Politechnika Śląska Wydział Transportu



Mgr inż. Michał Szudyga

Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych stali stosowanej do kół i obręczy kolejowych zestawów kołowych

Rozprawa doktorska

Promotor: Dr hab. inż. Zbigniew Żurek prof. nzw. Pol.Śl.

Katowice 2011

Spis treści

1. Wprow	adzenie	, 4
2. Charak	terystyka kolejowych zestawów kołowych	. 7
3. Rodzaj	e wad oraz uszkodzeń kół i obręczy kolejowych	12
3.1. Naj	prężenia własne działające na koła zestawów kołowych	12
3.2. Lok	calizacja i rozmiary typowych pęknięć kół kolejowych	13
3.3. Usz	zkodzenia eksploatacyjne kół i obręczy kolejowych	15
4. Podstav	wowe metody defektoskopowe stosowane w kolejnictwie	20
4.1. Me	toda ultradźwiękowa	20
4.2. Me	toda wiroprądowa	22
4.3. Me	tody magnetyczne	23
5. Przeglą	d technik wyznaczania stopnia zmęczenia materiału	25
5.1. Mo	żliwości obecnie stosowanych metod defektoskopowych do diagnozowania	
pro	cesów zmęczeniowych	28
5.2. PH	YBAL – metoda prognozowania czasu życia materiału	29
5.3. PM	MP – metoda prognozowania czasu życia materiału w oparciu o zmienność	
para	ametrów magnetycznych	30
5.4. Me	tody radiacyjne	32
5.5. Dia	gnostyka termograficzna i termowizyjna	34
5.6. Tec	hnika anihilacji pozytonów	35
5.7. Em	isja akustyczna	36
5.8. Obs	serwacje metalograficzne	36
6. Uzasad	nienie stosowania metod magnetycznych w badaniach zmęczenia materiału.	38
6.1. Zw	iązek parametrów magnetycznych z czynnikami zewnętrznymi	38
6.2. Pęt	la histerezy magnetycznej	40
7. Tezy i z	założenia pracy	45
8. Cel pra	cy	46
9. Badani	a zmęczeniowe stali stosowanych na koła i obręcze kolejowe	47
9.1. Prz	ygotowanie próbek	18
9.2. Bac	lanie struktury materiału	19
9.2.1.	Analiza składu chemicznego badanej stali	49
9.2.2.	Analiza metalograficzna	50
9.2.3.	Badania metalograficzne materiału po zadanym cyklu obciążeń zmęczeniowych z	53
9.3. Bac	lania zmęczeniowe	55

Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych...

9.3.1. Procedura badań zmęczeniowych 55
9.3.2. Wyznaczenie krzywej Wöhlera dla badanej stali
9.3.3. Pomiary lokalnych odkształceń niesprężystych60
9.3.4. Wyznaczenie parametru zniszczenia64
9.3.5. Podsumowanie badań zmęczeniowych70
10. Diagnozowanie zmęczenia materiału metodą pomiaru parametrów
magnetycznych72
10.1. Badanie jednorodności materiału72
10.1.1. Analiza jednorodności materiału metodą magnetyczną
10.1.2. Analiza jednorodności materiału metodą pomiaru indukcyjności
10.1.3. Podsumowanie badań jednorodności materiału
10.2. Detekcja procesów zmęczeniowych metodą magnetyczną77
10.3. Wpływ obciążeń eksploatacyjnych na parametry magnetyczne
10.3.1. Badania zmian natężenia koercji pod wpływem obciążeń zmęczeniowych 79
10.3.2. Badanie zmian parametrów przenikalności magnetycznej i kąta stratności od
obciążeń zmęczeniowych
10. Podsumowanie i wnioski 85
Literatura
Wykaz ważniejszych pojęć i oznaczeń98
Załącznik 1. Możliwości stosowania technik magnetoindukcyjnych w defektoskopii 100
Załącznik 2. Zmęczeniowe pętle histerezy próbek serii P54T 108

1. Wprowadzenie

Kolejowe zestawy kołowe są newralgicznymi elementami konstrukcji pojazdu szynowego, przejmują siły statyczne i dynamiczne działające podczas ruchu, mają zatem bezpośredni wpływ na ruch pojazdu oraz na bezpieczeństwo transportu.

W procesie produkcji i eksploatacji zestawy kołowe poddawane są szczegółowym badaniom defektoskopowym. Obecnie diagnostyka kolejowego zestawu kołowego opiera się, głównie na badaniach defektoskopowych metodami: ultradźwiękowymi, magnetycznoproszkowymi oraz wiroprądowymi. Wadą wymienionych metod jest ograniczenie związane z głębokością wnikania w materiał oraz czułością detekcji pęknięć. Wykrywane są jedynie wady przekraczające normatywny wymiar [13,15]. Wyniki pomiarów uzyskane tymi metodami są do tej pory decydującym składnikiem oceny jakościowej, a zarazem "gwarantem" bezpieczeństwa ruchu.

Transport szynowy jest uważany jako jeden z najbezpieczniejszych, wypadki nie zdarzają się często, ale są bardzo nagłaśniane. Na rys. 1.1 przedstawiono obręcz koła pociągu szybkiego ICE, która uległa pęknięciu podczas ruchu prędkością eksploatacyjną, doprowadzając do poważnego w skutkach wykolejenia (katastrofa pociągu ICE, Eschede, 3 czerwiec 1998). W ekspertyzie powypadkowej stwierdzono, iż przyczyną uszkodzenia obręczy było pęknięcie wywołane zmęczeniem materiału oraz nieodpowiednia konstrukcja koła zestawu kolejowego [32].



Rys. 1.1. Uszkodzenie koła obręczowanego pociągu szybkiego ICE oraz przełom pękniętej obręczy

Po katastrofie kolejowej w Eschede nastąpił znaczny postęp w technologii badań zestawów kołowych, polegający m.in. na wprowadzeniu pełnej automatyzacji pomiarów.

Pomimo rozwoju metod defektoskopowych nadal dochodzi do pęknięć kół i obręczy kolejowych w trakcie eksploatacji. W roku 2006 w Polsce zgłoszono 137 przypadków pęknięć kół i obręczy kolejowych w roku 2007 – 47, w 2008 49, a w 2009 – 105 [33].

Wzrost prędkości pociągów generuje dodatkowy przyrost obciążeń dynamicznych, przyśpieszających procesy zmęczeniowe [1]. Proponowane są zmiany w dotychczas stosowanych metodach defektoskopowych, umożliwiające detekcję zmian zmęczeniowych materiału [37, 64, 67, 82]. Taka modyfikacja działań diagnostycznych wpłynie na: wzrost bezpieczeństwa transportu szynowego, zwiększenie wydajności pracy i wydłużenie czasu zdatności całej konstrukcji.

Opracowanie wiarygodnych technik monitorowania zmęczenia materiału metodami nieniszczącymi wymaga wykonania szeregu badań, obejmujących ocenę zmian właściwości fizycznych i mechanicznych w funkcji czasu eksploatacji. Skorelowanie wartości czynników określających stopień zmęczenia uzyskanych metodami nieniszczącymi oraz niszczącymi (badania struktury i właściwości mechanicznych) pozwoli na zastosowanie badań nieniszczących do oceny stanu zmęczenia materiału [37, 126, 128, 129].

Stal stosowana na koła i obręcze kolejowych zestawów kołowych jest materiałem ferromagnetycznym. Stale ferromagnetyczne poddane obciążeniom zmęczeniowym, mechanicznym, termicznym, pełzaniu nisko i wysokotemperaturowemu lub odkształceniom plastycznym zmieniają swoje parametry magnetyczne w stosunku do stanu przed obciążeniem [38, 78]. Badanie zmian parametrów magnetoindukcyjnych pod wpływem naprężeń o cyklu wahadłowym, będzie przyjętym w rozprawie sposobem oceny zmian parametrów fizycznych materiału od obciążeń zmęczeniowych.

Rozprawa składa się z trzech części. Pierwsza część zawiera przegląd literaturowy oraz badania wstępne. W części drugiej zawarto opis procesu zmęczenia badanej stali, wyniki oraz analizę testów zmęczeniowych. Część trzecią stanowią badania magnetyczne i magnetoindukcyjne odpowiednio przygotowanych próbek.

W części pierwszej (rozdziały od 1 do 6) dokonano analizy literaturowej dotyczącej rodzajów oraz przyczyn powstawania uszkodzeń kolejowych zestawów kołowych, opisu procesów niszczenia oraz sposobów wyznaczenia parametrów charakteryzujących zmęczenie materiału. W tej części pracy dokonano również zestawienia metod badań defektoskopowych, ze szczególnym uwzględnieniem technik mogących w przyszłości wskazać zjawiska fizyczne, przydatne do oceny stopnia zmęczenia. Cześć pierwszą kończą wnioski wstępne, sformułowane cele oraz założenia pracy.

Badania zmęczeniowe prowadzone były w Certyfikowanym Laboratorium Wytrzymałości Materiałów IPPT PAN w Warszawie w ramach realizacji grantu [125]. Próby zmęczeniowe zostały poprzedzone badaniami jednorodności struktury materiału metodami nieniszczącymi. Badania jednorodności przeprowadzono za pomocą specjalnie zaprojektowanego oraz skonstruowanego stanowiska pomiarowego, które obecnie stanowi wyposażenie Laboratorium Elektrotechniki Wydziału Transportu Politechniki Śląskiej. Do pomiarów właściwości fizycznych materiału wykorzystano miernik PPMS firmy Qantum Design będący na wyposażeniu Instytutu Nauki o Materiałach, Uniwersytetu Śląskiego.

Próbki materiału, poddano naprężeniom zmęczeniowym w cyklu wahadłowym o różnej amplitudzie naprężenia. Wykazano zależności zmian wielkości magnetycznych od amplitudy naprężenia działającego na próbkę, podczas zadanej liczby cykli pracy maszyny wytrzymałościowej.

Analiza wyników pracy pozwoliła na wyznaczenie właściwości fizycznych zmieniających się wraz z postępem zmęczenia materiału. Na podstawie przeprowadzonych badań dokonano wyboru sposobu pomiaru właściwości magnetoindukcyjnych, metodą nieniszczącą dla badanego materiału oraz wykazano w jakim polu magnesującym uzyskuje się optymalny wynik.

Praca została zakończona wnioskami, a jej efekt końcowy to opracowana metoda diagnozowania procesów zmęczeniowych za pomocą pomiarów magneto-indukcyjnych stali stosowanej na koła i obręcze kolejowych zestawów kołowych.

2. Charakterystyka kolejowych zestawów kołowych

Zestawem kołowym nazywa się oś trwale połączoną z dwoma kołami, przystosowanymi do toczenia się po szynach. Zestaw kołowy musi bezpiecznie i niezawodnie zrealizować następujące zadania [15, 72]:

- umożliwić ruch pojazdu,
- prowadzić pojazd po torze,
- przenosić ciężar pojazdu wraz z ładunkiem,
- przenosić siły obwodowe od napędu i hamowania,
- przenosić obciążenia dynamiczne powodowane nierównością toru na elementy resorujące,
- przekazywać sygnały pojazd-tor.

Kolejowe zestawy kołowe mają bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo ruchu, a więc muszą charakteryzować się szczególnymi właściwościami mechanicznymi.

Przy doborze materiału na koła zestawu kołowego należy brać pod uwagę warunki pracy tj.: charakterystykę oddziaływań mechanicznych, innych dla transportu towarowego i osobowego, prędkość eksploatacyjną oraz warunki geograficzne (geometria tarczy, profil) i klimatyczne (temperatura) [30].

Wraz z rozwojem kolejnictwa wzrastają wymagania co do wytrzymałości materiałów, z których wykonane są koła i obręcze kolejowe. Koła zestawu kolejowego mogą być bezobręczowe i obręczowane. Koła bezobręczowe wykonane są w całości w kształcie monobloku, możemy w nich wyróżnić: wieniec, tarczę i piastę koła (rys. 2.1) [157].



Rys. 2.1. Przekrój i fotografia koła bezobręczowego

Najczęściej stosowanym materiałami na koła monoblokowe i obręcze kolejowe na kontynencie europejskim są stale węglowe. Należy jednak materiał ten poddać odpowiednim zabiegom obróbczym zwiększającym własności wytrzymałościowe i odporność na zużycie ścierne [51].

Obecnie w Polsce na koła monoblokowe zarówno do zestawów wagonowych jak i pojazdów trakcyjnych stosuje się głównie stal węglową, konstrukcyjną ER7 wg PN-EN 13262+A1:2009 (odpowiednik stali P52 wg PN-K-91019:1992). Normy europejskie przedstawiają cztery gatunki stali stosowanej na koła bezobręczowe: ER6, ER7, ER8, ER9. W tabeli 2.1 przedstawiono maksymalne zawartości procentowe pierwiastków chemicznych w stali stosowanych na koła monoblokowe [146].

	Skład chemiczny [%]								
Gatunek stali	max								
	C	Si	Mn	Cr	Cu	Мо	Ni	V	Cr+ Mo+ Ni
ER6	0,48	0,40	0,75	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER7	0,52	0,40	0,80	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER8	0,56	0,40	0,80	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50
ER9	0,60	0,40	0,80	0,30	0,30	0,08	0,30	0,06	0,50

Tabela 2.1. Materiały na koła monoblokowe PN-EN 13262+A1:2009

W tabeli 2.2 przedstawiono charakterystyki mechaniczne stali wykorzystywanej do produkcji kół monoblokowych [146].

Tablica 2.2. Własności mechaniczne stali do kół monoblokowych wg PN-EN 13262+A1:2009

Gatunek		Wieniec	Tarcza					
stali	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	R _m obniżenie [*] [MPa]	A ₅ [%]			
ER6	≥500	780÷900	≥15	≥100	≥16			
ER7	≥520	820÷940	≥14	≥110	≥16			
ER8	≥540	860÷980	≥13	≥120	≥16			
ER9	≥560	900÷1050	≥12	≥130	≥14			
R _e - granica plastyczności materiału R _m - wytrzymałość na rozciaganie								

A₅ - wydłużenie

^{*}R_mobniżenie - obniżenie wytrzymałości na rozciąganie porównywalne do wytrzymałości na rozciąganie wieńca tego samego koła

W tabeli 2.3 podano stale zalecane przez polskie normy, do ogólnego zastosowania w kolei w zależności od warunków pracy. Najszersze zastosowanie mają stale o oznaczeniu ER7.

Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych...

