczności dla danego materiału. Metoda ta wymaga przeprowadzenia szeregu testów zmęczeniowych, ale w konsekwencji umożliwia nieniszczącą ocenę stanu materiału konstrukcji, o ile wykazuje on przewodnictwo elektryczne. Ocena taka ma charakter bardzo lokalny, dlatego konieczna jest uprzednia analiza stanu naprężenia konstrukcji i wytypowania punktów największego wyężenia, gdzie spodziewana jest koncentracja skutków cyklicznego obciążenia zmęczeniowego. Analiza wartości parametrów impedancji w tych właśnie miejscach daje obraz rzeczywistego stanu uszkodzenia konstrukcji. Dla każdego konduktywnego materiału konstrukcyjnego można wyznaczyć krytyczną wartość kąta fazowego impedancji, wskazującą na poziom uszkodzenia powyżej ustalonych kryteriów akceptacji. Kryteria te powinny być wyznaczone w porozumieniu ze służbami utrzymania ruchu z wykorzystaniem danych materiałowych oraz danych z monitoringu pracy danej konstrukcji. Skuteczność tej



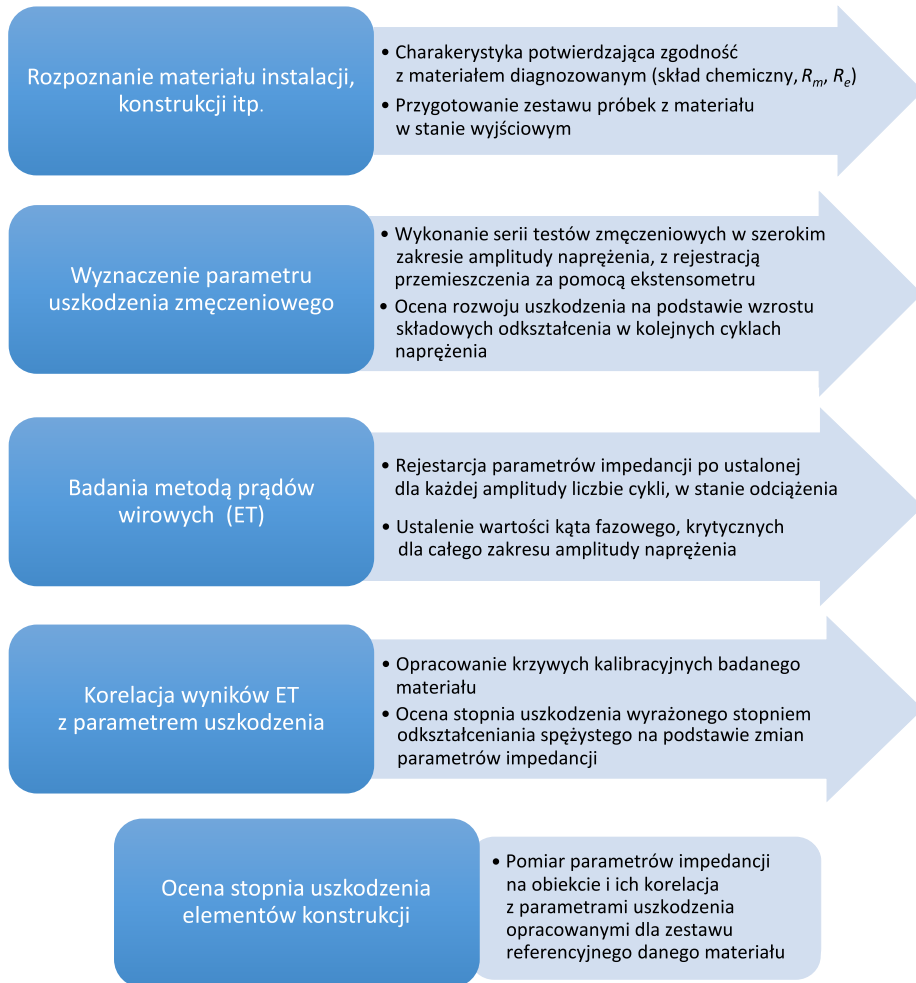
metody została potwierdzona na stali żarowytrzymałej oraz na stopie niklu, co pokazuje potencjał w ocenie materiałów zarówno ferro-, jak i nieferromagnetycznych.

## 8.2 Oryginalne elementy pracy

Zaproponowana procedura diagnozowania stanu materiału, wykorzystująca korelację między stanem wyeksploatowania materiału wyrażonego pojawieniem się lokalnych odkształceń plastycznych a wartościami parametrów indukowanych w materiale prądów wirowych, stanowi oryginalne osiągnięcie. Metoda ta wpisuje się we współczesne trendy oceny żywotności konstrukcji przemysłowych, które z reguły bazują na probabilistycznych metodach szacowania bezpieczeństwa konstrukcji, a rzadziej na algorytmach uwzględniających dane eksperymentalne testów wytrzymałościowych i wyniki badań diagnostycznych. Opracowanie tego typu metody wymagało nie tylko przeprowadzenia licznych testów wytrzymałościowych, ale też przygotowania procedur pomiarowo-badawczych oraz wykonania szeregu próbek referencyjnych wraz z systemem wzorcowania i kalibracji niezbędnych do identyfikacji i analizy subtelných zmian sygnału prądowirowego wywołanych obciążeniami zmęczeniowymi, związanymi z lokalną koncentracją naprężenia, odkształceniami (w zakresie sprężystym) i innymi czynnikami wpływającymi na właściwości elektromagnetyczne materiału.

Kolejność działań niezbędnych do opracowania kompletnej procedury oceny stopnia uszkodzenia z zastosowaniem nieniszczącej metody prądów wirowych przedstawia schemat na rysunku 8.2. Procedura ta została opracowana na podstawie badań zmęczeniowych i nieniszczących stali 1.4903 oraz zweryfikowana dla stopu niklu MAR 247. Ponadto dokonano walidacji oceny stopnia uszkodzenia zmęczeniowego metodą prądów wirowych za pomocą optycznych metod pomiarowych.

Należy pamiętać o ograniczeniach proponowanej metody, wynikających z faktu, że wykazane zależności między mierzonymi parametrami uzyskanymi w wyniku indukcji prądów wirowych a stopniem uszkodzenia wyrażonego poziomem odkształcenia, mają zastosowanie tylko w pewnym jego zakresie. Wpływ na przebieg tych relacji ma także rodzaj materiału, a co za tym idzie, mechanizm rozwoju procesu uszkodzenia, a także warunki prowadzenia testu, geometria próbki oraz oddziaływanie zewnętrznych czynników jak temperatura czy środowisko korozyjne. Inny charakter opisanych zależności obserwowano dla stopów para- i diamagnetycznych, inny w przypadku ferromagnetyków, gdzie identyfikowane korelacje mierzonych parametrów z rozwojem uszkodzenia dotyczyły



Rysunek 8.2. Schemat działań obejmujących metodę oceny stopnia uszkodzenia dla metalicznego materiału konstrukcyjnego przy użyciu metody prądów wirowych.

głównie zmian przenikalności magnetycznej, z pominięciem wpływu przewodności elektrycznej, oparte były na innych założeniach.