Typ pojazdu	Zalecany gatunek stali	Dalsze zalecenia						
Wagony towarowe	- ER7	Χ/						
Wagony pasażerskie: - hamowane klockami - hamulec tarczowy.	- ER6/ER7 - ER7	Χ/						
Lokomotywy: - szczególnie hamowane włącznie klockami, - P/D podwyższone.	- ER7 - ER8	Brak						
Wagony napędne: - wyłącznie hamowane klockami, - inne	- ER6/ER7 - ER7	Brak						
V/ przy kombinacji obciażania termicznego i niższego docieku powierzebniowego w zekresie przylegenie koła może tu								

Tabela 2.3. Zalecane gatunki stali na koła monoblokowe

X/ przy kombinacji obciążenia termicznego i niższego docisku powierzchniowego w zakresie przylegania koła może tu być stosowana stal ER9

Koła obręczowane składają się z koła bosego, obręczy nasadzonej na koło bose oraz z pierścienia zaciskowego. Obręcze zestawów kołowych powinny być wykonane z stali charakteryzującej się odpowiednią ciągliwością oraz dużą wytrzymałością na rozciąganie [30, 73]. Na koła bose wykorzystuje się stal o mniejszej ciągliwości od stali wykorzystywanej na obręcze. W przypadku zużycia obręczy można ją wymienić bez wymiany koła bosego. Przekrój koła obręczowanego przedstawiono na rys. 2.2.





Koła obręczowane charakteryzują się mniejszą trwałością w porównaniu z kołami bezobręczowymi. Dodatkowo koła obręczowane mają większą masę oraz generują większe koszty wytwarzania. Wady te są szczególnie istotne przy dużych prędkościach jazdy i zwiększonym obciążeniu kół [30].

Gatunki stali węglowych konstrukcyjnych i niskostopowych stosowanych do produkcji kół obręczowanych kolejowych zestawów kołowych określają normy:

- koła bose: PN-H-84027-1. Stal dla kolejnictwa, Koła bose, Gatunki. Norma określa gatunki stali konstrukcyjnych jakościowych. W tabeli 2.4 przedstawiono skład chemiczny a w tabeli 2.5 właściwości mechaniczne przykładowej stali wykorzystywanej na koła bose [151],
- obręcze kół: PN-84/H-84027/06. Stal dla kolejnictwa, Obręcze do kół pojazdów szynowych, Gatunki. Norma określa gatunki stali węglowych konstrukcyjnych P54, P55A i P60 (tabela 2.6) [148].

Znak	Skład chemiczny [%]									
gatunku stali	С	Mn	S;	Р	S	Cr	Ni	Cu	Мо	V
Stan	max		51	max						
P23	0,28	0,90	0,15÷0,40	0,05	0,050	0,30	0,30	0,30	0,05	0,05

Tabela 2.4. Skład chemiczny stali stosowanych na koła bose wg [151]

Tabela 2.5. Właściwości mechaniczne stali P23 [151]

Znak gatunku	Stan obróbki cieplnej	Własności mechaniczne					
stali	1 5	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]			
P23	Surowy lub normalizowany	240	420÷500	25			

Skład chemiczny stali stosowanej na obręcze jest zgodny z normom PN-84/H-84027/06 przedstawia tabela 2.6 [148].

Tabela 2.6. Skład chemiczny stali wg analizy wytopowej PN-84/H-84027/06

Znak	Skład chemiczny [%]										
gatunku stali	С	Mn	Si	Р	S	Cr	Ni	Cu	Мо	V	
	-			max							
P54	0,50÷0,58	0,60÷0,90	0,15÷0,40								
P55A	0,52÷0,60	0,60÷0,90	0,15÷0,40	0,04	0,04	0,30	0,30	0,30	0,05	0,05	
P60	0,57÷0,65	0,60÷0,90	0,15÷0,40								

Profil tarczy koła oraz profil powierzchni tocznej i obrzeża koła dobiera się w taki sposób, aby niemożliwe było zsuwanie się zestawu z szyn nawet na ostrych łukach [15].

W tabeli 2.7 przedstawiono wykaz przykładowych stali stosowanych na obręcze kolejowe [147].

Gatunek	Zastosowanie
stali	
P54T	 obręcze wagonów towarowych o dużej intensywności eksploatacji, obręcze wagonów osobowych nowego typu (V > 120 [km/h])oraz wagonów piętrowych
D5 411	- obręcze pozostałych wagonów towarowych normalno- i wąskotorowych
P54N	- obręcze tramwajowe wąskotorowe typu 5N i 5ND
	- obręcze wagonów osobowych nowego typu (V > 120 [km/h] oraz wagonów piętrowych,
P55AT	- obręcze pojazdów trakcyjnych: lokomotyw towarowych, osobowych oraz zespołów
	trakcyjnych,
~~~~	- obręcze wagonów normalnotorowych o dużej intensywności eksploatacji,
P55AN	- obręcze wagonów osobowych starego typu (V > 120 [km/h]) normalno i wąskotorowych
	- obręcze pojazdów trakcyjnych: lokomotyw towarowych (parowych, elektrycznych i
P60T	spalinowych), lokomotyw manewrowych (parowych i spalinowych),
	- obręcze tramwajowe normalnotorowe.

Tabela 2.7. Stale stosowane na obręcze kół kolejowych zestawów kołowych [148]

Właściwości mechaniczne przykładowych materiałów stosowanych na obręcze kół kolejowych zestawów kołowych przedstawiono w tabeli 2.8 [148].

Gatunek	Stan obróbki	Własności mechaniczne						
stali	cieplnej	R _{eH} (R _e ) [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]	KCU [J/cm ² ]	Twardość HB	
	N - Normalizowany	370	700÷820	14	16	20	201	
P54	T - Ulepszany cieplnie	400	750÷880	15	22	30	221	
P55A	N - Normalizowany	420	800.020	12	16	20	222	
	T - Ulepszany cieplnie	430	800-920	14	20	30	235	
P60	T - Ulepszany cieplnie	500	920÷1050	12	16	20	262	
Z - przewężer	ie procentowe przekroju; 1	KCU - udarno	ść próbki z karb	em U; R	_{eH} – górna g	granica plasty	czności materiału	

Tabela 2.8. Właściwości stali na obręcze kolejowych zestawów kołowych

#### 3. Rodzaje wad oraz uszkodzeń kół i obręczy kolejowych

Analiza przyczyn zużycia i powstawania defektów w kolejowych zestawach kołowych jest niezbędna dla właściwej oceny zmian fizykalnych jakie zachodzą w materiale podczas produkcji i eksploatacji [13, 15, 39, 64, 82].

Głównymi czynnikami eksploatacyjnymi oddziaływującymi na koła kolejowe są: obciążenia statyczne, dynamiczne i udarowe wywołane przez siły zewnętrzne, naprężenia wewnętrzne, korozję, zjawiska termiczne i mechaniczne oraz tarcie [26, 57, 85]. Na skutek występowania każdego z tych czynników lub jednocześnie kilku z nich powstają uszkodzenia (nieciągłości eksploatacyjne, ślady zużycia).

#### 3.1. Naprężenia własne działające na koła zestawów kołowych

W wieńcu nowego koła monoblokowego występują naprężenia ściskające o rozkładzie pokazanym na rys. 3.1a [102].



Rys. 3.1. Rozkłady naprężeń własnych w wieńcach kół: a) - nowych (przed eksploatacją), b) - po przebiegu 200 000 km

Podczas normalnej eksploatacji, wskutek dużych nacisków w miejscu kontaktu koła z szyną, pojawia się zgniot w warstwie powierzchniowej. Efektem tego zjawiska jest tworzenie się naprężeń ściskających od powierzchni tocznej (rys. 3.1b). W przypadku nagłego hamowania przy dużej prędkości lub ciągłego hamowania np. przy zjeżdżaniu w terenach górskich, następuje nagrzewanie się wieńca koła, co w konsekwencji prowadzi do powstania w wieńcu naprężeń rozciągających (rys. 3.2a). Naprężenia rozciągające mogą być przyczyną pęknięć. Dalsza eksploatacja, prowadzi do ponownego narastania zgniotu na powierzchni tocznej. Powstają również obwodowe naprężenia ściskające otoczone pozostałymi po udarze cieplnym naprężeniami rozciągającymi (rys. 3.2b). Obciążenie wieńca naprężeniami zginającymi od sił zewnętrznych jest nieporównywalnie mniejsze, dlatego też bardzo rzadko pęknięcia zmęczeniowe powstają i rozwijają się od strefy powierzchni tocznej [100].



Rys. 3.2. Rozkłady naprężeń własnych w wieńcach kół: a - po dłuższym hamowaniu,b - po hamowaniu i dalszej eksploatacji

Przyczyną większości pęknięć zmęczeniowych kół są głębokie pęknięcia powstałe w wyniku udarów cieplnych podczas ciągłego i długotrwałego hamowania. Zdarzają się przypadki nagłego, całkowitego pęknięcia nagrzanego koła monoblokowego w stojącym pociągu, podczas stygnięcia koła [101].

Naprężenia własne w obręczach mają inny rozkład z uwagi na proces zaciskania obręczy na kole bosym. Maksymalne wartości naprężeń rozciągających są na wewnętrznej powierzchni obręczy, dlatego też zmęczeniowe złamania obręczy mają inny charakter i przebieg [100].

#### 3.2. Lokalizacja i rozmiary typowych pęknięć kół kolejowych

Obserwacje [100, 101] rozwoju pęknięć zmęczeniowych, które są inicjowane w różnych miejscach wieńca wskazują na znaczne różnice szybkości ich wzrostu w zależności od lokalizacji i wielkości początkowego pęknięcia (karbu). Można rozróżnić sześć takich lokalizacji na wieńcu kół monoblokowych (rys. 3.3) [100, 101]:

a) od powierzchni tocznej (6÷17% przypadków),

- b) od krawędzi zewnętrznej (40÷60% przypadków),
- c) od obrzeża od boku zewnętrznego (2÷10% przypadków),
- d) od znaków na zewnętrznej powierzchni bocznej (3÷10% przypadków),
- e) od znaków wybitych na wewnętrznym boku (2÷5% przypadków),
- f) od uszkodzeń na powierzchni zamocowania (10÷35% przypadków),



Rys. 3.3. Lokalizacja i forma początkowych karbów krytycznych pęknięć zmęczeniowych w wieńcach kół kolejowych

Najczęściej dochodzi do złamania kół od narożnikowych pęknięć zmęczeniowych rozwijających się od powstałych w obszarze zewnętrznego naroża (krawędzi) uszkodzeń powierzchni tocznej (rys. 3.3b). Ich przyczyną jest nieprawidłowa praca klocka hamulcowego z kołem tzw. schodzące klocki, rozgrzewające tylko część powierzchni tocznej przy częstym hamowaniu oraz ewentualnie uszkodzenia mechaniczne znajdujące się w strefie znacznych rozciągających naprężeń.

#### 3.3. Uszkodzenia eksploatacyjne kół i obręczy kolejowych

Uszkodzenia powierzchni tocznej obręczy kolejowych i wieńców kół monoblokowych są zależne w głównej mierze od wielkości i rodzaju obciążenia koła w trakcie jazdy. Obciążenia przekraczające dopuszczalne zakresy dynamiczne wytrzymałości materiału wpływają na uszkodzenia powierzchni tocznej i są niejednokrotnie powodem zmian strukturalnych, co zmniejsza czas niezawodnej eksploatacji zestawu kołowego [68, 69, 85].

Ze względu na różnorodność warunków powstawania uszkodzeń na powierzchni tocznej można podzielić je na: pęknięcia cieplne, utwardzenia cieplne, utwardzenia mechaniczne, przemiany fazowe, wykruszenia i złuszczenia, płaskie miejsca, nalepy [69, 101].

W wyniku współpracy koła z wstawkami hamulcowymi na powierzchni tocznej mogą powstawać pęknięcia oraz utwardzenia cieplne, które w następstwie przyspieszają powstawanie uszkodzeń zmęczeniowych (rys. 3.4) [9].



Rys. 3.4. Zniszczona obręcz kolejowa z widocznym pęknięciem (a) i (b) oraz obręcz z lokalnymi przebarwieniami spowodowanymi oddziaływaniem wysokiej temperatury (c)

Utwardzenia cieplne powstają wskutek szybkiego chłodzenia powierzchni tocznych wcześniej nagrzanych podczas hamowania lub podczas zerwania przyczepności (np. przy ruszaniu) [85]. Propagacja defektów w głąb materiału może spowodować nagłe pęknięcie zmęczeniowe obręczy koła. Powstające w wyniku tych procesów pęknięcia mają układ nieregularny, siatkowy a przy propagacji pęknięć w kierunku promieniowym lub obwodowym, mogą być przyczyną pęknięcia obręczy (rys. 3.5) lub koła bezobręczowego (rys. 3.6) [9, 64, 68].



Rys. 3.5. Propagacja pęknięcia promieniowego w przekroju koła monoblokowego



Rys. 3.6. Przykład pęknięcia obwodowego obręczy kolejowej

Częstym defektem eksploatacyjnym kół i obręczy kolejowych są złuszczenia powstające na powierzchni tocznej zestawu kołowego (rys. 3.7) [68]. Występowanie złuszczeń może być miejscowe jak również obwodowe. Złuszczenia materiału są wynikiem przeciążenia mechanicznego materiału koła lub obręczy, przekraczającego wytrzymałość mechaniczną materiału na zerwanie.



Rys. 3.7. Złuszczenie materiału obręczy koła

Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych...

W wyniku nieumiejętnego hamowania pojazdu szynowego na powierzchni tocznej kół kolejowych mogą powstawać uszkodzenia w postaci płaskich miejsc lub nalewów (narostów). Schemat występowania płaskich miejsc w kole zestawu kołowego przedstawiono na rys. 3.8. Na rys. 3.9 przedstawiono fotografie płaskich miejsc na powierzchni tocznej kół kolejowych [9].



Rys. 3.8. Schemat występowania miejsc płaskich w kole zestawu kołowego



Rys. 3.9. Uszkodzenie w postaci miejsca płaskiego na powierzchni tocznej koła kolejowego

Nalepy (narosty) mają kształt ułożonych szeregowo łusek, częściowo się pokrywających (rys. 3.10). Ich grubość może wynosić od 0,5 [mm] do kilku milimetrów.



Rys. 3.10. Uszkodzenie koła w postaci nalepy, powstałej w wyniku nierównomiernego blokowania kół podczas hamowania

Pęknięcia zmęczeniowe będące wynikiem eksploatacji występują również w łukach przejścia tarczy w piastę oraz tarczy w wieniec [31]. Ogniskami pęknięć zmęczeniowych są wady materiałowe, otwory montażowe w tarczy oraz inne karby mechaniczne [77].

Wpływ na wartość naprężeń własnych ma profil tarczy, naprężenia powstające w trakcie montażu koła na oś oraz stopień luzu obręczy po nałożeniu na koło bose w kołach obręczowanych. Pęknięcia będące wynikiem tych naprężeń mogą przyjmować kierunek obwodowy jak i promieniowy [108].

Doświadczenia eksploatacyjne wskazują [1, 18], że proces powstawania pęknięcia zmęczeniowego zachodzi często pod powierzchnią toczną. Wartość naprężeń w głębszych warstwach obręczy jak i tarczy koła stanowi jedynie ułamek naprężeń maksymalnych kontaktowych, bez względu na to czy rozpatrujemy oddziaływania statyczne czy też uwzględniamy oddziaływania dynamiczne. Na rysunku 3.11 przedstawiono przełom obręczy koła pociągu szybkiego z widocznym miejscem inicjacji pęknięcia [18].



Rys. 3.11. Przykład inicjacji procesu pękania pod powierzchnią toczną koła kolejowego

Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych...

W wyniku eksploatacji zestawu kołowego występują utwardzenia mechaniczne lub przemiany fazowe powstałe wskutek obciążeń natury mechanicznej i termicznej, które powodują powstawanie struktur martenzytycznych lub bainitycznych [45].

W warstwie wierzchniej powierzchni tocznej, a nawet w głąb na kilkanaście milimetrów, mamy do czynienia z przemianą fazową w kierunku "martenzytu mechanicznego", charakteryzującą się wysoką twardością i kruchością. Warstwa ta (ze względu na głębokość jej zalegania) występuje w materiale obręczy nawet po obróbce skrawaniem [45, 52]. Lokalizacja stref powierzchni tocznej ze zmianami fazy materiału przy wykorzystaniu metod ultradźwiękowych lub wiroprądowych jest utrudniona [11, 16, 88, 89].

W kolejnych rozdziałach przedstawiono charakterystykę obecnie stosowanych metod defektoskopowych kolejowych zestawów kołowych wraz z nowoczesnymi technikami eksperymentalnymi pod kątem ich wykorzystania do diagnostyki zmęczeniowej materiału.

#### 4. Podstawowe metody defektoskopowe stosowane w kolejnictwie

Badania diagnostyczne kolejowych zestawów kołowych są wykonywane najczęściej za pomocą metod ultradźwiękowych oraz wiroprądowych, a uzupełniane techniką magnetyczno-proszkową i penetracyjną [13, 77, 84, 138].

Głównym celem stosowanych badań defektoskopowych jest wykrycie wad materiałowych (pustek) powstałych w procesie produkcji oraz uszkodzeń postępujących w eksploatacji, mogących zagrażać bezpieczeństwu ruchu pojazdów szynowych [13, 57, 77].

#### 4.1. Metoda ultradźwiękowa

Metodę ultradźwiękową do badań nieniszczących kolejowych zestawów kołowych w Polsce wprowadzono na szeroką skalę na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych [5, 6]. Wprowadzenie ultradźwiękowej kontroli osi spowodowało zmniejszenie liczby złamań osi w eksploatacji z około 55 rocznie na początku lat siedemdziesiątych do około 4–5 rocznie pod koniec lat siedemdziesiątych i utrzymaniu tego poziomu w latach następnych [6].

Mimo ciągłego udoskonalania metod defektoskopowych, nadal dochodzi do awarii, dlatego automatyzuje się te badania, eliminując subiektywność oceny czynnika ludzkiego z procesu diagnostyki. Na rysunku 4.1 przedstawiono głowice ultradźwiękową firmy Ultrassonic podczas badania powierzchni tocznej koła kolejowego [39, 159].





Rozwój automatycznych linii diagnostycznych nastąpił po katastrofie pociągu ICE (Eschede, 3 czerwiec 1998). W kilka lat po katastrofie na kolejach niemieckich powstało stanowisko do badań wieńców oraz tarcz kół kolejowych AURA (Automatische Ultraschal Rad Anlage), przedstawione na rys. 4.2 [32, 82, 83, 153]. W tym rozwiązaniu konstrukcyjnym do badania wieńców kół wykorzystuje się do 128 głowic ultradźwiękowych

(głowice normalne oraz skośne pracujące z częstotliwością od 2 do 4 [MHz]), przy czasie trwania badań około ośmiu minut [39, 50, 82, 83, 115, 153].



Rys. 4.2. Stanowisko automatycznego badania kół kolejowych zestawów kołowych AURA

Badania tarcz kół kolejowych przeprowadzane są na powierzchni tocznej z wykorzystaniem przetwornika fal powierzchniowych Rayleigha (służące do wykrywania wad w kierunku promieniowym) oraz przetwornika elektromagnetyczno-akustycznego EMAT (Electromagnetic Acoustic Transducer) zamontowanego w układzie torowiska. Przetwornik EMAT wytwarza liniowo spolaryzowane fale elektromagnetyczne powierzchniowe do wykrywania wad położonych w kierunku obwodowym [39]. Stanowisko to obecnie jest wykorzystywane do badań eksploatacyjnych pociągów dużych prędkości DB ICE. Na rysunku 4.3 przedstawiono konstrukcję przetwornika EMAT [39].



#### Rys. 4.3. Konstrukcja przetwornika EMAT

Nowoczesne badania ultradźwiękowe kół kolejowych są przeprowadzane podczas przejazdu taboru kolejowego nad przetwornikiem ultradźwiękowym zamontowanym w szynie bez wykorzystania środków sprzęgających, pomiędzy głowicą a kołem jak pokazano na rys 4.4 [50].



Rys. 4.4. Fotografia stanowiska podczas badania powierzchni tocznej koła

#### 4.2. Metoda wiroprądowa

Badania ultradźwiękowe zestawów kołowych ograniczone są do warstw głębszych powyżej dziesięciu milimetrów od powierzchni. Warstwy powierzchniowe i przypowierzchniowe są penetrowane metodą prądów wirowych. Za pomocą tej metody wykrywane są przede wszystkim takie nieciągłości materiałowe jak: pęknięcia, zawalcowania, wtrącenia, łuski, ubytki korozyjne [17, 39, 57, 77, 84].