Wyniki przeprowadzonych badań i pomiarów dla różnego typu materiałów pokazują potencjał metody prądów wirowych w diagnozowaniu uszkodzenia zmęczeniowego we wczesnym etapie jego rozwoju. Komercjalizacja opracowanej metodyki wymusza konieczność wykonania serii prób zmęczeniowych dla badanego materiału w celu zdefiniowania mechanizmów rozwoju uszkodzenia

wraz z oceną możliwością opisanego go przez parametry odkształceniowe. Każdy z badanych materiałów wymaga zdefiniowania mierzalnego wskaźnika opisującego rozwój degradacji z uwzględnieniem ograniczeń jego stosowalności wraz ze zmianą charakteru odkształcenia czy mechanizmu rozwoju uszkodzenia. W kolejnych krokach konieczne jest wygenerowanie serii próbek referencyjnych o różnym stopniu uszkodzenia, w których jednocześnie zminimalizowane zostaną różnice wynikające na przykład z techniki ich obróbki/przygotowania.

Zaproponowana metoda oceny stopnia uszkodzenia oparta na korelacji wyników pomiaru lokalnego odkształcenia z wynikami pomiarów parametru prądowego umożliwi skuteczną analizę ilościową rozwoju uszkodzenia, a także wskazanie efektu kumulacji uszkodzenia związanego z lokalizacją odkształcenia. Ponadto, naskórkowość metody prądów wirowych potwierdza powierzchniowy charakter rozwoju uszkodzenia w warunkach mechanicznych obciążeń statycznych. W przypadku przygotowania zestawu próbek odniesienia z określonego materiału o zdefiniowanym stopniu uszkodzenia możliwe jest opracowanie procedury nieniszczącej oceny stopnia uszkodzenia dedykowanej dla konkretnych elementów konstrukcji i instalacji przemysłowych. Pozwoliłaby ona na monitorowanie rozwoju degradacji w warunkach pracy. W tym przypadku konieczne byłoby także określenie kryteriów odbiorczych.

Opracowane procedury pomiarowo-badawcze mogą stanowić podstawę do badań diagnostycznych o charakterze komercyjnym. Wymagają jednak wykonania dedykowanych zestawów próbek wzorcowych. Przygotowanie takiego zestawu wiąże się z wykonaniem szeregu badań zmęczeniowych symulujących warunki eksploatacji lub zapewnieniem dostępu do wycinków instalacji po różnych czasach pracy. Konieczne byłoby także wykonanie charakterystyk wytrzymałościowych, aby ocenić, na ile określenie stanu naprężenia i generowanego nim stanu odkształcenia gwarantuje możliwość szacowania stopnia degradacji właściwości użytkowych związanych z przenoszeniem obciążeń.

Wyniki uzyskanych badań skorelowano także z pomiarami parametrów ultradźwiękowych i magnetycznych [193]. Dzięki zastosowaniu najnowszych osiągnięć elektroniki i dużych mocy obliczeniowych urządzeń wykorzystywanych w wielu metodach badań nieniszczących obok wykrywania makro uszkodzeń pojawiły się możliwości detekcji defektów w mikroskali, a co więcej, także obszarów ich inicjowania.

Ponieważ charakter prądów wirowych wzbudzanych w materiale zależy także od zmian zachodzących po wpływie temperatury, należy także rozważyć wykorzystanie tej metody do oceny stopnia degradacji materiałów instalacji i konstrukcji pracujących w warunkach obciążeń mechanicznych i cieplnych. Przemaszają za tym wyniki oceny przypałów szlifierskich, które wykazały, że metoda

prądów wirowych umożliwia identyfikację nie tylko lokalnych nieciągłości, lecz także i lokalnych zmian składu i właściwości (np. twardości) wynikających z lokalnego oddziaływania temperatury. Jest także możliwy opis tych przypałów w zakresie oszacowania głębokości strefy wpływu ciepła oraz zmian twardości, które wprowadza na przykład narzędzie skrawające. Jak w każdym zastosowaniu niezbędne jest przygotowanie zestawu próbek referencyjnych o określonej głębokości defektu i profilu mikrotwardości. Charakteryzacja tych próbek za pomocą parametrów impedancji, czyli kąta fazowego i amplitudy sygnału, uzyskanych w trybie skanowania obrabianej powierzchni, umożliwia opracowanie krytycznych kalibracyjnych, które stanowią podstawę do oceny tego typu wad.

### 8.3 Kierunki dalszych badań

W dalszej perspektywie możliwe jest opracowanie kryteriów akceptacji (lub eliminacji) diagnozowanych elementów na podstawie wyników badania o charakterze nieniszczącym, co znacząco obniży straty produkcyjne wynikające z wymogów kontroli jakości.

Interakcja pola magnetycznego wzbudzanego w materiale ze zmianami właściwości i mikrostruktury, które w nim zachodzą pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych, daje ogromne możliwości wykorzystania w ocenie ich stanu. Problemem jest poznanie tych zależności i ich opisanie, najlepiej w sposób ilościowy, z uwzględnieniem wpływu poszczególnych zjawisk na rejestrowane parametry prądowe. W opisanych badaniach przedstawiono kilka przykładów użycia metod nieniszczących wykorzystujących zjawisko indukcji prądów wirowych do identyfikacji różnego typu uszkodzeń eksploatacyjnych i ich oceny pod kątem możliwości rekomendacji do dalszej, bezpiecznej pracy. Badania te będą rozwijane zarówno w kierunku doskonalenia opracowanych procedur, jak i szukania nowych zastosowań w diagnostyce stanu materiałów.

# Bibliografia

1. The Boeing Company, *Strain Gage Studies*, D-4411, 1959.
2. Hatting D.R., The-S/N-fatigue-life gage: a direct means of measuring cumulative fatigue damage, *Experimental Mechanics*, **6**: 19A–24A, 1966.
3. Charsley P., Robins B.A., Electrical resistance changes of cyclically deformed copper-nickel alloys, *Materials Science and Engineering*, **17**(1): 117–123, 1975, doi: 10.1016/0025-5416(75)90035-X.
4. Szökefalvi-Nagy A., Electrical resistivity of cyclically deformed tungsten, *Scripta Metallurgica*, **11**(4): 335–337, 1977, doi: 10.1016/0036-9748(77)90213-7.
5. Joshi N.R., Green R.E., Ultrasonic detection of fatigue damage, *Engineering Fracture Mechanics*, **4**(3): 577–583, 1972, doi: 10.1016/0013-7944(72)90067-7.
6. Carson J., Rose J.L., *An ultrasonic nondestructive test procedure for the early detection of fatigue damage and the prediction of remaining life*, undefined, 1978.
7. Clough R.B., Chang J.C., Travis J.P., Acoustic emission signatures and source microstructure using indentation fatigue and stress corrosion cracking in aluminum alloys, *Scripta Metallurgica*, **15**(4): 417–422, 1981, doi: 10.1016/0036-9748(81)90222-2.
8. Tittmann B.R., Cohen-Ténoudji F., De Billy M., Jungman A., Quentin G., A simple approach to estimate the size of small surface cracks with the use of acoustic surface waves, *Applied Physics Letters*, **33**(1): 6–8, 1978, doi: 10.1063/1.90148.
9. Karjalainen L.P., Moilanen M., Detection of plastic deformation during fatigue of mild steel by the measurement of Barkhausen noise, *NDT International*, **12**(2): 51–55, 1979, doi: 10.1016/0308-9126(79)90015-4.