Metody wiroprądowe można stosunkowo łatwo zautomatyzować i wykorzystywać w nowoczesnych liniach diagnostycznych. Przykład nowoczesnej zautomatyzowanej aparatury służącej do diagnostyki kół i osi kolejowych zestawów kołowych przedstawiono na rys. 4.5 [82].



Rys. 4.5. Zautomatyzowana sonda wiroprądowa podczas badania powierzchni tocznych kół oraz osi kolejowych

Głębokość przenikania prądów wirowych zależy od wartości częstotliwości pola elektromagnetycznego, wytwarzanego przez cewkę wzbudzającą oraz od właściwości

elektrycznych badanego materiału tj. przewodność elektryczna, konduktywność oraz przenikalność magnetyczna.

#### 4.3. Metody magnetyczne

W trakcie ciągłego rozwoju badań defektoskopowych opracowano wiele metod pomiaru magnetycznego strumienia rozproszenia z wykorzystaniem szerokiej gamy przetworników pomiarowych pola magnetycznego dla różnych sposobów i zakresów magnesowania [40, 41, 44, 47, 52, 74, 118, 120, 130]. W porównaniu z metodą magnetycznoproszkową, metody magnetyczne umożliwiają rejestrację cyfrową wyników pomiaru i obrazów wad, ponadto umożliwiają szybsze przeprowadzenie badań oraz są bardziej precyzyjne.

Najczęściej stosowane przetworniki pola magnetycznego to: przetworniki indukcyjne, transduktorowe, nadprzewodnikowe SQUID, magnetorezystancyjne, hallotronowe oraz magnetooptyczne [40, 41, 44, 74]. Urządzenia te znalazły również zastosowanie w badaniach nieniszczących [11, 34, 37, 47, 52, 57, 78, 87...89, 105...107, 117...131]. W praktycznych rozwiązaniach najszersze zastosowanie znajdują przetworniki hallotronowe [57]. Stosowane są w systemach wykrywania i lokalizacji ubytków korozyjnych oraz miejsc nagłej zmiany grubości (systemy Floorscaner i Pipescan). Przetworniki hallotronowe są również wykorzystywane w magnetowizji [49].

Magnetowizja jest to metoda pomiarowa, która umożliwia przedstawienie wyników badań w postaci map rozkładu pola magnetycznego nad powierzchnią materiału. Na rysunku 4.6 przedstawiono przykładowy schemat diagnostyki metodą magnetowizji próbki poddawanej obciążeniom na maszynie wytrzymałościowej [49].



Rys. 4.6. Przykład diagnostyki metodą magnetowizji – schemat układu pomiarowego

Innymi często wykorzystywanymi elementami w pomiarach magnetycznych są przetworniki magnetorezystancyjne. Praktyczne zastosowanie tych przetworników opisywano już w latach 2000-2002 jako narzędzie do defektoskopii magnetycznej kolejowych zestawów kołowych [43, 88, 89, 90, 126]. W badaniach powierzchni tocznej obręczy wykorzystano układ sprzężony z sondą pomiarową do wykrywania wad powierzchniowych oraz podpowierzchniowych w elementach pojazdów szynowych [126, 130].

W celu przeprowadzenia badań wykrywania zmian struktury materiału (np. od utwardzeń cieplnych), powierzchnię toczną jednego z kół poddano podgrzaniu punktowemu palnikiem acetylenowo – tlenowym. Zamieszczone wykresy przedstawiają przebieg natężenia pola koercji *Hc* po powierzchni tocznej przed (rys. 4.7a) i po podgrzaniu miejscowym (rys. 4.7b) [126].



Rys. 4.7. Natężenie pola koercji rejestrowany na powierzchni koła kolejowego; a - stan przed podgrzaniem miejscowym, b – po podgrzaniu miejscowym

Przeprowadzone pomiary wskazują miejsce podgrzania na powierzchni tocznej obręczy, co świadczy o możliwości wykrywania nie tylko defektów geometrycznych lecz również strukturalnych np. od podgrzania (hartowania), czy też zmian fazowych (biała warstwa martenzytu). Przetworniki magnetorezystancyjne zostały również wykorzystane do oceny naprężeń wewnętrznych w materiałach ferromagnetycznych [127, 128].

#### 5. Przegląd technik wyznaczania stopnia zmęczenia materiału

Rozwój badań nad uszkodzeniem materiału był od początku związany z poszukiwaniem miary uszkodzenia. W badaniach doświadczalnych stosowano różne techniki bezpośrednie i pośrednie wykorzystujące metody: optyczne, obserwacje zmian własności fizycznych i mechanicznych materiału w czasie powstawania uszkodzenia zmęczeniowego [14, 47, 55, 56, 58, 70, 103, 111, 113, 116].

Badania doświadczalne zmierzały początkowo do określenia wytrzymałości i trwałości zmęczeniowej [70]. Progres dyscypliny nauki zwanej mechaniką pękania wpłynął na rozwój technik badawczych, mających na celu wyznaczenie krytycznych parametrów rozprzestrzenienia się pojedynczej i sztucznie utworzonej szczeliny. Wyniki badań laboratoryjnych umożliwiły opracowanie wzorca, za pomocą którego przez porównanie danych pomiarowych przeprowadzono klasyfikację materiałów konstrukcyjnych pod względem odporności na kruche pękanie [55, 71].

Pierwszą miarę uszkodzeń zaproponował Kaczanow w 1958 roku [48]. Wprowadzony przez niego parametr uszkodzeń był odzwierciedleniem utworzonych pustek i pęknięć w materiale na wyznaczonej powierzchni.

Zgodnie z jego definicją Kaczanowa uszkodzenie określone było jak stosunek sumy powierzchni pustek i pęknięć leżących na badanej powierzchni ( $S_D$ ) do powierzchni wyróżnionego materiału (S). Miarę tę przedstawia zależność [14]:

$$D = \frac{\Sigma S_D}{\Sigma S},\tag{5.1}$$

Wartość D = 0 oznaczała materiał bez uszkodzeń, a D = 1 materiał całkowicie uszkodzony. Aby wyznaczyć ten parametr należy przeprowadzić badania niszczące metalograficzne. Miara ta była przydatna jedynie w rozważaniach teoretycznych, ze względu na trudności z jej wyznaczeniem. Trudność pomiaru wynikła z trudności uwidocznienia pustek i pęknięć na powierzchni odniesienia oraz na wyznaczeniu te powierzchni [14].

W celu określenia parametru zmęczeniowego można stosować metody polegające na pomiarze wybranych, zmieniających wraz z postępem zniszczenia zmęczeniowego własności materiałowych [109, 111]. Często analizowaną własnością materiałową jest moduł Young'a czyli moduł sprężystości podłużnej materiału. Znając moduł Young'a próbki nieuszkodzonej i próbki uszkodzonej możemy wyznaczyć zależność (5.2) [14]:

$$D = 1 - \frac{E}{E'} \tag{5.2}$$

gdzie: D - parametr zniszczenia, E' - moduł Young'a dla materiału uszkodzonego, E - moduł Young'a dla materiału nieuszkodzonego

Pomiar modułu sprężystości wykonuje się na próbkach walcowych poddanych obciążeniom rozciągającym, dla których zakłada się jednorodny rozkład naprężeń i odkształceń w części pomiarowej. W przypadku zniszczenia zmęczeniowego, nie można zastosować takiego założenia, ponieważ jest to proces silnie zlokalizowany. Prawidłowa ocena zniszczenia materiału wyznaczana jest na podstawie wyników lokalnego pomiaru odkształcenia i naprężenia [93].

Inną metodą wyznaczenia stopnia zmęczenia jest analiza odpowiedzi materiału na obciążenia cyklicznie zmienne. W praktyce stosuje się dwa rodzaje testów: testy sterowane siłą (naprężeniem) lub przemieszczeniem (odkształceniem). W testach ze sterowaną siłą maszyna utrzymuje stałe naprężenie na skutek czego odkształcenie ulega zmianie. W drugim przypadku w trakcie testu utrzymywana jest stale odkształcenie co powoduje zmiany naprężenia [22, 25, 93].

Jedną z wielu propozycji dla testów sterowanych naprężeniem jest parametr zmęczeniowy wyrażony wzorem (5.3), lub dla testów, gdy zmianom ulega amplituda naprężenia parametr zniszczenia wyliczany jest z zależności (5.4):

$$D = 1 - \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \varepsilon_0},\tag{5.3}$$

gdzie:  $\Delta \varepsilon$ - amplituda odkształcenia materiału,  $\Delta \varepsilon_0$  - amplituda początkowej wartości odkształcenia materiału nieuszkodzonego.

$$D = 1 - \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_0},\tag{5.4}$$

gdzie:  $\Delta \sigma$  -amplituda naprężenia materiału,  $\Delta \sigma_0$  - amplituda początkowej wartości naprężenia materiału nieuszkodzonego.

W przypadku zniszczenia wysokocyklicznego, charakterystyka zmęczeniowa materiału w skali logarytmicznej jest zbliżona do liniowej a odkształcenia niesprężyste przyjmują bardzo małe, trudno mierzalne wartości. Odkształcenie niesprężyste możliwe jest do obserwacji, tylko wtedy gdy jest porównywalne lub większe od odkształcenia sprężystego. Taki warunek zachodzi w przypadku testów niskocyklowych [14, 55].

Uzasadniona wydaje się być próba zdefiniowania parametru zniszczenia materiału w oparciu o pracę odkształcenia plastycznego w cyklu obciążenia, odpowiadającą polu powierzchni zmęczeniowej pętli histerezy.

Parametr zniszczenia *D* jako funkcję pracy odkształcenia plastycznego w cyklu obciążenia zdefiniował Żuchowski w postaci [116]:

Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych...

$$D = 1 - \frac{W^P}{W_0^P},$$
 (5.5)

gdzie:  $W^P$  oznacza aktualną, a  $W_0^P$  początkową wartość pracy odkształcenia plastycznego w cyklu obciążenia.

Możliwe jest zdefiniowanie parametru *D* na podstawie wielkości takich jak: umowna granica plastyczności, wytrzymałość zmęczeniowa, wydłużenie lub przewężenie wyznaczone w statycznej próbie rozciągania [56, 71]. Przykładowy parametr zniszczenia wyznaczony za pomocą zmiany granicy plastyczności materiału, przedstawiono w postaci:

$$D = 1 - \frac{Re}{Re_0},\tag{5.6}$$

gdzie:  $R_e$  - granica plastyczności w momencie pomiaru,  $R_{e0}$  - granica plastyczności dla materiału nieuszkodzonego

Wartość wymienionych parametrów zmienia się pod wpływem postępującej degradacji materiału. Taka metoda wyznaczenia parametru *D* jest trudna w realizacji, a wyniki są obarczone dużymi błędami wynikającymi z niejednorodności właściwości mechanicznych pomiędzy poszczególnymi próbkami [23].

Przy wyznaczaniu stopnia degradacji zmęczeniowej możliwe jest zdefiniowanie parametru zniszczenia za pomocą pomiaru mikrotwardości materiału. Proponowane definicje parametru zniszczenia wg [56, 71] to:

$$D = 1 - \frac{G}{G_0} \text{ lub } D = \frac{G_0 - G}{G_0 - G_f},$$
(5.7)

gdzie: G - mikrotwardość w trakcie badania,  $G_0$  - mikrotwardość materiału nieuszkodzonego,  $G_f$  - wartości mikrotwardości odpowiadające innemu momentowi zniszczenia zmęczeniowego próbki

Pomiar mikrotwardości jest stosunkowo prosty do wykonania jak również do zautomatyzowania, lecz budzi wiele zastrzeżeń ze względu na to, iż zmiana mikrotwardości materiału jest efektem sumarycznym zjawisk zachodzących w materiale nie tylko od procesów zmęczeniowych. Te zjawiska to między innymi: wzrost gęstości dyslokacji, umocnienie odkształceniowe, wzmocnienie cykliczne a także enukleacja mikropęknięć [22].

W celu wykrycia zmian zmęczeniowych w materiale, pomiar własności mechanicznych przeprowadza się w specjalnie przygotowanym laboratorium wytrzymałościowym. Problemem jest wykorzystanie takich pomiarów dla rzeczywistych konstrukcji inżynierskich w trakcie eksploatacji, pomiary takie można wykonać jedynie w oparciu o inne własności fizyczne materiału ulegające zmianie podczas eksploatacji. Własności te powinny być łatwo mierzalne, a korelacja między nimi musi być potwierdzona eksperymentalnie.

# 5.1. Możliwości obecnie stosowanych metod defektoskopowych do diagnozowania procesów zmęczeniowych

Pomiar stopnia zmęczenia materiału metodą ultradźwiękową polega na monitorowaniu zmian propagacji fal ultradźwiękowych w próbce wraz z postępem uszkodzenia zmęczeniowego [35]. Metoda ta jest pośrednio związana z pomiarem modułu sprężystości podłużnej (moduł Young'a). Samo monitorowanie zmian modułu sprężystości jest bardzo utrudnione ze względu na to, że proces zmęczenia jest procesem silnie zlokalizowanym [35].

Technika pomiaru prędkości propagacji fal ultradźwiękowych, polega na założeniu, że zmiany modułu sprężystości spowodowane uszkodzeniem zmęczeniowym materiału powodują także zmianę prędkości propagacji fal ultradźwiękowych. Jest zatem możliwe wyznaczenie parametru zniszczenia z zależności [35]:

$$D = 1 - \frac{\rho' \cdot v_L^2}{\rho \cdot v_L^2},$$
 (5.8)

gdzie: *E* - moduł sprężystości podłużnej materiału nieuszkodzonego, *E'* - moduł sprężystości podłużnej materiału uszkodzonego,  $\rho$  - gęstość,  $\rho'$  - gęstość ośrodka uszkodzonego,  $v_L$  - prędkość sprężystej fali podłużnej.

Parametr uszkodzenia zmęczeniowego materiału możemy zatem wyznaczyć, znając wyłącznie prędkość propagacji fali ultradźwiękowej dla ośrodka z uszkodzeniami i bez uszkodzeń. Niestety metoda ta jest obarczona trudnościami, podobnymi do problemów występujących przy bezpośrednim pomiarze modułu sprężystości, czyli lokalnym charakterem uszkodzenia oraz zależnością wyniku od amplitudy naprężenia.

W celu wykorzystania technik ultradźwiękowych do wykrywania zmian zmęczeniowych materiału, niezbędne są dalsze badania w tej dziedzinie oraz modyfikacje sprzętu pomiarowego.

Przy określeniu stopnia zmęczenia materiału przydatne mogą okazać się badania wiroprądowe lub inne metody pomiaru spadku potencjału elektrycznego. Jest to związane z tym, że wraz ze wzrostem gęstości defektów sieci krystalicznej wzrasta oporność właściwa materiału, którą można zaobserwować poprzez pomiar spadku potencjału elektrycznego przy przepływie prądu.

Metoda prądów wirowych jest obiecującą metodą do pomiaru degradacji materiału, wywołanej zniszczeniem zmęczeniowym [83].

Inną techniką pomiaru uszkodzenia zmęczeniowego jest metoda oparta na analizie zmian właściwości magnetycznych np. za pomocą efektu Barkhauzena. Metoda ta polega na cyklicznym magnesowaniu próbki polem magnetycznym o niskiej częstotliwości [47]. Natomiast zmiany stopnia namagnesowania zwane szumem Barkhauzena są mierzone przy pomocy czujnika zbliżonego do powierzchni badanego materiału. Zmierzony sygnał jest rejestrowany w postaci napięciowej a jego wielkość reprezentuje zniszczenie zmęczeniowe [47, 70]. Metody magnetyczne nie zostały jednak w wiarygodny sposób zweryfikowane eksperymentalnie, ponieważ mierzony sygnał można również przypisać innym czynnikom, nie tylko stopniu degradacji materiału. Poważnym problemem jest również wpływ pola resztkowego emitowanego przez źródła zewnętrzne [17, 87].

#### 5.2. PHYBAL – metoda prognozowania czasu życia materiału

Phybal (Physically Based Lifetime Calculation) jest to metoda prognozowania czasu "życia" materiału bazująca na pomiarze naprężeń, temperatury oraz parametrów elektrycznych [98]. Badanie tą metodą polega na pomiarze wybranych własności fizycznych próbki w trakcie obciążeń zmęczeniowych. Wszystkie wartości pomiarowe ściśle zależą od zmian mikrostruktury, zmieniają się w każdym cyklu pracy, aż do procesu plastycznych deformacji. Badane parametry wykazują na interakcje z liczbą cykli oraz amplitudą naprężenia podczas zadawania naprężeń zmęczeniowych. Uproszczony schemat pomiaru z badań przestawia rysunek 5.1 [97].