10. Duke J.C., Green R.E., Simultaneous monitoring of acoustic emission and ultrasonic attenuation during fatigue of 7075 aluminium, *International Journal of Fatigue*, **1**(3): 125–132, 1979, doi: 10.1016/0142-1123(79)90002-1.
11. Namkung M., Utrata D., Nondestructive residual stress measurements in railroad wheels using the low-field magnetoacoustic test method, [in:] Thompson D.O., Chimenti D.E. (Eds) *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, pp. 1429–1438, Springer, Boston, MA., 1988, doi: 10.1007/978-1-4613-0979-6\_66.
12. Yamasaki T., Ebata K., Fukuoka H., Nondestructive stress measurement using frequency dependence of magnetoacoustic interaction, [in:] Green R.E., Kozaczek K.J., Ruud C.O. (Eds) *Nondestructive Characterization of Materials VI*, pp. 405–412, Springer, Boston, MA, 1994, doi: 10.1007/978-1-4615-2574-5\_52.
13. Hauk V., Structural and residual stress analysis by nondestructive methods, Elsevier, 1997, doi: 10.1016/B978-0-444-82476-9.X5000-2.
14. Park Y.K., Waber J.T., Snead C.L., Positron annihilation method for determining dislocation densities in deformed single crystals of iron, *Materials Letters*, **3**(5–6): 181–186, 1985, doi: 10.1016/0167-577X(85)90051-5.
15. Bilgutay N., Onaral B., Nicoletti D., *Nondestructive Evaluation of Grain Size Distributions Using Multifractal Analysis of Backscattered Ultrasonic Signals*, Report for Defense Technical Information Center, 1992.
16. Speckmann H., Henrich R., Structural Health Monitoring (SHM) – overview on technologies under development enhanced reader, *Proceedings of the World Conference on NDT*, Montreal 2004.
17. Dziendzikowski M., Niedbala P., Kurnyta A., Kowalczyk K., Dragan K., Structural health monitoring of a composite panel based on PZT sensors and a transfer impedance framework, *Sensors*, **18**(5): 1521, 2018, doi: 10.3390/s18051521.
18. Dong S., Yuan M., Wang Q., Liang Z., A modified empirical wavelet transform for acoustic emission signal decomposition in structural health monitoring, *Sensors*, **18**(5): 1645, 2018, doi: 10.3390/s18051645.
19. Moonens M. *et al.*, On the influence of capillary-based structural health monitoring on fatigue crack initiation and propagation in straight lugs, *Materials (Basel)*, **12**(18): 2965, 2019, doi: 10.3390/ma12182965.

20. Bremer K. *et al.*, Fibre optic sensors for the structural health monitoring of building structures, *Procedia Technology*, **26**: 524–529, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.065.
21. Tareen N., Kim J., Kim W.K., Park S., Fuzzy logic-based and nondestructive concrete strength evaluation using modified carbon nanotubes as a hybrid PZT–CNT sensor, *Materials (Basel)*, **14**(11): 2953, 2021, doi: 10.3390/ma14112953.
22. Li Y., Min K., Zhang Y., Wen L., Prediction of the failure point settlement in rockfill dams based on spatial-temporal data and multiple-monitoring-point models, *Engineering Structures*, **243**: 112658, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112658.
23. Farrar C.R., Lieven N.A.J., Damage prognosis: The future of structural health monitoring, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **365**(1851): 623–632, 2007, doi: 10.1098/rsta.2006.1927.
24. Courtois X. *et al.*, Full coverage infrared thermography diagnostic for WEST machine protection, *Fusion Engineering and Design*, **146**: 2015–2020, 2019, doi: 10.1016/j.fusengdes.2019.03.090.
25. Raheman F.J., Rojoa D.M., Patel N.G., Performance of infrared thermography and thermal stress test in perforator mapping and flap monitoring: A meta-analysis of diagnostic accuracy, *Journal of Plastic, Reconstructive and Aesthetic Surgery*, **74**(9): 2013–2025, 2021, doi: 10.1016/j.bjps.2021.03.088.
26. Arun Kumar R., Sunil Kumar R., Sreejyothi S., Raj V., Swapna M.S., Sankararaman S., Development of prototype of electronic speckle interferometry based spirometer, *Optics and Lasers in Engineering*, **136**: 106318, 2021, doi: 10.1016/j.optlaseng.2020.106318.
27. Mujeeb A., Nayar V.U., Ravindran V.R., Electronic Speckle Pattern Interferometry techniques for non-destructive evaluation: A review, *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, **48**(5): 275–281, 2006, doi: 10.1784/insi.2006.48.5.275.
28. Spagnolo G.S., Ambrosini D., Paoletti D., An NDT electro-optic system for mosaics investigations, *Journal of Cultural Heritage*, **4**(4): 369–376, 2003, doi: 10.1016/j.culher.2003.06.001.
29. Lima R.A.A., Perrone R., Carboni M., Bernasconi A., Experimental analysis of mode I crack propagation in adhesively bonded joints by opti-

- cal backscatter reflectometry and comparison with digital image correlation, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **116**: 103117, 2021, doi: 10.1016/j.tafmec.2021.103117.
30. Hallo G., Lacombe C., Néauport J., Hild F., Detection and tracking of laser damage sites on fused silica components by digital image correlation, *Optics and Lasers in Engineering*, **146**: 106674, 2021, doi: 10.1016/j.optlaseng.2021.106674.
31. Zalameda J.N., Burke E.R., Parker F.R., Seebo J.P., Wright C.W., Bly J.B., Thermography inspection for early detection of composite damage in structures during fatigue loading, [in:] *Proceedings of SPIE: Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIV*, vol. 8354, p. 835403, 2012, doi: 10.1117/12.918126.
32. Fedala Y., Streza M., Sepulveda F., Roger J.P., Tessier G., Boué C., Infrared lock-in thermography crack localization on metallic surfaces for industrial diagnosis, *Journal of Nondestructive Evaluation*, **33**(3): 335–341, 2014, doi: 10.1007/s10921-013-0218-4.
33. Du W., Liu H., Sirikham A., Addepalli S., Zhao Y., A miniaturised active thermography system for in-situ inspections, *IFAC-PapersOnLine*, **53**(3): 66–71, 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2020.11.011.
34. Yarovoi L.K., Robur L.Y., Gnatovsky A.V., Udalov E.P., Holographic equipment for testing the construction of the nuclear power plant, *Proceedings of 4 Regional Meeting Nuclear Energy in Central Europe*, 1997.
35. Zimdars D. *et al.*, Technology and applications of terahertz imaging non-destructive examination: Inspection of space shuttle sprayed on foam insulation, *AIP Conference Proceedings*, **760**(1): 570–577, 2005, doi: 10.1063/1.1916726.
36. Kostin V.N., Filatenkov D.Y., Chekasina Y.A., Vasilenko O.N., Serbin E.D., Features of excitation and detection of magnetoacoustic emission in ferromagnetic objects, *Acoustical Physics*, **63**(2): 237–244, 2017, doi: 10.1134/S1063771017010055.
37. Peng J., Tian G.Y., Wang L., Zhang Y., Li K., Gao X., Investigation into eddy current pulsed thermography for rolling contact fatigue detection and characterization, *NDT&E International*, **74**: 72–80, 2015, doi: 10.1016/j.ndteint.2015.05.006.