Rys. 5.1. Schemat pomiaru parametrów zmiennych (temperatura, rezystancja, odkształcenie) za pomocą metody Phybal

Pomiary wykonano m.in. na próbkach ze stali stosowanej na koła monoblokowe, potwierdzając przydatność tej metody do diagnostyki zmęczeniowej wysoko obciążonych

materiałów konstrukcyjnych. Przykładowe wyniki próby metodą Phybal przedstawiono na rysunku 5.2 [98].



Rys. 5.2. Krzywe przedstawiające zmiany odkształceń plastycznych, temperatury oraz rezystancji próbki wraz z wzrostem liczby cykli

Opisana procedura badań umożliwia pomiar parametru materiału w czasie eksploatacji (losowy pomiar) oraz porównanie wyników z wynikami wzorcowymi w celu określenia stanu zużycia [97, 98].

### 5.3. PMMP – metoda prognozowania czasu życia materiału w oparciu o zmienność parametrów magnetycznych

Metoda diagnostyczna PMMP (Parametryczno Magnetyczna Metoda Pomiarowa) została opracowana w Katedrze Transportu Szynowego Politechniki Śląskiej w celu wykrywania zmian w strukturze materiału osi zestawu kołowego [43, 76, 122]. Aparaturę kontrolno-pomiarową wchodzącą w skład stanowiska PMMD przedstawiono na rys. 5.3.



Rys. 5.3. Widok stanowiska PMMD

Za pomocą specjalnie zbudowanej aparatury porównywano współczynniki przenikalności magnetycznej materiału osi z uwzględnieniem miejsc o innej strukturze

wywołanej obróbką cieplną, np. napawaniem (rys. 5.4). Wyniki przykładowego pomiaru współczynnika przenikalności magnetycznej przedstawiono na rys. 5.5 [122].



Rys. 5.4. Punkty pomiarowe badanej osi



Rys. 5.5. Przebieg zmian współczynnika przenikalności  $k \cdot \mu_r$  w różnych strefach konstrukcji, gdzie: k – parametr aparaturowy

Na wykresie punkty pomiaru od a1 do c1, są kolejnymi obszarami pomiarowymi na osi. Wykres ten przedstawia wynik pomiaru parametru przenikalności magnetycznej w tych punktach. Obszar napawania naprawczego oznaczono jako punkt c1. Punkty skrajne będące obszarami materiału rodzimego odbiegają wartością przenikalności w sposób istotny od obszaru napawanego. Badania te wykazały, iż za pomocą technik magnetycznych możliwe jest wskazanie stref w materiale o odmiennej strukturze.

Do oceny stopnia zmęczenia materiału za pomocą badań magnetycznych zaproponowano zależność [124, 130]:

$$D_M = k \frac{\mu_r}{\mu_c} = f(\varepsilon, N) \ [-], \tag{5.9}$$

gdzie:  $D_M$  - magnetyczny wyznacznik zmęczenia,  $\varepsilon$  - odkształcenie plastyczne, N - liczba cykli zmęczeniowych,  $H_c$ - natężenie koercji,  $\mu_r$ - magnetyczna przenikalność względna, k - współczynnik proporcjonalności

Przedstawiona zależność pozwala na wykreślanie magnetycznej krzywej zmęczenia dla materiału ferromagnetycznego, ułatwiającej badanie aktualnego stanu elementu i przewidywania jego trwałości.

Wiedza uzyskana w warunkach laboratoryjnych o zmianach parametrów magnetycznych w funkcji zmęczenia materiału umożliwi badanie elementów konstrukcyjnych także w warunkach eksploatacyjnych. Korelacja miar mechanicznych i magnetycznych jest możliwa i została wykazana w skali laboratoryjnej dla próbek ze stali niskowęglowych i niskostopowych.

#### 5.4. Metody radiacyjne

W metodach radiacyjnych wykorzystuje się zjawiska towarzyszące promieniowaniu jonizującemu, a przede wszystkim zjawisko fotochemiczne. Promieniowanie jonizujące posiada zdolność przenikania przez różne materiały oraz zdolność naświetlania błony fotograficznej. Ilość promieniowania przenikającego przez materiał zależy od jego rodzaju, a dla tych samych materiałów od ich grubości i obecności defektów. Stosuje się promieniowanie rentgenowskie – X (radiografia) lub promieniowanie gamma –  $\gamma$  (gammagrafia). Na rysunku 5.6 przedstawiono schemat powstawania obrazu rentgenowskiego.



Rys. 5.6. Schemat powstawania radiogramu podczas badania radiograficznego lub gamma graficznego

Zaletą badań radiograficznych jest głównie możliwość badania dowolnych materiałów, dobra wykrywalność defektów stanowiących ubytek grubości badanego obiektu (od około 5%) oraz trwały wynik badania w postaci radiogramu. Na wywołanej błonie otrzymuje się dwuwymiarowy, płaski obraz, będący rzutem badanego obiektu lub jego fragmentu (rys. 5.7).

Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych...



#### Rys. 5.7. Obraz z radiogramu

Podstawowe problemy badań radiograficznych wynikają z szkodliwości promieniowania jonizującego oraz konieczności dostępu do obu stron badanego obiektu.

W transporcie kolejowym metody radiacyjne wykorzystywane są np. do badań spoin szyn w torze, kół zestawów kołowych, spoin ram wózków kolejowych [77].

Kolejną metodą radiacyjną jest radiografia neutronowa (Neutron Radiography (NR)). Jest ona stosowana na mniejszą skalę niż radiografia promieniowaniem rentgenowskim czy gamma – już w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku stała się rutynową metodą defektoskopową [57]. Początkowo nie spotkała się ona z tak powszechnym zainteresowaniem jak radiografia rentgenowska. Wykorzystanie neutronów w radiografii napotyka na trudności z powodów: wysokich kosztów źródeł neutronów odpowiednich do celów radiografii oraz problemów związanych z bezpieczeństwem przy ich stosowaniu. Neutrony jako cząstki pozbawione ładunku elektrycznego są bardzo przenikliwe [46].

Na rysunku 5.8 przedstawiono porównanie obrazów z radiografii rentgenowskiej i radiografii neutronowej [154].



Rys. 5.8. Widoczne różnice pomiędzy radiografią X (a) i radiografią neutronową (b)

Na rysunku 5.9. przedstawiono metodę diagnostyki pompy wtryskowej silnika za pomocą radiografii neutronowej [154].



Rys. 5.9. Pompa wtryskowa do silnika diesla oraz jej radiogram neutronowy

Pomimo faktu, iż w Polsce istnieje możliwość stosowania tej metody badawczej (w ograniczonym zakresie, tj. z wykorzystaniem reaktora jądrowego Maria w Instytucie Energii Atomowej Świerku – Środowiskowe Laboratorium Neutronografii – na obiektach o małych rozmiarach do 60 [cm]), to jednak poza nielicznymi próbami nie prowadzi się aktualnie żadnych badań dla potrzeb przemysłu [46].

#### 5.5. Diagnostyka termograficzna i termowizyjna

Zjawisko wzrostu ciepła właściwego materiału pod wpływem obciążeń cyklicznych, może służyć teoretycznie do określenia stopnia degradacji materiału, jednakże pomiary zmiany ciepła właściwego materiału konstrukcji są bardzo skomplikowane w warunkach eksploatacyjnych [26, 67].

Termografia to technika zobrazowania i rejestracji pól temperatury powierzchni badanych obiektów dzięki detekcji promieniowania podczerwonego pochodzącego od tych obiektów [63]. W wielu dziedzinach przemysłu temperatura jest istotnym parametrem, którego monitorowanie pozwala na wyznaczenie lokalnych różnic temperatur. Różnice te mogą wskazywać nieprawidłowości mogące prowadzić do uszkodzeń maszyn i urządzeń (przegrzewanie się), mogą zatem być wykorzystywane do detekcji defektów w materiałach. Przykład diagnostyki termowizyjnej w formie termogramu przedstawiono na rys. 5.10 [155].



Rys. 5.10. Przykład diagnostyki termowizyjnej wirnika silnika elektrycznego, po lewej zdjęcie zębów w pierścieniu zwierającym oraz termogram zębów, na którym zaznaczono ząbek z defektem

Nagrzany indukcyjnie wirnik bada się z wykorzystaniem kamery termowizyjnej, a uzyskane termogramy analizuje się pod kątem nieprawidłowości (umożliwia to identyfikację defektów w ząbkach wirnika pomimo braku ich zewnętrznych objawów).

Proces zniszczenia zmęczeniowego jest możliwy do weryfikacji za pomocą termowizji. Pomiar temperatury jest bardzo czuły na zakłócenia spowodowane działaniem np. zewnętrznych źródeł ciepła. W praktyce okazuje się że badania termograficzne mogą służyć co najwyżej do lokalizacji najbardziej narażonych na zniszczenie miejsc elementów konstrukcji.

#### 5.6. Technika anihilacji pozytonów

W ostatnich latach coraz częściej stosowaną metodą badań struktury materiałów jest technika anihilacji pozytonów [29]. Interpretacja otrzymywanych wyników jest stosunkowo prosta i wystarczająco jednoznaczna. Metoda ta jest czuła na zaburzenie struktury elektronowej wywołanej brakiem jonów w pozycjach węzłowych.

Pozyton jako dodatnia cząstka "stara się" je zastąpić, ale tylko do czasu jego anihilacji. Pozyton w próżni może utworzyć stan związany z elektronem, tworząc swoisty, neutralny atom "wodoropodobny", określany mianem pozytu. Śledząc anihilacje pozytonium, można uzyskać dodatkowe informacje, charakteryzujące materię skondensowaną [53].

Przyjmuje się, że średni czas anihilacji pozytonu jest miarą stopnia degradacji struktury materiału. Wystrzelone pozytony ulegają znacznie dłuższej anihilacji w defektach struktury takich jak dyslokacje czy wakansy, ze względu na dłuższy czas potrzebny do

napotkania elektronu. W momencie anihilacji pozytonu generowana jest wiązka promieniowania gamma, którą jest na tyle silna, że współczesne techniki badań pozwalają na jego rejestrację. Badania doświadczalne wykazały, iż istnieje zależność pomiędzy stopniem uszkodzenia materiału, a średnim czasem anihilacji pozytonu [111].

Średni czas anihilacji pozytonów ulega nasyceniu przy już niewielkim stopniu nieuporządkowania struktury krystalicznej, co znacznie ogranicza stosowanie tej metody w ocenie stopnia zmęczenia materiału.

#### 5.7. Emisja akustyczna

Emisja akustyczna rejestrowana w trakcie deformacji materiału wywołanej zniszczeniem zmęczeniowym, może dostarczyć informacji o tym procesie [39]. Zakłada się, że każde zdarzenie w procesie deformacji materiału takie jak: poślizg defektu sieci krystalicznej, dekohezja materiału lub gwałtowny przyrost długości mikroszczelin wiąże się z uwolnieniem porcji energii, której część zamienia się na wibracje odbierane w postaci sygnału akustycznego [109].

Różne parametry sygnału akustycznego próbowano korelować ze stopniem zmęczenia materiału, t.j.: proste zliczanie impulsów, częstotliwość lub prędkość narastania zliczonych impulsów, jednakże obecne badania są na etapie eksperymentów. Jest to metoda nowatorska w badaniu stopnia degradacji materiału, a obecnie największym problemem jest niwelacja wpływu zakłóceń na pomiar [35, 109].

#### 5.8. Obserwacje metalograficzne

Badania materiałów można przeprowadzać na podstawie obserwacji jego struktury. Obecna technologia pozwala na wykrycie wad struktury krystalicznej oraz szczelin już od 0,1 [µm]. Służą do tego: mikroskopy skaningowe (SEM), mikroskopy transmisyjne (TEM) oraz mikroskopy optyczne. Istnieją również inne zaawansowane urządzenia dające możliwości obserwacji defektów sieci krystalicznej, wśród nich znajdują się: mikroskopia sił atomowych (AFM), skaningowa mikroskopia tunelowa (STM) oraz mikroskop ultradźwiękowy (SAM).

W związku z tym, iż zniszczenie zmęczeniowe w początkowej fazie polega na generowaniu i koncentracji defektów sieci krystalicznej, parametry uszkodzenia zmęczeniowego są definiowane w oparciu o obserwację tych defektów [42, 58, 60, 113]. Podejmowane są również próby definiowania parametrów zniszczenia opartych na obserwacji mikroszczelin [113], liczbą dyslokacji [60], wymiarze komórki dyslokacyjnej [58], odległości między pasmami poślizgu [42].

36
Metody takie jak mikroskopia optyczna, interferometria siatkowa czy plamkowa lub holografia optyczna wykrywają zmiany mikrogeometrii powierzchni, lecz są bezużyteczne w przypadku, gdy inicjacja pęknięcia zmęczeniowego jest zlokalizowana pod powierzchnią badanego materiału. Dodatkowo, zmiany mikrogeometrii powierzchni następują w późnym etapie procesu niszczenia zmęczeniowego (ostatnie 20% trwałości zmęczeniowej) wobec tego nie mogą być podstawą do wczesnego wykrywania zmęczenia materiału.

## 6. Uzasadnienie stosowania metod magnetycznych w badaniach zmęczenia materiału

Zmiany właściwości magnetycznych materiału wynikające z obciążeń eksploatacyjnych potwierdzają przydatność stosowania technik magnetycznych w badaniach diagnostycznych. Związki wielkości magnetycznych (efekt Villariego [38, 117, 118], zmęczenie mechaniczne materiału [123]) i elektrycznych (Physically Based Lifetime calculation [98]) z obciążeniami mechanicznymi są dowodami na możliwości ich stosowania w diagnostyce zmęczeniowej.

Zmienność parametrów magnetycznych jest ściśle powiązana z składem chemicznym materiału i charakterem obciążeń eksploatacyjnych [10, 43, 47, 49, 52, 76, 78, 87, 88, 89, 105, 106]. W materiałach ferromagnetycznych, istnieje związek pomiędzy podatnością magnetyczną (6.1), a natężeniem pola koercji  $H_c$ .

$$\chi = \mu_r - l, \tag{6.1}$$

gdzie:  $\chi$  - podatność magnetyczna,  $\mu_r$  – względna przenikalność magnetyczna (wielkość bezwymiarowa).

Związek ten jest znany i dla danego materiału jest wielkością stałą, jak podaje zależność [10]:

$$\chi \cdot H_c = const , \qquad (6.2)$$

Uwzględniając wpływ struktury domenowej poprzez efektywną grubość ścianek domenowych  $\delta$  i średnią szerokość domen  $L_D$ , to zależność (6.2) przyjmie postać [38]:

$$\chi \cdot H_c \le J_s \cdot \frac{\delta}{L_D},\tag{6.3}$$

gdzie:  $J_s$  –polaryzacja magnetyczna nasycenia, jest maksymalną wartością polaryzacji magnetycznej, uzyskiwaną gdy wzrastające natężenie zewnętrznego, magnesującego pola H osiąga lub przekracza wartość natężenia pola nasycenia  $H_s$  (dalsze zwiększanie natężenia pola nie powoduje zauważalnego wzrostu stanu namagnesowania).

### 6.1. Związek parametrów magnetycznych z czynnikami zewnętrznymi

Pomiędzy właściwościami magnetycznymi materiałów ferromagnetycznych, a czynnikami zewnętrznymi i wewnętrznymi zachodzi szereg różnych zależności [10, 38, 80, 81]. Ze zbioru parametrów magnetycznych należy wyznaczyć te wielkości, których zmiana pod wpływem czynników zewnętrznych jest możliwa do rejestracji (wykazują wysoką

czułość na czynniki eksploatacyjne). Wybór odpowiedniej wielkości fizycznej umożliwi zastosowanie technik magnetycznych w badaniu zmęczenia materiału stali konstrukcyjnych.

Magnetyzacja nasycenia maleje liniowo wraz z procentowym wzrostem udziału składnika metalu niemagnetycznego. Zanieczyszczenia materiałem niemagnetycznym pogarszają właściwości magnetyczne materiału magnetycznego twardego. Znaczny wpływ odgrywają domieszki niemetaliczne jak węgiel, azot i siarka [78, 80].