38. Armour A.M., Eddy current and electrical methods of crack detection, *Journal of Scientific Instruments*, **25**(6): 209–210, 1948, doi: 10.1088/0950-7671/25/6/318.
39. Wu J., Zhou D., Wang J., Surface crack detection for carbon fiber reinforced plastic materials using pulsed eddy current based on rectangular differential probe, *Journal of Sensors*, **2014**: Article ID 727269, 2014, doi: 10.1155/2014/727269.
40. Grimberg R., Savin A., Steigmann R., Bruma A., Eddy current examination of carbon fibres in carbon-epoxy composites and Kevlar, *International Journal of Materials and Product Technology*, **27**(3–4): 221–228, 2006, doi: 10.1504/IJMPT.2006.011272.
41. **Kukła D.**, Szwed M., Roskosz M., Ocena grubości warstw chromowych na stali i staliwie z wykorzystaniem metody prądów wirowych, *Przegląd Spawalnictwa*, **89**(11): 9–14, 2017, doi: 10.26628/PS.V89I11.826.
42. Lewińska-Romicka A., *Pomiary grubości powłok*, Warszawa, Biuro Gamma mgr Bogusław Osuchowski, 2001.
43. **Kukła D.**, Grzywna P., Kopeć M., Kowalewski Z.L., Eddy current method for thickness assessment of carburized layers, *AMT 2016, XXI Physical Metallurgy and Materials Science Conference – Advanced Materials and Technologies*, 2016-06-05/06-08, Rawa Mazowiecka, pp. BP7-1–3, 2016.
44. **Kukła D.**, Grzywna P., Kopeć M., Kowalewski Z.L., Assessment of hardened layer thickness for 40HNMA steel using eddy current method, *Inżynieria Materiałowa*, **213**(5): 263–266, 2016, doi: 10.15199/28.2016.5.10.
45. **Kukła D.**, Wyszkowski M., Hardness assessment of induction hardened layers based on the analysis of eddy current signal, *Inżynieria Powierzchni*, **24**(4): 3–9, 2020, doi: 10.5604/01.3001.0013.9724.
46. Tube Probs, Olympus IMS, <https://www.olympus-ims.com/pl/tube-inspection-probes/> (dostęp 29.03.2022).
47. **Kukła D.**, Zagórski A., Sarniak Ł., Quantitative evaluation of eddy current signals generated by defects in austenitic heat exchanger tubes, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, **63**(4): 59–65, 2019, doi: 10.17729/ebis.2019.4/6.
48. Bakunov A.S., Muzhitskii V.F., Shubochkin C.E., VE-26NP eddy-current structuroscope, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, **39**(11): 866–870, 2003, doi: 10.1023/B:RUNT.0000023757.34685.13.

49. Skrbek B., Nosek V., *Combined non-destructive structuroscopy of dispersion metallic materials* (dostęp 18.10.2021).
50. Dybiec C., Włodarczyk S., Zastosowanie metody prądów wirowych do pomiaru naprężeń normalnych w połączeniach spawanych, *Inżynieria Powierzchni*, Nr 3: 45–51, 2001.
51. Dybiec C., Włodarczyk S., Dybiec M., Measurement of own stress using the eddy current method, *7th European Conference on Non-destructive Testing, NDT.net*, **3**(12), 1998, <https://www.ndt.net/article/ecndt98/et/404/404.htm>.
52. Dybiec C., Janowski S., Włodarczyk S., Włodarczyk W., Walidacja wyników pomiarów naprężeń metodą prądów wirowych, *Inżynieria Powierzchni*, **3**: 19–22, 2003.
53. Piekarski R., *Zastosowanie metody prądów wirowych do pomiaru naprężeń własnych wywołanych wybranymi obróbkami powierzchniowymi*, Rozprawa doktorska, 2003.
54. Zergoug M., Kamel G., Boucherou N., Mechanical stress analysis by eddy current method, [in:] *Proceedings of ECNDT 2006*, <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/session68.htm>.
55. Mekhlouf S., Zergoug M., Benkedda Y., Residual stress analysis in the titanium by eddy current method, *NDT in Progress, 5th International Workshop of NDT Experts, 12–14 Oct 2009, Prague, e-Journal of Nondestructive Testing*, **15**(4), <https://www.ndt.net/?id=8622>.
56. Zeng Z. *et al.*, Eddy current testing of residual stress state in aluminum alloy, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **70**: 6007208, 2021, doi: 10.1109/TIM.2021.3076561.
57. Broom T., Lattice defects and the electrical resistivity of metals, *Advances in Physics*, **3**(9): 26–83, 1954, doi: 10.1080/00018735400101163.
58. Martin J.W., The electrical resistivity due to structural defects, *Philosophical Magazine*, **24**(189): 555–566, 1971, doi: 10.1080/14786437108217029.
59. Basinski Z.S., Saimoto S., Resistivity of deformed crystals, *Canadian Journal of Physics*, **45**(2): 1161–1176, 1967, doi: 10.1139/p67-085.
60. Schwerer F.C., Silcox J., Electrical resistivity due to dislocations in nickel at low temperatures, *Philosophical Magazine*, **26**(5): 1105–1119, 1972, doi: 10.1080/14786437208227367.

61. Rajic N., Tsoi K., *Methods of Early Fatigue Detection*, Report for Defense Technical Information Center, 1997.
62. Constable J.H., Sahay C., Electrical resistance as an indicator of fatigue, *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, **15**(6): 1138–1145, 1992, doi: 10.1109/33.206940.
63. Tomáš I., Kovářik O., Vértesy G., Kadlecová J., Nondestructive indication of fatigue damage and residual lifetime in ferromagnetic construction materials, *Measurement Science and Technology*, **25**(6): 065601, 2014, doi: 10.1088/0957-0233/25/6/065601.
64. Gilanyi A., Morishita K., Sukegawa T., Uesaka M., Miya K., Magnetic nondestructive evaluation of fatigue damage of ferromagnetic steels for nuclear fusion energy systems, *Fusion Engineering and Design*, **42**(1–4): 485–491, 1998, doi: 10.1016/S0920-3796(98)00180-X.
65. Kim C., Nondestructive evaluation by reversible magnetic permeability of the residual life of ferritic 9Cr steel subjected to creep-fatigue damage, *Materials Transactions*, **59**(2): 316–319, 2018, doi: 10.2320/mater-trans.M2017290.
66. Bong C.J., Ryu K.S., Nahm S.H., Kyu Kim E., Nondestructive evaluation for remanent life of modified 9Cr1Mo steel by reversible magnetic permeability, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **323**(5): 379–382, 2011, doi: 10.1016/j.jmmm.2010.10.015.
67. Bhat I.K., Muju M.K., Mazumdar P.K., Possible effects of magnetic fields in fatigue, *International Journal of Fatigue*, **15**(3): 193–197, 1993, doi: 10.1016/0142-1123(93)90176-Q.
68. Żurek Z., Baron D., Measurement of changes of magnetic permeability and electrical conductivity values in generator rotor retaining rings, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, Nr 66, 2012.
69. Savrai R.A., Makarov A.V., Gorkunov E.S., Kogan L.Kh., Eddy-current testing of the fatigue degradation of a surface-hardened medium-carbon structural steel, *12th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2018), Gothenburg, 2018, June 11–15 (ECNDT 2018), e-Journal of Nondestructive Testing*, **23**(8), 2018, <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=22692>.