Wpływ składu chemicznego jest tak zróżnicowany, że każdy materiał o określonym składzie chemicznym musi być niezależnie analizowany. Wpływ naprężeń mechanicznych wywołanych czynnikami zewnętrznymi (kształtowanie materiału, obróbka cieplna, zanieczyszczenia, magnetostrykcja spontaniczna) na wielkości magnetyczne materiału nie jest jednakowy dla wszystkich gatunków stali. Każdy gatunek stali wymaga niezależnych badań zmienności wielkości magnetycznych pod kątem możliwości zastosowania ich w diagnostyce.

Występujące zależności wielkości magnetycznych z czynnikami zewnętrznymi przedstawiono w tabeli 6.1 [10, 38, 78, 81].

	Parametry charakterystyczne						
Charakterystyka czynnika	μ _p przenikalność magnetyczna początkowa	μ _{max} przenikalność magnetyczna maksymalna	J _s Polaryzacja magnetyczna nasycenia	B _r Indukcja magnetyczna szczątkowa	H _c natężenie pola koercji		
Skład chemiczny	\$	$\updownarrow$	\$	€	€		
Zanieczyszczenia	→	$\downarrow$	_	€	<b>↑</b>		
Odkształcenia sprężyste $\lambda > 0$	$\downarrow$	↑	_	↑	$\downarrow$		
Odkształcenia sprężyste λ<0	$\downarrow$	$\downarrow$	_	$\downarrow$	↑		
Odkształcenia plastyczne λ>0	↓	$\downarrow$	_	$\downarrow$	↑		
Odkształcenia plastyczne $\lambda < 0$	$\downarrow$	↑	_	↑	↑ (		
Anizotropia kryształów	\$	↑	_	Ť	$\downarrow$		
Pełzanie wysokotemperaturowe	↑	↑	_	$\downarrow$	$\downarrow$		
Częstotliwość	↓	$\downarrow$	$\downarrow$	↑	↑ (		
Podmagnesowanie	↓	$\downarrow$	_	$\downarrow$	$\downarrow$		
Temperatura	\$	\$	$\downarrow$	$\downarrow$	$\downarrow$		
Objaśnienia oznaczeń: – bez wpływu, ↓ wzrost lub spadek, ↑ wzrost, ↓ spadek, λ –współczynnik magnetostrykcji							

Tabela 6.1. Czynniki wpływające na zmienność parametrów magnetycznych

Przykładowe zmiany parametrów magnetycznych stali ferromagnetycznej, przedstawiono na rysunku 6.1. Kolorem czerwonym zaznaczono krzywą pierwotnego magnesowania dla materiału poddanego hartowaniu (rys. 6.1a) i odkształceniu plastycznemu



(rys.6.1b), a kolorem czarnym krzywe pierwotnego magnesowania materiału przed odkształceniem plastycznym oraz przed hartowaniem [117].

Rys. 6.1. Zmiany parametrów magnetycznych dla przykładowej stali: (a) - w wyniku hartowania; (b) - w wyniku odkształcenia plastycznego

### 6.2. Pętla histerezy magnetycznej

Najważniejszymi czynnikami zewnętrznymi wpływającymi na parametry magnetyczne materiału są temperatura i naprężenia. Zmiana przenikalności magnetycznej materiału w ustalonej temperaturze może być wywołana między innymi: procesem obróbki plastycznej, procesem obróbki cieplnej, szybkością chłodzenia, czynnikiem chłodzącym, relaksacją naprężeń, czasem starzenia, obciążeniami sprężystymi i zmęczeniowymi, pełzaniem nisko i wysokotemperaturowym [10].

Jednym ze sposobów oceny materiału ferromagnetycznego jest porównywanie aktualnego stanu powierzchni i kształtu pętli histerezy magnetycznej z stanem powierzchni przed zadanymi naprężeniami zmęczeniowymi.

Podstawowym parametrem określającym własności magnetyczne materiału jest podatność magnetyczna, która opisuje oddziaływanie pola magnetycznego na właściwości materiału. Podatność magnetyczna na jednostkę objętości zdefiniowana jest jako.

$$\chi = \frac{M}{H} \left[ - , \right]$$
(6.4)

gdzie: *M* magnetyzacją na jednostkę objętości lub wektorem namagnesowania, *H* jest wartością wektora pola magnetycznego. Podatność magnetyczna jest jednostką bezwymiarową.

Zewnętrzne pole magnetyczne, działające na materiały o strukturze domenowej powoduje wzrost objętości domen, przesuwając ich ścianki domenowe w kierunku zbliżonym do kierunku tego pola [10].

Ustawienie domen zgodnie z zewnętrznym polem magnetycznym powoduje wzrost indukcji magnetycznej w próbce (krzywa pierwotnego namagnesowania - rys. 6.2) aż do osiągnięcia nasycenia (wartość  $B_S$  na rys. 6.2). Odpowiada to całkowitemu uporządkowaniu domen. Dalszy nieznaczny wzrost indukcji magnetycznej w próbce spowodowany będzie tylko wzrostem natężenia pola magnetycznego H (gdyż wszystkie domeny są już uporządkowane). Przy zmniejszaniu natężenia pola magnetycznego H, indukcja próbki będzie maleć, ale wzdłuż innej krzywej (krzywa II z rys. 6.2). Oznacza to, że domeny nie wracaja do pierwotnej orientacji. Przy całkowitym zaniku pola H - indukcja w próbce posiadać będzie wielkość Br rożną od zera, zwaną indukcją szczątkową (pole indukcja szczątkowa, pozostałość magnetyczna). remanencji, Przyłożenie pola magnetycznego H w kierunku przeciwnym, do wartości Hc zwanym polem koercji, spowoduje spadek indukcji do zera. Przy dalszym wzroście pola natężenia H w tym kierunku indukcja będzie rosła osiągając nasycenie w kierunku przeciwnym ( $-B_s$ ). Przy zmniejszaniu pola H (dla tego kierunku) sytuacja staje się symetrycznie podobna i krzywa magnesowania zamyka się w punkcie BS (rys. 6.2).



Rys. 6.2. Pętla histerezy magnetycznej z charakterystycznymi punktami

Podstawowym parametrem opisującym własności magnetyczne materiału jest jego względna przenikalność magnetyczna  $\mu_r$  wyrażona wzorem:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 \cdot H},\tag{6.5}$$

gdzie  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni =  $4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{H}{m} = \frac{T \cdot m}{A}\right]$ ,  $\mu_r$  - przenikalność magnetyczna względna, jest wielkością bezwymiarową.

Każdy rodzaj ferromagnetyka (materii posiadającej uporządkowane momenty magnetyczne) charakteryzuje się własnym kształtem pętli histerezy. Ponieważ w diagnostyce magnetycznej stan elementu oceniamy na podstawie zmian wartości składowej stycznej pola magnetycznego musimy pamiętać o zależności pomiędzy polaryzacją magnetyczną J, a natężeniem wnętrza próbki  $H_i$  [38]:

$$J = \mu_0 \cdot H \frac{\chi}{1 + \chi N_M}$$
 [T], (6.6)

$$H_i = H \frac{\chi}{1 + \chi N_M} , \ H - H_i = N_M \frac{J}{\mu_0}.$$
 (6.7)

Współczynnik odmagnesowania  $N_M$  uzależniony jest od geometrii elementu. Pętla histerezy materiału próbki otwartej wprowadzonej w zewnętrzne pole magnetyczne zostaje pochylona o wartość  $\frac{N_M J}{\mu_0}$  (rys. 6.3).



Rys. 6.3. Przesunięcie krzywej magnesowania, gdzie: krzywa: 1 - J jako funkcja; 2 - prosta przesunięcia  $tg \beta = N_M/\mu_0$ ; 3 - J jako funkcja:  $H_i = H - N_M J/\mu_0$ ,  $J_R$  - polaryzacja magnetyczna szczątkowa krzywej 3,  $J'_R$  - polaryzacja magnetyczna szczątkowa krzywej 1

Istotnym czynnikiem z punktu widzenia diagnostyki magnetycznej jest niezmienność wartości natężenia koercji. Charakterystyczna wartość strat na histerezę (pole objęte krzywa histerezy magnetycznej) pozostaje także bez zmian [38]. Zmianie ulega wartość pozostałości magnetycznej. Przyjmuje ona nową wartość nazwaną pozorną pozostałością magnetyczną. Przenikalność pozorna jest pomniejszona w stosunku do wartości rzeczywistej zgodnie z zależnością [81]:

$$\mu' = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + N_M},\tag{6.8}$$

Powiększenie pola obiegu histerezy spowodowane jest stratami z prądów wirowych. Im większa jest częstotliwość prądu zmiennego, tzn. im straty te są większe, tym bardziej poszerza się pętla histerezy magnetycznej. Pole powierzchni objęte krzywą histerezy w polu magnetycznym zmiennym jest obrazem strat całkowitych energii danego materiału ferromagnetycznego podczas przemagnesowywania [38].

Przebieg magnetycznych pętli histerezy stali P54T w stanie przed i po eksploatacji przedstawiono na rys. 6.4. Kolorem niebieskim materiał obręczy nowy (nieobciążony) różni się od przebiegu materiału po eksploatacji (pętla histerezy magnetycznej koloru czerwonego).



Rys. 6.4. Pętle histerezy magnetycznej dla materiału przed eksploatacją i po eksploatacji

Dla małych wartości natężenia pola magnesującego zanotowano znaczne zmiany w nachyleniu krzywej pętli histerezy.



Rys. 6.5. Przykładowy schemat układu pomiarowego do wyznaczenia pętli histerezy magnetycznej

Natężenie pola magnetycznego dla pętli histerezy przedstawionej na rys 6.4 dla układu pomiarowego z rys. 6.5, wyznacza się w następujący sposób:

spadek napięcia na rezystorze *R*₁ jest proporcjonalny do natężenia pola magnetycznego *H* [81], zgodnie z poniższą zależnością:

$$\frac{H}{działke} = \frac{D_{\chi} z_1}{R_1 l} \cdot 10^2 \left[\frac{A}{m}/działke\right], \tag{6.9}$$

gdzie: *D_x* – współczynnik odchylania wzmacniacza X [V/Dz],

z1 – liczba zwojów uzwojenia pierwotnego,

- $R_1$  szeregowa rezystancja w uzwojeniu pierwotnym [ $\Omega$ ],
- *l* średnia droga strumienia magnetycznego [cm].

Przy znanym współczynniku odchylania oscyloskopu w kierunku osi Y, indukcja magnetyczna dla jednaj działki odchylenia na ekranie opisana jest zależnością [38]:

$$B/_{\text{działke}} = \frac{R_c C_c D_y}{z_2 S} \cdot 10^4 \, [\text{T}/działke], \tag{6.10}$$

gdzie:  $R_c$  – rezystancja układu całującego [M $\Omega$ ],

 $C_c$  – pojemność układu całkującego [µF],

D_Y – współczynnik odchylania wzmacniacza Y [V/Dz],

*z*₂ – liczba zwojów uzwojenia wtórnego.

W badaniach magnetycznych materiałów ferromagnetycznych jakimi są stale konstrukcyjne należy zwrócić szczególną uwagę na dokładność pomiaru. W materiałach tych przenikalność magnetyczna jak i natężenie koercji zmieniają się w warunkach eksploatacyjnych od kilku do kilkunastu procent [124, 130].

### 7. Tezy i założenia pracy

Przeprowadzona analiza literaturowa oraz wykonane badania własne i prace Katedry Transportu Szynowego [76, 88, 89, 124, 129, 130] pozwoliły na zdefiniowanie tezy pracy:

Wskazanie istotnego parametru magnetycznego, zależnego od obciążeń zmęczeniowych wahadłowych, w stalach obręczy zestawów kołowych oraz opracowanie sposobu jego pomiaru stworzy nową metodę wykrywania procesów zmęczeniowych, poprzedzających proces pękania.

Powyższą tezę wprowadzono przy przyjęciu następujących założeń:

- a) Stale ferromagnetyczne poddane obciążeniom: zmęczeniowym, mechanicznym, termicznym, pełzaniu nisko i wysokotemperaturowym lub odkształceniom plastycznym zmieniają swoje parametry magnetyczne w stosunku do stanu wyjściowego [10, 38, 78],
- b) Zmęczenie stali konstrukcyjnych, spowodowane długotrwale działającymi naprężeniami mechanicznymi - zmienia strukturę materiału, która determinuje jego właściwości magnetyczne. Okresowe badanie właściwości magnetycznych elementów stalowych umożliwia śledzenie (detekcję) postępującego zmęczenia w czasie eksploatacji,
- c) Zidentyfikowanie parametrów o największej podatności (zakresie zmian od procesów zmęczeniowych) dla badanej stali umożliwia wybór metody diagnozowania zmęczeniowego materiału,
- d) Badanie materiału metodą magnetyczną bazuje na wiedzy o zmienności parametrów magnetycznych stali w procesie eksploatacji, a założeniem tej pracy było tworzenie tej wiedzy.

## 8. Cel pracy

Ze względu na zachodzące zależności pomiędzy parametrami magnetycznymi stali ferromagnetycznych od czynników zewnętrznych i wewnętrznych (naprężenia, odkształcenia, zanieczyszczenia, temperatura) w pracy skierowano uwagę na jakościowe i ilościowe zmiany tych parametrów w funkcji obciążeń zmęczeniowych.

Celem pracy jest opracowanie metody oceny zmęczeniowej stali wykorzystywanej w kolejnictwie metodą magnetyczną. Metodyka badań opiera się na laboratoryjnym wyznaczeniu zakresów zmian wybranych parametrów magnetycznych t.j. natężenie koercji, przenikalność magnetyczna oraz tangens kąta strat pod wpływem zadanych obciążeń zmęczeniowych. Celem badań jest wskazanie parametru istotnego dla diagnostyki zmęczeniowej oraz opracowanie metodyki jego pomiaru.

### 9. Badania zmęczeniowe stali stosowanych na koła i obręcze kolejowe

Część badawcza pracy składa się z etapu badań zmęczeniowych oraz badań magnetycznych. Testy pozwoliły na określenie zależności zmian parametrów magnetycznych od obciążeń eksploatacyjnych. Na rysunku 9.1 przedstawiono poszczególne etapy badań.



Rys. 9.1. Przyjęte w pracy etapy realizacji badań

Badania zmęczeniowe polegały na zadaniu obciążeń zmęczeniowych przy jednoczesnej rejestracji odkształceń plastycznych. Rejestracja odkształceń umożliwiła określenie sposobu oddziaływania materiału na zadane obciążenia oraz na opisanie tego procesu.

Badania składu chemicznego, mikrostruktury oraz wtrąceń niemetalicznych były realizowane w Laboratoriach Katedry Nauki o Materiałach, Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej.

Badania jednorodności miały na celu wyselekcjonowanie próbek o zbliżonych własnościach fizycznych na podstawie porównania wielkości fizycznych tj. natężenie koercji magnetycznej oraz indukcyjności.

Badania magnetyczne materiału prowadzono w Instytucie Nauki o Materiałach Uniwersytetu Śląskiego. Pomiary te przeprowadzono za pomocą nowoczesnych urządzeń badawczych będących na wyposażeniu Laboratorium Nauki o Materiałach.

Analizę otrzymanych wyników przeprowadzono za pomocą narzędzi statystycznych tj: Statistica 9 firmy Statsoft, Origin 8.5 firmy Orginlab oraz arkusza kalkulacyjnego Excel 2007 firmy Microsoft. Analiza wyników badań umożliwiła wyciągnięcie odpowiednich wniosków będących zakończeniem niniejszej rozprawy.

## 9.1. Przygotowanie próbek

Przedmiotem badań były stale wykorzystywane na koła i obręcze kolejowe. Próbki tego materiału o kształcie klepsydrycznym wykonano z cylindrycznych prętów o średnicy 9 [mm], wyciętych za pomocą elektrodrążarki iskrowej. Materiał pobrano z wycinków obręczy kolejowej oraz koła monoblokowego (rys. 9.2).



Rys. 9.2. Wycinki obręczy kolejowej i koła monoblokowego

Pręty materiału z obręczy kolejowej i koła monoblokowego zostały wycięte w kierunku promieniowym i obwodowym do osi zestawu kołowego (rys. 9.3). Próbki wycięto w różnych kierunkach w celu sprawdzenia wpływu obróbki plastycznej (walcowania) podczas procesu produkcji na parametry magnetyczne materiału.



Rys. 9.3. Kierunki wycięcia próbek

Zewnętrzny kształt próbek uzyskano z toczenia, a kształt wewnętrzny klepsydryczny utworzono za pomocą frezowania obwiedniowego. Kształt i wymiary próbek zostały zaprojektowane w oparciu o normę ASTM (rys.9.4) [4].



Rys. 9.4. Kształt i wymiary próbek [mm]

Klepsydryczny kształt części pomiarowej próbki zapewniał koncentrację naprężeń w jej najmniejszym przekroju [14, 93].