70. Gorkunov E.S., Savrai R.A., Makarov A.V., Zadvorkin S.M., Kogan L.K., The application of magnetic, electromagnetic-acoustic and eddy-current methods to the assessment of plastic deformation under cyclic loading of annealed medium-carbon steel, *17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 25–28 Oct 2008 (WCNDT 2008)*, *e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT)*, **13**(11): 25–28, 2008, <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=6567>.
71. Starke P., Walther F., Eifler D., PHYBAL-A new method for lifetime prediction based on strain, temperature and electrical measurements, *International Journal of Fatigue*, **28**(9): 1028–1036, 2006, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2005.07.050.
72. Żurek Z.H., **Kukła D.**, Jasiński T., Wykorzystanie mostka RLC do oceny postępu pełzania wysokotemperaturowego stali P91, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, **113**(1): 215–219, 2017.
73. Żurek Z.H., Witoś M., Mostki i przetworniki pomiarowe LCR w wykrywaniu degradacji zmęczeniowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, **91**(10): 126–133, 2015, doi: 10.15199/48.2015.10.26.
74. Żurek Z. H., **Kukła D.**, Kurzydłowski K.J., Wybrane metody wykrywania degradacji zmęczeniowej w stalach ferromagnetycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, **88**(7a): 218–222, 2012.
75. Żurek Z.H., Witoś M., Diagnostics of degradative changes in paramagnetic alloys with the use of low frequency impedance spectroscopy, *7th International Symposium on NDT in Aerospace*, 16–18 Nov. 2015, Bremen, Germany.
76. Mao H. *et al.*, Fatigue damage detection and location of metal materials by electrical impedance tomography, *Results in Physics*, **15**: 102664, 2019, doi: 10.1016/j.rinp.2019.102664.
77. Chady T., Inspection of clad materials using massive multi-frequency excitation and spectrogram eddy current method, *19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016)*, 13–17 June 2016 in Munich, Germany (WCNDT 2016), *e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT)*, **21**(7), 2016, <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=19722>.
78. Lo C.C.H., Tang F., Biner S.B., Jiles D.C., Effects of fatigue-induced changes in microstructure and stress on domain structure and magnetic properties of Fe–C alloys, *Journal of Applied Physics*, **87**(9): 6520–6522, 2000, doi: 10.1063/1.372757.

79. Liu Y., Lan X., Hu B., Evaluation of fatigue damage in 304 stainless steel by measuring residual magnetic field, [in:] G.Y. Tian, B. Gao (Eds), *Electromagnetic Non-Destructive Evaluation (XXIII)*, IOS Press, pp. 173–178, 2020, doi: 10.3233/SAEM200029.
80. Sakai K., Kiwa T., Tsukada K., Fatigue detection of steel plate using magnetic flux leakage method, *19th World Conference on Non-Destructive Testing*, 2016.
81. Shen G., Shen Y., Study on the characteristics of magneto acoustic emission for mild steel fatigue: MAE for steel fatigue, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **378**(2182): 20190586, 2020, doi: 10.1098/rsta.2019.0586.
82. Roskosz M., Witoś M., Żurek Z.H., Fryczowski K., Porównanie możliwości diagnostycznych metod magnetycznej pamięci metalu, szumu Barkhausena i niskoczęstotliwościowej impedancji, *Przegląd Spawalnictwa*, **88**(10): 57–62, 2016, doi: 10.26628/wtr.v88i10.687.
83. Sikora R., Chady T., Nondestructive testing by electromagnetic methods, *Przegląd Elektrotechniczny*, **92**(9): 3–9, 2016, doi: 10.15199/48.2016.09.01.
84. Chady T., Schabowicz K., Nieniszczące badania płyt włóknisto-cementowych z wykorzystaniem terahercowej spektroskopii w dziedzinie czasu, *Badania Nieniszczące i Diagnostyka*, **2016**(1–2): 62–66, 2016.
85. Jonuscheit J., Beigang R., Ellrich F., Klier J., Matheis C., Molter D., Theuer M., Terahertz imaging for non-destructive testing, [in:] *2nd International Symposium on NDT in Aerospace*, 2010.
86. Tian G.Y., Yin A., Gao B., Zhang J., Shaw B., Eddy current pulsed thermography for fatigue evaluation of gear, *AIP Conference Proceedings*, **1581**(33): 1652–1662, 2014, doi: 10.1063/1.4865022.
87. Hwang S., An Y.K., Kim J.M., Sohn H., Monitoring and instantaneous evaluation of fatigue crack using integrated passive and active laser thermography, *Optics and Lasers in Engineering*, **119**: 9–17, 2019, doi: 10.1016/j.optlaseng.2019.02.001.
88. Tiitto K., Use of Barkhausen noise in fatigue, [in:] Thompson D.O., Chimenti D.E. (Eds), *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Vol. 9, pp. 1845–1853, 1990, doi: 10.1007/978-1-4684-5772-8\_237.

89. Soultan M., Kleber X., Chicois J., Vincent A., Mechanical Barkhausen noise during fatigue of iron, *NDT&E International*, **39**(6): 493–498, 2006, doi: 10.1016/J.NDTEINT.2006.03.003.
90. Sagar S.P., Parida N., Das S., Dobmann G., Bhattacharya D.K., Magnetic Barkhausen emission to evaluate fatigue damage in a low carbon structural steel, *International Journal of Fatigue*, **27**(3): 317–322, 2005, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2004.06.015.
91. Obata M., Ito Y., Furuya Y., Iijima K., Fukui Y., Nondestructive evaluation of embrittlement of 3Ni-Cr-Mo-V rotor steel by the magnetic Barkhausen noise method, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series A*, **56**(527): 1677–1684, 1990, doi: 10.1299/kikaia.56.1677.
92. Tomita Y., Hashimoto K., Osawa N., Nondestructive estimation of fatigue damage for steel by Barkhausen noise analysis, *NDT&E International*, **29**(5 Spec. Iss.): 275–280, 1996, doi: 10.1016/s0963-8695(96)00030-8.
93. Piotrowski L., Augustyniak B., Chmielewski M., Stan rozwoju metody diagnozowania materiałów z wykorzystaniem efektu emisji magnetoakustycznej, *Przegląd Spawalnictwa*, **84**(13): 24–30, 2012.
94. O’Sullivan D., Cotterell M., Cassidy S., Tanner D.A., Mészáros I., Magneto-acoustic emission for the characterisation of ferritic stainless steel microstructural state, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **271**(2–3): 381–389, 2004, doi: 10.1016/j.jmmm.2003.10.004.
95. Augustyniak B., Piotrowski L., Chmielewski M., Kowalewski Z., Comparative study with magnetic techniques of P91 and 13HMF steels properties subjected to fatigue tests, *Journal of Electrical Engineering*, **63**: 15–18, 2012.
96. Dubov A.A., A study of metal properties using the method of magnetic memory, *Metal Science and Heat Treatment*, **39**(9): 401–405, 1997, doi: 10.1007/BF02469065.
97. Dybała J., Nadulicz K., Zastosowanie metody magnetycznej pamięci metalu w diagnostyce obiektów technicznych, *Problemy Techniki Uzbrojenia*, **44**(133): 63–80, 2015.
98. Dubov A.A., *Diagnosing Boiler Pipes with the Use of Magnetic Memory of Metal*, Energoizdat, 1995.

99. Dubov A.A., Diagnosing pipelines and vessels with the use of the method of magnetic memory of metal, *Bezopas. Tr. Promysh-sti*, **6**: 27–31, 1997.
100. Witos M., *Zwiększenie żywotności silników turbinowych poprzez aktywne diagnozowanie i sterowanie*, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, tom 29, 2011.
101. Hu B., Chen G., Shen G., Li L., Chen X., Study on Magnetic Memory Method (MMM) for fatigue evaluation, *17th World Conference on Nondestructive Testing*, 25–28 Oct. 2008, Shanghai, China 2008.
102. Costain J., Pearson N.R., Boat M.A., Boba R., Możliwości współczesnych skanerów den zbiorników działających w oparciu o metodę strumienia rozproszenia pola magnetycznego, *Badania Nieniszczące i Diagnostyka*, **2017**(1–2): 20–23, 2017, doi: 10.26357/Bnid.2017.020.
103. Porter P., Use of magnetic flux leakage (MFL) for the inspection of pipelines and storage tanks, *NDT & E International*, **30**(1): 33, 1997, doi: 10.1117/12.209361.
104. Kim J.-W., Park S., Magnetic flux leakage-based local damage detection and quantification for steel wire rope non-destructive evaluation, *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, **29**(17): 3396–3410, 2018, doi: 10.1177/1045389X17721038.
105. Johnston D., Aboveground storage tank floor inspection using magnetic flux leakage, *NDT & E International*, **26**(1): 35–36, 1997, doi: 10.1016/s0963-8695(93) 90169-U.
106. Usarek Z., Warnke K., Inspection of gas pipelines using magnetic flux leakage technology, *Advances in Materials Science*, **17**(3): 37–45, 2017, doi: 10.1515/adms-2017-0014.
107. Wu J. *et al.*, A high-sensitivity MFL method for tiny cracks in bearing rings, *IEEE Transactions on Magnetics*, **54**(6): 6201308, 2018, doi: 10.1109/TMAG.2018.2810199.
108. Schijve J., *Fatigue of Structures and Materials*, Springer Netherlands, 2009.
109. Przybyłowicz K., *Strukturalne aspekty odkształcania metali*, WN PWN, Warszawa 2003.
110. Kocańda S., *Zmęczeniowe pękanie metali*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1985.

111. **Kukła D.**, Dietrich L., Ciesielski M., Ocena stopnia uszkodzenia eksploatacyjnego materiału rurociągu parowego na podstawie analizy zmian właściwości zmęczeniowych i mikrostruktury, *Acta Mechanica et Automatica*, **5**(3): 55–60, 2011.
112. Dietrich L., Socha G., Accumulation of damage in A336 GR5 structural steel subject to complex stress loading, *Strain*, **48**(4): 279–285, 2012, doi: 10.1111/j.1475-1305.2011.00821.x.
113. **Kukła D.**, Grzywna P., Zagórski A., Ocena rozwoju degradacji zmęczeniowej stali P91 na podstawie zmian kąta fazowego sygnału prądowirowego, *Przegląd Spawalnictwa*, **13**: 8–11, 2012.
114. **Kukła D.**, Grzywna P., Karczewski R., Ocena rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego na podstawie zmian odkształcenia i parametrów prądowirowych w kolejnych cyklach obciążenia, *Przegląd Spawalnictwa*, **5**: 23–31, 2014.
115. **Kukła D.**, Kowalewski Z.L., Grzywna P., Kubiak K., Assessment of fatigue damage development in power engineering steel by local strain analysis, *Kovove Materialy – Metallic Materials*, **52**(5): 269–277, 2014.
116. Krysztofik J., **Kukła D.**, Socha G., Ocena stopnia uszkodzenia stopu Inconel 718 z zastosowaniem prądów wirowych, *Przegląd Spawalnictwa*, **87**(12): 36–38, 2015.
117. Krysztofik J., **Kukła D.**, Manaj W., Socha G., Evaluation of damage degree of inconel 718 alloy with the use of non-destructive methods, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, **55**(4): 299–307, 2019, doi: 10.1134/S1061830919040107.
118. **Kukła D.**, Zagórski A., Ocena rozwoju uszkodzenia zmęczeniowego warstwy aluminikowej na stopie niklu z zastosowaniem technik nieniszczących, *Przegląd Spawalnictwa*, **87**(12): 18–21, 2015.
119. **Kukła D.**, Kopeć M., Wang K., Senderowski C., Kowalewski Z.L., Nondestructive methodology for identification of local discontinuities in aluminum layer-coated Mar 247 during its fatigue performance, *Materials*, **14**(14): 3824–1–13, 2021, doi: 10.3390/ma14143824.
120. **Kukła D.**, Szlagowska-Spychalska J., Grzywna P., Zagórski A., Identyfikacja uszkodzenia zmęczeniowego stopu aluminium 2017 na podstawie pomiarów konduktywności, *Przegląd Spawalnictwa*, **85**(12): 88–91, 2013.



121. Szlagowska-Spychalska J., Dragan K., **Kukla D.**, Spychalski W., Kurzydłowski K.J., A novel approach for the eddy current inspection of the aerospace structures based on the signal modeling and signal processing, *The American Society for Nondestructive Testing, Proceedings of the 18th World Conference on Nondestructive Testing*, Durban, RPA, 16–20 April, 2012, ASNT, pp. 1–10, 2012.
122. **Kukla D.**, Kopeć M., Sitek R., Olejnik A., Kachel S., Kizskowiak Ł., A novel method for high temperature fatigue testing of nickel superalloy turbine blades with additional NDT diagnostics, *Materials*, **14**(6): 1392–1–17, 2021, doi: 10.3390/ma14061392.
123. Gupta S., Ray A., Real-time fatigue damage monitoring via in situ ultrasonic sensing, [in:] A.F. Lignelli (Ed.), *Fatigue Crack Growth*, pp. 3–48, Nova Science Publishers, 2009.
124. Fatemi A., Yang L., Cumulative fatigue damage and life prediction theories: A survey of the state of the art for homogeneous materials, *International Journal of Fatigue*, **20**(1): 9–34, 1998, doi: 10.1016/S0142-1123(97)00081-9.
125. Mourão A. *et al.*, A fatigue damage evaluation using local damage parameters for an offshore structure, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Maritime Engineering*, **173**(2): 43–57, 2020, doi: 10.1680/jmaen.2019.24.
126. Shang D.G., Sun G.Q., Deng J., Yan C.L., Multiaxial fatigue damage parameter and life prediction for medium-carbon steel based on the critical plane approach, *International Journal of Fatigue*, **29**(12): 2200–2207, 2007, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.12.005.
127. Meggiolaro M.A., Castro J.T.P., Statistical evaluation of strain-life fatigue crack initiation predictions, *International Journal of Fatigue*, **26**(5): 463–476, 2004, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2003.10.003.
128. Correia J.A.F.O. *et al.*, A generalization of the fatigue Kohout-Véchet model for several fatigue damage parameters, *Engineering Fracture Mechanics*, **185**: 284–300, 2017, doi: 10.1016/j.engfracmech.2017.06.009.
129. Yuan R., Li H., Huang H.Z., Zhu S.P., Gao H., A nonlinear fatigue damage accumulation model considering strength degradation and its applications to fatigue reliability analysis, *International Journal of Damage Mechanics*, **24**(5): 646–662, 2015, doi: 10.1177/1056789514544228.