## 9.2. Badanie struktury materiału

Badania struktury stali P54T i ER7 realizowano w Laboratorium Katedry Nauki o Materiałach Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej.

Do badań metalograficznych użyto mikroskopu świetlnego Olympus GX71 oraz mikroskopu skaningowego Hitachi S-4200. Badania za pomocą mikroskopu świetlnego Olympus GX71 przeprowadzono w polu jasnym przy powiększeniach do 1000 razy. Mikroskop skaningowy Hitachi S-4200 sprzężony był z systemem EDS (Electronic Data System) do mikroanalizy rentgenowskiej. Obserwacje wizualne przy powiększeniu od 100 do 15 000 razy przeprowadzono na całej powierzchni zgładu każdej z próbek. Charakterystyczne elementy struktury ujawnione na każdej z próbek rejestrowano w formie obrazów cyfrowych. Dodatkowo dokonano analizy składu chemicznego ujawnionych wtrąceń przy użyciu mikroanalizy rentgenowskiej. W kolejnych rozdziałach zestawiono wyniki tych badań.

## 9.2.1. Analiza składu chemicznego badanej stali

Skład chemiczny badanej stali węglowej konstrukcyjnej P54T został przedstawiony w tablicy 9.1.

Stal	G		<i></i>	Р	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	
P54T C M		Mn	S1	Maksymalna zawartość pierwiastka w %							
Norma [148]	0,5÷0,58	0,6÷0,9	0,15÷0,4	0,04	0,04	0,3	0,3	0,3	0,05	0,05	
Próbka P1	0,58	0,86	0,36	0,019	0,019	0,02	0,02	0,04	0,01	0,001	

Tabela 9.1. Skład chemiczny stali P54T

Badana stal jest w stanie ulepszonym cieplnie tj. po hartowaniu w temp. 820÷850°C i odpuszczaniu w temp. 480÷630°C.

Kolejnym materiałem do badań była stal wykorzystywana na koła monoblokowe. Badany materiał pochodził z firmy Nizhnedneprovsky Tube Rolling Plant z Ukrainy, nr wytopu to 223382, został sprawdzony pod względem uzyskania świadectwa dopuszczenia wyrobu do eksploatacji w ruchu kolejowym w pracy badawczej [75].

Skład chemiczny materiału badanych kół monoblokowych przedstawia tabela 9.2.

Tabela 9.2 Skład chemiczny badanej stali na koła monoblokowe

Stal ER7	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Мо	V	Cr+Mo+Ni
	Maksymalna zawartość pierwiastka w %								
Norma [146]	0,52	0,8	0,4	0,3	0,3	0,3	0,08	0,06	0,50
Próbka Pu30	0,51	0,729	0,306	0,201	0,049	0,053	0,01	0,024	0,26

## 9.2.2. Analiza metalograficzna

Pobrany materiał stali, otrzymanej z wycinka obręczy kolejowej wykazywał strukturę ferrytyczno-perlityczną (rys. 9.5). Ferryt występował na granicach pierwotnych ziaren austenitu.



Rys. 9.5. Mikrostruktura stali na obręcze kolejowe, mikroskop świetlny, powiększenie: 1000x

Obrazy z mikroskopu skaningowego wykazały płytkową budowę perlitu. Na rys. 9.6a przedstawiono obraz z mikroskopu skaningowego Hitachi S-4200 sprzężonego z systemem EDS podczas obserwacji struktury badanej stali w powiększeniu x1800. W strukturze ujawniono wtrącenia niemetaliczne, głównie tlenki aluminium Al₂O₃ i siarczki manganu MnS (rys. 9.6 b, c).



Rys. 9.6. Płytkowa budowa perlitu, 3[mm] od środka próbki klepsydrycznej, pow. 1800x(a); obrazy wtrąceń niemetalicznych: Al₂O₃ pow. 3000x(b); MnS pow.3500x(c)

Spektrogramy wtrąceń niemetalicznych dla wyznaczonych punktów *pt1* i *pt 2* z rys. 9.6b przedstawiono na rys. 9.7 i 9.8.







Rys. 9.8. Spektrogram punktu 2 z rys. 9.6b

Wynik mikroanalizy rentgenowskiej tlenku aluminium  $Al_2O_3$  w punktach *pt1 i pt2* (rys. 9.6 b) przedstawiono w tabeli. 9.3.

pt	Mg-K	Al-K	Fe-K
a1(11)_pt1	8.03	76.75	15.22
a1(11)_pt2		2.20	95.58

Tabela 9.3. Udział wagowy pierwiastków w [%]

Spektrogramy wtrąceń niemetalicznych dla wyznaczonych punktów *pt1 i pt2* i *pt3* z rys. 9.6c przedstawiono na rysunkach od 9.9 do 9.11.



Rys. 9.9. Spektrogram dla punktu 1 z rys. 9.6c



Rys. 9.10. Spektrogram dla punktu 2 z rys. 9.6c



Rys. 9.11. Spektrogram dla punktu 3 z rys. 9.6c

Analizę składu chemicznego siarczku manganu przy użyciu mikroanalizy rentgenowskiej przedstawiono w tablicy 9.4.

pt	С-К	Al-K	S-K	Mn-K	Fe-K
41(13)_pt3	3.54	34.74	4.96	6.64	50.12

Tabela 9.4. Udział wagowy pierwiastków w [%]

Na podstawie badań metalograficznych stwierdzono, iż w strukturze poszczególnych próbek występują liczne wtrącenia niemetaliczne.

W związku z tym, iż na własności wytrzymałościowe materiału ma wpływ jego struktura, w tym liczba i charakter wtrąceń niemetalicznych, materiał przeznaczony do badań został wyselekcjonowany pod kątem jednorodności materiału w zaproponowanym przez autora pracy badaniu nieniszczącym, przedstawionym w rozdziale 10.1.

# 9.2.3. Badania metalograficzne materiału po zadanym cyklu obciążeń zmęczeniowych

Badanie struktury materiału miało na celu weryfikację zmian zachodzących w materiale pod pływem obciążeń eksploatacyjnych. Zdjęcia zgładów próbek do analiz metalograficznych wykonano w różnych przekrojach i miejscach przecięć próbek. W stosunku do stanu przed obciążeniem ujawniona struktura charakteryzowała się:

• większym rozdrobnieniem perlitu (rys. 9.12 a, b),



a)

Rys. 9.12. Widok obrazu z mikroskopu skaningowego próbek P1(a) i P4(b) poddanym obciążeniom zmęczeniowym pow. 2000x(a) i 4000x(b)

 utratą ciągłości materiału na niektórych wtrąceniach niemetalicznych, objawiających się jako pęknięcia wokół MnS (rys. 9.13),



- Rys. 9.13. Widok obrazu z mikroskopu skaningowego próbki P4 poddanym obciążeniom zmęczeniowym pow. 3500x.(a) i 2000x.(b) - utrata ciągłości materiału na niektórych wtrąceniach MnS
  - utratą ciągłości materiału na granicy wtrącenia niemetalicznego Al₂O₃(rys. 9.14),



- Rys. 9.14. Widok obrazu z mikroskopu skaningowego próbki P4 poddanym obciążeniom zmęczeniowym pow. 5000x (a); utrata ciągłości materiału na niektórych wtrąceniach Al₂O₃ (b)
  - silnym zdefektowaniem w warstwie przypowierzchniowej (rys. 9.15).

a)



Rys. 9.15. Widok obrazu z mikroskopu skaningowego próbki P1(a) i P4(b) poddanym obciążeniom zmęczeniowym pow. 2000x (a) i 1500x (b) – silne zdefektowanie w warstwie przypowierzchniowej

### 9.3. Badania zmęczeniowe

### 9.3.1. Procedura badań zmęczeniowych

Wszystkie rzeczywiste stopy metali doznają odkształceń niesprężystych mimo, iż nie są obciążane naprężeniami przekraczającymi granice plastyczności. Związane jest to z defektami struktury krystalicznej takimi jak: dyslokacje, wtrącenia czy wakanse.

Głównym celem badań zmęczeniowych było wyznaczenie związków magnetomechanicznych. Badania te zostały poszerzone o dodatkowe wyznaczenie parametrów zmęczeniowych na podstawie procedur realizowanych w IPPT PAN.

W badaniach wykorzystano procedurę badań zaproponowaną przez autora pracy [93], która okazuje się skuteczną i efektywną techniką dla tego typu badań zmęczeniowych. Za pomocą wyników tych badań można określić zarówno liczbę cykli do zniszczenia próbki, jak i wyznaczyć mechanizm rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych materiału w zależności od wartości amplitudy naprężenia.

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów naprężeń i odkształceń wyznaczana jest zmęczeniowa pętla histerezy. Szerokość zmęczeniowej pętli histerezy, ulega zmianie na skutek postępującego zniszczenia zmęczeniowego materiału próbki.



Rys. 9.16. Zmęczeniowa pętla histerezy w ujęciu schematycznym; gdzie:  $\sigma_a$  - amplituda naprężenia,  $\varepsilon_a$  - amplituda odkształceń,  $\Delta \varepsilon^i$ - odkształcenie niesprężyste w *i*-tym cyklu

Wielkość  $\Delta \varepsilon^{i}$  – odpowiada zakresowi odkształceń niesprężystych w cyklu obciążenia i jest parametrem mierzalnym, którego zmiana odzwierciedla postępujący proces zniszczenia zmęczeniowego badanego materiału [93]. W oparciu o zmierzone odkształcenie poprzeczne

możliwe było, przy znanym współczynniku Poissona, obliczenie odkształcenia wzdłużnego. Na rysunku 9.17 przedstawiono schemat blokowy stanowiska do badań wytrzymałościowych [21].



Rys. 9.17. Schemat blokowy stanowiska do badań wytrzymałościowych

Widok stanowiska z zamontowaną próbką wraz z zamontowanym ekstensometrem mierzącym odkształcenie poprzeczne pokazano na rys. 9.18 [21]. Badania wykonano na maszynie wytrzymałościowej MTS 858, z zakresem siły osiowej +/- 25 [kN] i momentu skręcającego +/- 200[Nm]. Maszyna wytrzymałościowa wyposażona była w sterownik cyfrowy TestStar II. Sterowanie realizowano przy pomocy oprogramowania MTS TestStar v. 4.0D + TestWare-SX v. 4.0D oraz 790.20 Fatigue Test Application.



Rys. 9.18. Ogólny widok stanowiska do badań zmęczeniowych

W procesie badań przyjęto najczęściej wykorzystywany do tego typu badań przebieg wahadłowy naprężeń zmęczeniowych (rys. 9.19), gdzie:  $\sigma_{min} = -\sigma_{max} = 0$ ,  $\sigma_{min} < 0$ , współczynnik amplitudowy cyklu  $R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = -1$  o częstotliwości zmian f = 20[Hz].



Rys. 9.19. Przyjęty w pracy przebieg cyklu naprężeń zmęczeniowych w czasie

Wyniki badań zmęczeniowych dla dwunastu próbek stali P54T (seria P) przedstawiono w tabeli 9.5.

Stal P54T – obręcz kolejowa							
Próbka	Średnica w najmniejszym przekroju [mm]	Pole przekroju poprzecznego [mm ² ]	Liczba cykli do zerwania próbki	Nominalna siła sterująca [kN]	Naprężenie nominalne [MPa]		
P1	3,964	12,342	3 300 000	4936,98	400		
P2	4,001	12,573	111 000	5029,31	400		
P3	4,017	12,673	119 241	4815,90	380		
P4	4,009	12,625	4 530 367	4544,95	360		
P5	4,087	13,118	58 044	5378,24	410		
P6	3,974	12,402	42 379	4960,67	400		
P7	4,043	12,841	134 139	4494,19	350		
P8	3,922	12,081	281 376	4107,56	340		
P9	3,972	12,391	336 570	4089,05	330		
P10	4,032	12,766	6 648 504	4085,23	320		
P11	4,013	12,646	5 182 432	4110,05	325		
P12	4,029	12,747	6 851 200	4270,36	335		

Tabela 9.5. Wyniki badań zmęczeniowych stali stosowanej na obręcze kolejowe

Wyniki badań zmęczeniowych dla dziewięciu próbek stali ER7 (seria Pu) przedstawiono w tabeli 9.6.

Stal ER7 – koło monoblokowe							
Próbka	Średnica w najmniejszy m przekroju [mm]	Pole przekroju poprzeczneg o [mm ² ]	Liczba cykli do zerwania próbki	Nominaln a siła sterująca [kN]	Naprężenie nominalne [MPa]		
Pu1	4,007	12,608	3 480	6303,94	500		
Pu2	4,036	12,792	93 029	5116,93	400		
Pu3	4,004	12,591	332 039	4784,54	380		
Pu4	4,007	12,611	17 419	5674,96	450		
Pu5	3,993	12,519	214 074	4381,75	350		
Pu6	4,018	12,680	2 500 000	3804,11	300		
Pu7	4,020	12,694	61 025	5331,32	420		
Pu8	4,024	12,716	435 955	4577,89	360		
Pu9	4,010	12,627	991 612	4166,83	330		

Tabela 9.6. Wyniki badań zmęczeniowych stali ER7

Pomiary odkształceń w wybranych cyklach obciążenia umożliwiają wyznaczenie krzywej Wöhlera z zarejestrowanego ostatniego cyklu przed zerwaniem próbki.

### 9.3.2. Wyznaczenie krzywej Wöhlera dla badanej stali

Na podstawie krzywej Wöhlera zaobserwowano różnice w zachowaniu się poszczególnych próbek stali P54T pod wpływem obciążeń zmęczeniowych. Próbki tej stali podzielono na trzy zasadnicze grupy oznaczone jako grupa: I, II i III [21]. Do grupy I zaliczają się próbki o nr: P4, P6, P7, P9, P10 i P11. Do drugiej grupy zaliczono próbki: P1, P2, P3 i P5. Trzecia grupę stanowią dwie próbki: P8 i P12.

Nierównomierne rozłożenie punktów krzywej Wöhlera dla próbek stali stosowanej na obręcze kolejowe, oznaczonej jako P może świadczyć o niejednorodności badanego materiału.

Na rys. 9.20 zilustrowano krzywe Wöhlera w skali półlogarytmicznej, dla dwóch podgrup próbek serii P (P54T) oraz próbek serii Pu (stal ER7) wyznaczoną na podstawie wyników z tabeli 9.5 i 9.6. Dla trzeciej podgrupy próbek serii P (próbka P8 i P12) wyznaczenie wytrzymałości zmęczeniowej na podstawie krzywej Wöhlera nie było możliwe.



Rys. 9.20. Krzywe Wöhlera próbek stali P54T (seria P) oraz ER 7 (seria Pu)

Wytrzymałość na rozciąganie stali P54T zawarta jest w przedziale od 750 [MPa] do 880 [MPa]. Wytrzymałość zmęczeniowa wynosi 330 [MPa]. Ułożenie punktów doświadczalnych dla próbek stali ER7 (seria Pu) widoczne na rysunku 9.21 jest bardzo regularne. Wytrzymałość na rozciągane stali ER7 zawarta jest w przedziale od 820 do 940 [MPa], a wytrzymałość zmęczeniowa wynosi 300 [MPa].





Wykres Wöhlera nie zawiera informacji o przebiegu procesu zniszczenia zmęczeniowego i daje zbyt mało danych do wyznaczenia jakichkolwiek podgrup. Pełniejszy obraz procesu zniszczenia materiału uzyskujemy poprzez analizę wyznaczonego parametru zniszczenia obrazującego przebieg lokalnych odkształceń niesprężystych próbki badanego materiału, w trakcie obciążeń zmęczeniowych [21, 22, 25, 96].

### 9.3.3. Pomiary lokalnych odkształceń niesprężystych

W przyjętej metodyce badań oprócz rejestracji liczby cykli do zniszczenia próbki otrzymywane były również zmęczeniowe pętle histerezy czyli zależności naprężeń od odkształceń. Na ich podstawie wyznaczono zgodnie z opisaną wcześniej procedurą zakres odkształceń niesprężystych  $\Delta \varepsilon^i$ , którego zmiany przedstawiają akumulację zniszczenia zmęczeniowego materiału. Na rysunku 9.22 i 9.23 przedstawiono przykładowe, zmęczeniowe pętle histerezy dla dwóch przykładowych próbek stali P54T (P2 i P11). Załącznik 2, zawiera wyniki zmęczeniowych pętli histerezy wszystkich badanych próbek. Oś pozioma obrazująca odkształcenie jest w jednostkach względnych.



Rys. 9.22. Zmęczeniowe pętle histerezy dla przykładowej próbki P2



Rys. 9.23. Zmęczeniowe pętle histerezy dla przykładowej próbki P11

Z analizy tych rysunków wynika, że badany materiał pochodzący z tej samej obręczy kolejowej charakteryzował się różnym oddziaływaniem na naprężenia wahadłowe. Próbka P2 wykazywała zmianę szerokości zmęczeniowej pętli histerezy w całym zakresie obciążeń, dopiero przed momentem zerwania uległa niewielkiemu przesunięciu wzdłuż osi odkształceń (rys. 9.22). Dla próbki P11 (rys. 9.23) szerokość zmęczeniowej pętli histerezy nie uległa zmianie, a tylko przesunięciu wzdłuż dodatniej osi odkształceń.

W tej grupie materiałów, zmęczenie przejawia się wzrostem odkształceń średnich w kolejnych cyklach przy utrzymywaniu stałej wartości amplitudy odkształcenia i stałej wartości odkształceń niesprężystych w kolejnych cyklach.

Zachowanie metali w zakresie zmęczenia pod względem mechanizmów rozwoju uszkodzeń można podzielić na dwa zasadnicze typy: w postaci pasm poślizgów prowadzących do efektów cyklicznej plastyczności oraz zdominowanych lokalnymi mechanizmami wokół wad struktury prowadzącymi do efektów ratchetingu [21, 93].