130. Ramsamooj D.V., Analytical prediction of short to long fatigue crack growth rate using small- and large-scale yielding fracture mechanics, *International Journal of Fatigue*, **25**(9–11): 923–933, 2003, doi: 10.1016/S0142-1123(03)00126-9.
131. Chapetti M.D., Fatigue propagation threshold of short cracks under constant amplitude loading, *International Journal of Fatigue*, **25**(12): 1319–1326, 2003, doi: 10.1016/S0142-1123(03)00065-3.
132. Bjerken C., A tool to model short crack fatigue growth using a discrete dislocation formulation, *International Journal of Fatigue*, **25**(6): 559–566, 2003.
133. Ishihara S., McEvily A.J., Analysis of short fatigue crack growth in cast aluminum alloys, *International Journal of Fatigue*, **24**(11): 1169–1174, 2002, doi: 10.1016/S0142-1123(02)00027-0.
134. Johannesson P., Svensson T., De Maré J., Fatigue life prediction based on variable amplitude tests – Methodology, *International Journal of Fatigue*, **27**(8): 954–965, 2005, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2004.11.009.
135. Mlikota M., Schmauder S., Božić Z., Calculation of the Wöhler (S-N) curve using a two-scale model, *International Journal of Fatigue*, **114**: 289–297, 2018, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2018.03.018.
136. Grobstein T.L., Sivashankaran S., Welsch G., Panigrahi N., McGervey J.D., Blue J.W., Fatigue damage accumulation in nickel prior to crack initiation, *Materials Science and Engineering A*, **138**(2): 191–203, 1991, doi: 10.1016/0921-5093(91)90688.
137. Myrtja E., Soudier J., Prat E., Chaouche M., Fatigue deterioration mechanisms of high-strength grout in compression, *Construction and Building Materials*, **270**: 121387, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121387.
138. Fiedler M., Vormwald M., Considering fatigue load sequence effects by applying the local strain approach and a fracture mechanics based damage parameter, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **83**: 31–41, 2016, doi: 10.1016/j.tafmec.2016.01.003.
139. Góral G., Bydoń S., Uhl T., Intelligent transducers of in-operational loads in construction fatigue monitoring, *Machine Dynamics Problems*, **26**(2/3): 73–88, 2002.

140. Robertson A.N., Farrar C.R., Sohn H., Singularity detection for structural health monitoring using holder exponents, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **17**(6): 1163–1184, 2003, doi: 10.1006/mssp.2002.1569.
141. Socha G., Prediction of the fatigue life on the basis of damage progress rate curves, *International Journal of Fatigue*, **26**(4): 339–347, 2004, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2003.08.019.
142. Socha G., Experimental investigations of fatigue cracks nucleation, growth and coalescence in structural steel, *International Journal of Fatigue*, **25**(2): 139–147, 2003, doi: 10.1016/S0142-1123(02)00068-3.
143. Socha G., Dietrich L., A fatigue damage indicator parameter for P91 chromium-molybdenum alloy steel and fatigue pre-damaged P54T carbon steel, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **37**(2): 195–205, 2014, doi: 10.1111/ffe.12104.
144. Dietrich L., Radziejewska J., The fatigue damage development in a cast Al-Si-Cu alloy, *Materials and Design*, **32**(1): 322–329, 2011, doi: 10.1016/j.matdes.2010.05.045.
145. Kowalewski Z.L., Mackiewicz S., Szelażek J., Evaluation of damage in steels subjected to exploitation loading – destructive and non-destructive methods, *International Journal of Modern Physics*, **22**: 5533–5538, 2008 doi: 10.1142/S0217979208050772.
146. Socha G., Dietrich L., Deformation based fatigue damage accumulation model, *Solid State Phenomena*, **240**: 128–133, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.240.128.
147. Suresh S., *Fatigue of Materials*, Cambridge University Press, 1998.
148. Pandkar A.S., Arakere N., Subhash G., Microstructure-sensitive accumulation of plastic strain due to ratcheting in bearing steels subject to rolling contact fatigue, *International Journal of Fatigue*, **63**: 191–202, 2014, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2014.01.029.
149. Bayraktar E., Garcias I.M., Bathias C., Failure mechanisms of automotive metallic alloys in very high cycle fatigue range, *International Journal of Fatigue*, **28**(11): 1590–1602, 2006, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2005.09.019.
150. Bree J., Elastic-plastic behaviour of thin tubes subjected to internal pressure and intermittent high-heat fluxes with application to fast-nuclear-reactor

- fuel elements, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, **2**(3): 226–238, 1967, doi: 10.1243/03093247v023226.
151. Rajpurohit R.S., Srinivas N.C.S., Singh V., Ratcheting strain accumulation due to asymmetric cyclic loading of Zircaloy-2 at room temperature, *Procedia Structural Integrity*, **2**: 2757–2763, 2016, doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.344.
152. Yan Z. *et al.*, Deformation behaviors and cyclic strength assessment of AZ31B magnesium alloy based on steady ratcheting effect, *Materials Science and Engineering A*, **723**: 212–220, 2018, doi: 10.1016/j.msea.2018.03.023.
153. Maletta C., Sgambitterra E., Furgiuele F., Casati R., Tuissi A., Fatigue properties of a pseudoelastic NiTi alloy: Strain ratcheting and hysteresis under cyclic tensile loading, *International Journal of Fatigue*, **66**: 78–85, 2014, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2014.03.011.
154. Ng H.W., Nadarajah C., Biaxial ratcheting and cyclic plasticity for breech-type loading – Part I: Finite element analysis, *The Journal of Pressure Vessel Technology*, **118**(2): 154–160, 1996, doi: 10.1115/1.2842174.
155. Rutecka A., Dietrich L., Kowalewski Z.L., Evaluation of the heat treatment role for light aluminum alloys subjected to creep and low cycle fatigue, *Materials Science Forum*, **638–642**: 455–460, 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.638-642.455.
156. Morrison D.J., Jia Y., Moosbrugger J.C., Cyclic plasticity of nickel at low plastic strain amplitude: Hysteresis loop shape analysis, *Materials Science and Engineering A*, **314**(1–2): 24–30, 2001, doi: 10.1016/S0921-5093(00)01914-6.
157. Mayama T., Sasaki K., Kuroda M., Quantitative evaluations for strain amplitude dependent organization of dislocation structures due to cyclic plasticity in austenitic stainless steel 316L, *Acta Materialia*, **56**(12): 2735–2743, 2008, doi: 10.1016/j.actamat.2008.02.005.
158. Zhou D., Moosbrugger J.C., Jia Y., Morrison D.J., A substructure mixtures model for the cyclic plasticity of single slip oriented nickel single crystal at low plastic strain amplitudes, *International Journal of Plasticity*, **21**(12): 2344–2368, 2005, doi: 10.1016/j.ijplas.2004.12.003.
159. Kang G., Kan Q., *Cyclic Plasticity of Engineering Materials*, John Wiley & Sons, Ltd, 2017.

160. Miner M.A., Cumulative damage in fatigue, *Journal of Applied Mechanics*, **12**(3): A159–A164, 1945, doi: 10.1115/1.4009458.
161. Dobrzański J., Hernas A., Moskal G., Microstructural degradation in boiler steels: Materials developments, properties and assessment, [in:] *Power Plant Life Management and Performance Improvement*, Woodhead Publishing Series in Energy, pp. 222–271, Woodhead Publishing Ltd, 2011, doi: 10.1533/9780857093806.2.222.
162. Dobrzański J., Materiałoznawcza interpretacja trwałości stali dla energetyki, *OPEN Access Library*, 2011 (dostęp 13.12.2021).
163. Dobrzański J., Diagnostyka uszkodzeń elementów ciśnieniowych urządzeń, *Prace Instytutu Metalurgii Żelaza*, **T. 61**, nr 2, s. 36–45, 2009.
164. Socha G., Nowa metoda pomiaru zniszczenia zmęczeniowego materiałów konstrukcyjnych, *Dozór Techniczny*, **z. 6**: 121–124, 2002.
165. **Kukla D.**, Zagórski A., Grzywna P., Ocena rozwoju procesów zmęczeniowych związanych z lokalnymi odkształceniami na przykładzie stali P91 dla energetyki, *Energetyka, Problemy Energetyki i Gospodarki Paliwowo-Energetycznej*, **65**(8/698): 436–440, 2012.
166. Grzywna P., **Kukla D.**, Wpływ eksploatacji na wybrane właściwości mechaniczne stali X10CrMoVnB9-1 (P91), *Przegląd Spawalnictwa*, **85**(12): 75–77, 2013. doi: 10.26628/wtr.v85i12.150.
167. **Kukla D.**, Kopeć M., Kowalewski Z.L., Effect of high temperature exposure on the fatigue damage development of X10CrMoVnB9-1 steel for power plant pipes, BSSM, *15th International Conference on Advances in Experimental Mechanics*, 2021-09-07/09-09, Swansea (GB), pp. 1–2, 2021, doi: 10.1016/j.ijpvp.2020.104282.
168. Xu P., Shida K., Eddy current testing probe composed of double uneven step distributing planar coils for crack detection, *IEEE Transactions on Sensors and Micromachines*, **128**(1): 18–23, 2008, doi: 10.1541/ieejsmas.128.18.
169. Nagy P.B., *Electromagnetic NDE*, University of Cincinnati, Ohio 45221, USA and UK Research Centre in NDE Imperial College London, SW7 2AZ, UK, March 2011.
170. Żurek Z.H., Dobman G., Rockstroh B., **Kukla D.**, Examination of service life of power system components made of P91 steel (X10CrMoVnB9-1)

- using impedance magnetic resonance technique, *19th World Conference on Non-Destructive Testing (WCNDT 2016), 13–17 June 2016, Munich, Germany, e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT)*, **21**(7), 2016, <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=19345>.
171. Żurek Z.H., Baron D., LCR measuring bridges and LDC1000-series modules in diagnostics of electromagnetic steel condition using low magnetic fields, *Przegląd Elektrotechniczny*, **91**(10): 121–125, 2015, doi: 10.15199/48.2015.10.25.
172. Żurek Z.H., **Kukła D.**, LDC1000 converter for NDT material diagnostics and characterisation, *Insight – Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, **60**(7): 375–379, 2018, doi: 10.1784/insi.2018.60.7.375.
173. Cieśla M., *Trwałość nadstopu niklu ŻS6U z aluminiową warstwą ochronną w warunkach obciążeń cieplnych i mechanicznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
174. Gab Kim S., Ha Hwang Y., Gu Kim T., Min Shu C., Failure analysis of J85 Engine turbine blades, *Engineering Failure Analysis*, **15**(4): 394–400, 2008, doi: 10.1016/j.engfailanal.2007.01.015.
175. Tang H., Cao D., Yao H., Xie M., Duan R., Fretting fatigue failure of an aero engine turbine blade, *Engineering Failure Analysis*, **16**(6): 2004–2008, 2009, doi: 10.1016/j.engfailanal.2008.07.010.
176. **Kukła D.**, Białkowiec A., Grzywna P., Evaluation of microstructural changes of S235 steel after rolling on the basis of microscopic observations and eddy current non-destructive method, *Advances in Materials Science*, **42**(4): 40–49, 2014, doi: 10.2478/adms-2014-0020,
177. Miksic A., Koivisto J., Rosti J., Alava M., Strain fluctuations from DIC technique applied on paper under fatigue or creep, *Procedia Engineering*, **10**: 2678–2683, 2011, doi: 10.1016/J.PROENG.2011.04.446.
178. Song H., Liu C., Zhang H., Leen S.B., A DIC-based study on fatigue damage evolution in pre-corroded aluminum alloy 2024-T4, *Materials (Basel)*, **11**(11): 2243, 2018, doi: 10.3390/MA11112243.
179. Chen C., Ye D., Zhang L., Liu J., DIC-based studies of the overloading effects on the fatigue crack propagation behavior of Ti-6Al-4V ELI alloy, *International Journal of Fatigue*, **112**: 153–164, 2018, doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2018.03.017.

180. Gonzáles G.L.G., González J.A.O., Castro J.T.P., Freire J.L.F., DIC analysis for crack closure investigations during fatigue crack growth following overloads, [in:] Sutton M., Reu P. (Eds), *International Digital Imaging Correlation Society. Conference Proceedings of the Society for Experimental Mechanics Series*, Springer, Cham, pp. 151–156, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-51439-0\_36.
181. Eremin A., Panin S., Sunder R., Berto F., DIC Study of fatigue crack growth after single overloads and underloads, *Procedia Structural Integrity*, **5**: 889–895, 2017, doi: 10.1016/J.PROSTR.2017.07.120.
182. Kim K.-S., Kim K.-S., Kwon J.-M., Park S.-M., Kim B.-I., Effect of local strain on low cycle fatigue using ESPI system, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, **43**(2): 213–219, 2006, doi: 10.3744/SNAK.2006.43.2.213.
183. Zanarini A., Full field ESPI vibration measurements to predict fatigue behavior, [in:] *Proceedings of the ASME 2008 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 1: Advances in Aerospace Technology*, Boston, Massachusetts, pp. 165–174, 2009, doi: 10.1115/IMECE2008-68727.
184. Farahani B.V., Direito F., Sousa P.J., Tavares P.J., Infante V., Moreira P.P.M.G., Crack tip monitoring by multiscale optical experimental techniques, *International Journal of Fatigue*, **155**: 106610, 2022, doi: 10.1016/J.IJFATIGUE.2021.106610.
185. **Kukla D.**, Brynk T., Pakieła Z., Assessment of fatigue resistance of aluminide layers on MAR 247 nickel super alloy with full-field optical strain measurements, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **26**(8): 3621–3632, 2017, doi: 10.1007/s11665-017-2767-7.
186. **Kukla D.**, Evaluation of fatigue properties of nickel based superalloy MAR 247 with aluminide coating and crack detection by non-destructive techniques, *6th International Conference on Mechanics and Materials in Design*, 2015-07-26/07-30, Ponta Delgada (PT), pp. 5661-1–8, 2015.
187. Grzywna P., **Kukla D.**, Evaluation of strain distribution for the P91 steel under static load using ESPI system, *Advances in Materials Science*, **42**(4): 28–39, 2014, doi: 10.2478/adms-2014-0019.
188. Kopeć M., Grzywna P., **Kukla D.**, Kowalewski Z.L., Evaluation of the fatigue damage development using ESPI method, *Inżynieria Materiałowa*, **2016**(4): 201–205, 2016, doi: 10.15199/28.2016.4.9.

189. Kopec M., Brodecki A., **Kukla D.**, Kowalewski Z.L., Suitability of DIC and ESPI optical methods for monitoring fatigue damage development in X10CrMoVNb9-1 power engineering steel, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **21**(4): 167, 2021, doi: 10.1007/s43452-021-00316-1.
190. **Kukla D.**, Kolek Ł., Gradzik A., Evaluation and classification of grinding burns by eddy current method, DMIUT 2019, *Diagnostyka Materiałów i Urządzeń Technicznych*, 2019-05-29/05-31, Gdańsk (PL), 2019.
191. *ASM Metals Handbook. Volume 17. Nondestructive Evaluation and Quality Control.*
192. Paradowski K., Manaj W., Sychalski L., Zagórski K., Lubińska D., **Kukla D.**, Płowiec J., Kurzydłowski K.J., Research on possibilities of application of nondestructive testing in degradation evaluation of materials used in infrastructure working under the influence of aggressive hydrogen environment, *Advances in Materials Science*, **7**(2/12), 276–283, 2007.
193. Kowalewski Z.L., Ustrzycka A., Szymczak T., Makowska K., **Kukla D.**, Damage identification supported by nondestructive testing techniques, [in:] Altenbach H., Brünig M., Kowalewski Z. (Eds), *Plasticity, Damage and Fracture in Advanced Materials*, Advanced Structured Materials, vol. 121, pp. 67–117, Springer, Cham, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-34851-9\_6.