Cykliczne obciążenia w zakresie zmęczenia powodują uruchomienie różnych mechanizmów powstawania i rozwoju uszkodzeń. W pierwszej grupie metalicznych materiałów konstrukcyjnych dominującym mechanizmem są odkształcenia plastyczne powstałe w wyniku tworzenia się pasm poślizgów, a cały proces stabilnego rozwoju uszkodzeń rozwija się zgodnie z regułami cyklicznej plastyczności (rys. 9.24) [21, 36, 93].

W kolejnych cyklach zwiększa się odkształcenie niesprężyste ( $\Delta \varepsilon^i$ ) odzwierciedlające szerokość pętli histerezy przy utrzymywaniu stałej, równej zero wartości średnich odkształceń w cyklu ( $\Delta \varepsilon_m$ ). Zwiększanie się odkształceń niesprężystych w kolejnych cyklach jest związane ze zwiększaniem się amplitudy odkształceń ( $\varepsilon_a$ ) i zmniejszaniem się granicy plastyczności w kolejnych cyklach. Każda z tych wielkości – odkształcenie niesprężyste, amplituda odkształcenia i granica plastyczności może być miarą rozwoju uszkodzeń wykorzystaną do wyznaczenia wartości parametru uszkodzeń w kolejnych cyklach obciążenia [21].



Rys. 9.24. Zmiany zmęczeniowych pętli histerezy w kolejnych cyklach naprężeń cyklicznie zmiennych dla metali o dominującym mechanizmie deformacji w postaci pasm poślizgów prowadzących do efektów cyklicznej plastyczności

Zachowanie drugiej grupy metali pod wpływem obciążeń cyklicznych jest opisane przez ratcheting [21], generowany lokalnymi odkształceniami wokół pustek, wtrąceń niemetalicznych i innych wad struktury.

Wykres naprężenie – odkształcenie w kolejnych cyklach zmęczeniowych dla tego typu mechanizmu przedstawiono na rys. 9.25.



Rys. 9.25. Zmiany zmęczeniowych pętli histerezy pod wpływem naprężeń dla metali zdominowanych lokalnymi mechanizmami wokół wad struktury prowadzącymi do efektów ratchetingu

Szerokość zmęczeniowej pętli histerezy ( $\Delta \varepsilon^i$ ) i amplituda odkształceń ( $\varepsilon_a$ ) nie zmieniają się w kolejnych cyklach, rośnie tylko średnie odkształcenie w cyklu ( $\Delta \varepsilon_m$ ). Pętla histerezy o stałej szerokości przesuwa się w miarę narastania ilości cykli. Proces rozwoju uszkodzeń jest zdominowany położeniem i wielkością wad. Trwałe odkształcenia w kolejnych cyklach mogą narastać, jak to pokazano na rys. 9.25 lub mogą się zmniejszać.

Powyższe przykłady opisujące reakcje mechaniczne materiału w całym zakresie obciążenia cyklicznie zmiennego wskazują na ich różnorodność. W zależności od składu chemicznego, techniki wytwórczej i obróbki cieplnej można przyjąć powstanie i rozwój uszkodzeń dla różnej kombinacji obu tych podstawowych mechanizmów deformacji [21, 93].

Przykładem takiego materiału jest stal niskostopowa P54T stosowana na obręcze kolejowych zestawów kołowych. Wady początkowe, mają decydujący wpływ na zachowanie się metali przy obciążeniach cyklicznych w zakresie zmęczenia nisko i wysokocyklowego.

Na rysunku 9.26 przedstawiono przykładową charakterystykę zmian szerokości pętli histerezy jako funkcję liczby cykli dla stali A336GR5 [96].



Rys. 9.26. Zmiana odkształceń niesprężystych w kolejnych cyklach obciążenia

W okresie zniszczenia eksploatacyjnego można wyróżnić trzy etapy niszczenia [96]: Etap początkowy, w którym materiał pracuje w sprężystym zakresie z lokalnymi obszarami plastycznymi w otoczeniu koncentracji naprężeń. Drugi etap to etap powstawania, powiększania się i łączenia małych pęknięć i wad struktury prowadzących do utworzenia pęknięcia dominującego. Trzeci etap to propagacja pęknięcia dominującego prowadząca do uszkodzenia materiału.

Rysunek 9.26 obrazuje zmiany szerokości zmęczeniowej pętli histerezy w zależności od liczby cykli dla każdej z czterech próbek obciążanych inną amplitudą naprężenia. Dwie dodatkowe, ukośne linie przerywane dzielą przestrzeń wykresu na trzy zakresy wcześniej opisane jako etapy zniszczenia. Przykładowe dane doświadczalne pokazane na rys. 9.26, są podstawą do określenia ewolucji parametru uszkodzenia *D* i wyznaczenia zakresu amplitudy naprężeń, w którym obowiązuje liniowa akumulacja uszkodzeń co w znacznym stopniu usprawnia szacowanie żywotności zmęczeniowej dla różnych amplitud naprężenia.

#### 9.3.4. Wyznaczenie parametru zniszczenia

Na rysunku 9.27 przedstawiono zmiany średniego odkształcenia w cyklu  $\Delta \varepsilon_m$  i zakresu amplitudy odkształceń ( $\Delta \varepsilon_a$ ) dla przykładowej badanej próbki klepsydrycznej P2, w której na początku drugiego okresu obserwuje się zmniejszanie  $\Delta \varepsilon_m$ , później wzrost  $\Delta \varepsilon_a$ i  $\Delta \varepsilon_m$  w drugim i w trzecim okresie [21].





Rys. 9.27. Zmiany  $\Delta \varepsilon_m$  i  $\Delta \varepsilon_a$  dla próbki P2 jako funkcja liczby cykli

Rysunek 9.28 przedstawia wyniki dla próbki oznaczonej jako P11. Wyniki tej analizy wykazały wzrost  $\Delta \varepsilon_m$  w całym drugim i spadek w trzecim okresie,  $\Delta \varepsilon_a$  rośnie nieznacznie na samym początku i dalej w drugim i w trzecim okresie nie wykazuje zmian [21].



Rys. 9.28. Zmiany  $\Delta \varepsilon_m$  i  $\Delta \varepsilon_a$  dla próbki P11 jako funkcja liczby cykli

Doświadczalne wykresy zmian średniego odkształcenia w cyklu  $\Delta \varepsilon_m$  i amplitudy odkształcenia  $\Delta \varepsilon_a$  kolejnych cykli dla wszystkich badanych próbek serii P (stal P54T) dają podstawę do oceny rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych.

Dla poszczególnych podgrup wyznaczonych na podstawie krzywej Wöhlera próbek serii P, scharakteryzowano oddziaływanie na naprężenia cyklicznie zmienne. W pierwszej (I) podgrupie zaobserwowano przewagę mechanizmów ratchetingu nad mechanizmami cyklicznej plastyczności. W drugiej (II) podgrupie próbek pojawił się jednoczesny rozwój mechanizmów cyklicznej plastyczności i ratchetingu. W próbkach zaliczonych do trzeciej (III) podgrupy nastąpił silny rozwój mechanizmów ratchetingu na początku procesu rozwoju uszkodzeń, później zaobserwowano zatrzymanie mechanizmów uruchomionych na początku procesu [21].

W każdej serii badanych próbek ratcheting występował z różną intensywnością. Przyjęcie odkształceń średnich za miarę uszkodzeń zmęczeniowych dla badanej stali stopowej P54T jest zatem potwierdzone doświadczalnie.

Rejestracja zmian zachodzących w materiale w wyniku odkształceń w kolejnych cyklach o stałej amplitudzie i poziomie średnim naprężenia umożliwia zdefiniowanie dominującego mechanizmu uszkodzeń zmęczeniowych, wybór wielkości dla zdefiniowania parametru uszkodzenia zmęczeniowego oraz określenie ewolucji procesu rozwoju uszkodzeń.

Parametr uszkodzeń zmęczeniowych można zdefiniować zgodnie z zależnością [21, 96]:

$$D = \frac{\Delta \varepsilon^i - \Delta \varepsilon_0^i}{\Delta \varepsilon_f^i - \Delta \varepsilon_0^i} \tag{9.5}$$

gdzie:  $\Delta \varepsilon^{i}$ ,  $\Delta \varepsilon^{i}_{0}$ ,  $\Delta \varepsilon^{i}_{f}$  - oznaczają kolejno: wartość aktualną, początkową oraz końcową zakresu odkształceń niesprężystych w cyklu obciążenia dla drugiego etapu procesu zniszczenia zmęczeniowego.

Parametr ten przyjmuje wartość zero na początku rozpatrywanego etapu i wartość jeden na końcu tego etapu (w momencie utworzenia szczeliny dominującej).

Zmiany średnich odkształceń w kolejnych cyklach drugiego okresu rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych dla poszczególnych przykładowych próbek przedstawiono wraz z aproksymacją punktów doświadczalnych dla całego okresu przy pomocy funkcji wykładniczej na rysunku 9.29 dla próbki P2.



Rys. 9.29. Zmiany  $\Delta \varepsilon_m$  w drugim okresie dla próbki P2 jako funkcje cykli

Wartości wykładników potęgowych aproksymacji wykorzystano do podziału całego zbioru danych doświadczalnych na trzy podgrupy wspomniane już wcześniej.

Na rysunku 9.30 i dla próbki P2 przedstawiono wykres ewolucji parametru uszkodzeń D w funkcji żywotności próbki, we współrzędnych unormowanych względem trwałości zmęczeniowej dla danej amplitudy naprężenia, oznaczonej jako:  $N/N_f$ .



Rys. 9.30. Zmiana parametru D dla próbki P2 w funkcji żywotności zmęczeniowej

Wyznaczenie funkcji zmian parametru uszkodzeń w zależności od liczby cykli przy różnych amplitudach naprężenia wskazuje na jednolity charakter rozwoju uszkodzeń związanych z mechanizmem ratchetingu. Charakter rozwoju procesu uszkodzeń zmęczeniowych stali P54T jest zdeterminowany samą inicjacją procesu. Największe prędkości rozwoju uszkodzeń są na samym początku procesu, a dla zwiększającej się liczby cykli prędkość wzrostu parametru uszkodzeń stopniowo maleje [21].

Proces rozwoju uszkodzeń badanego materiału jest silnie nieliniowy i nie obowiązuje prawo liniowej akumulacji uszkodzeń. Ma to istotne znaczenie dla praktyki inżynierskiej, uniemożliwia to symulacyjne oceny rozwoju pęknięcia w tym materiale, co jest związane z lokalnym charakterem rozwoju deformacji wokół wad (pustki, wtrącenia), powodującej narastanie odkształceń w badanej objętości materiału, co przejawia się w formie ratchetingu.

Inicjacja i rozwój uszkodzeń zmęczeniowych jest uzależniony od gęstości, rozłożenia i wielkości wad materiałowych, co wpłynęło na różną reakcję badanego materiału na obciążenia cyklicznie zmienne w wyodrębnionych podgrupach próbek (grupa I, II, III).



Aproksymacje zależności średnich odkształceń ( $\Delta \varepsilon_m$ ) w funkcji liczby cykli przedstawiono na rys. 9.31.

Rys. 9.31. Zmiany wykładnika potęgowego aproksymacji funkcji  $\Delta \varepsilon_m = f(\sigma_a)$ 

Wykładniki funkcji  $D = f(N/N_f)$ , przedstawiono na rys. 9.32. W obu przypadkach ułożenie punktów wskazuje na trzy grupy materiałowe o odmiennie przebiegających procesach rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych. Aproksymacje liniowe dla tych trzech podgrup punktów wyznaczają wartość trwałości zmęczeniowej (punkt przecięcia z osią odciętych dla zerowej wartości wykładnika potęgowego).



Rys. 9.32. Zmiany wykładnika potęgowego aproksymacji funkcji  $D=f(\sigma_a)$ 

Trwałość zmęczeniowa dla I podgrupy próbek oszacowana na podstawie wykładnika aproksymacji parametru uszkodzenia *D* (rys. 9.32) wynosi 280 [MPa], a dla drugiej podgrupy 360 [MPa]. Trzecią podgrupę tworzą tylko dwie próbki i wyznaczenie trwałości zmęczeniowej nie jest możliwe. Ułożenie punktów na rys. 9.38 i na rys. 9.39 pozwala na wyróżnienie odmienności zachowania się próbek związanych z różnymi mechanizmami rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych [21].

W celu określenia stopnia degradacji materiału niezbędne jest wycięcie z elementu konstrukcji próbek do badań laboratoryjnych, jest to więc metoda niszcząca.

W rozdziale piątym przedstawiono inne sposoby wyznaczenia parametru zniszczenia, które opierają się na założeniu, iż pewne własności fizyczne (np. prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych, właściwości magnetyczne czy temperatura badanego materiału) zmieniają się w trakcie tego procesu. Pozwala to na wykonywanie tzw. pomiarów pośrednich stopnia degradacji, opierających się na założeniu, że istnieje korelacja pomiędzy badaną własnością fizyczną a stopniem degradacji materiału. Aby badania takie były wiarygodne niezbędne jest wykonanie kalibracji rozpatrywanej metody badawczej na próbkach wzorcowych o znanym stopniu uszkodzenia zmęczeniowego.

Taka technika umożliwia kontrolowanie postępu uszkodzenia zmęczeniowego materiału w trakcie badań, co w rezultacie umożliwia także wyprodukowanie tak zwanych próbek kalibrujących. Za ich pomocą można sprawdzić czy istnieje korelacja i jaką postać ma zależność pomiędzy degradacją zmęczeniową materiału w fazie poprzedzającej propagację szczeliny zmęczeniowej a mierzoną wielkością fizyczną.

### 9.3.5. Podsumowanie badań zmęczeniowych

Przeprowadzone badania zmęczeniowe stali stosowanych w transporcie kolejowym wykazały, że:

- pomiary odkształceń niesprężystych w najmniejszym przekroju próbki klepsydrycznej umożliwiają obserwację rozwoju zmęczenia w materiale pod wpływem naprężeń cyklicznie zmiennych,
- zastosowana procedura badawcza daje więcej informacji o zachowaniu się materiałów w warunkach cyklicznych obciążeń w stosunku do klasycznej metody wyznaczania krzywej Wöhler'a. Metoda ta daje możliwość potwierdzenia wniosków wynikających z krzywej Wöhler'a. Jest to szczególnie istotne w przypadku badań na niezbyt licznych zbiorach próbek, które mogły doznać nieprzewidywalnych odkształceń w procesie niewłaściwej technologii obróbki mechanicznej,
- Wöhlera różnice na podstawie wykresu zaobserwowano W parametrach wytrzymałościowych poszczególnych próbek. Serię dwunastu próbek badanej stali podzielono na trzy podgrupy: w pierwszej podgrupie zaobserwowano przewagę mechanizmów ratchetingu nad mechanizmami cyklicznej plastyczności. W drugiej podgrupie próbek pojawił się jednoczesny rozwój mechanizmów cyklicznej plastyczności i ratchetingu. W próbkach zaliczonych do trzeciej podgrupy nastąpił silny rozwój mechanizmów ratchetingu na początku procesu rozwoju uszkodzeń, później zaobserwowano zatrzymanie mechanizmów uruchomionych na początku procesu (załącznik 2).
- ratcheting jest głównym mechanizmem rozwoju uszkodzeń w zakresie zmęczenia wysokocyklowego stali niskostopowej o symbolu P54T. Jest to efekt narastania trwałych odkształceń w miarę postępu procesu obciążeń cyklicznych. Efekt ten obrazowało przesuwanie się zmęczeniowej pętli histerezy w kierunku dodatnim, przy utrzymaniu zerowej wartości naprężeń średnich,
- nierównomierne rozłożenie punktów krzywej Wöhlera dla próbek stali stosowanej na obręcze kolejowe, świadczy o wpływie zanieczyszczeń w materiale na wytrzymałość zmęczeniową badanej stali,
- ułożenie punktów doświadczalnych krzywej Wöhlera dla próbek stali ER7 było bardzo regularne.
- rozwój uszkodzeń zmęczeniowych badanego materiału jest zależny od gęstości, rozłożenia i rozmiaru wad początkowych. Wykazuje silną nieliniowość w całym zakresie naprężenia, a największa prędkość rozwoju uszkodzeń jest na samym początku procesu,

- przeprowadzone badania umożliwiają wyznaczenie wykładnika potęgowego funkcji aproksymacji punktów doświadczalnych parametru *D* i wyznaczenie wartości amplitudy naprężenia odpowiadającej zerowej wartości tego wykładnika, co odpowiada trwałej wytrzymałości zmęczeniowej,
- wyznaczenie wykładnika potęgowego aproksymacji punktów doświadczalnych parametru D pozwoliło na podział pod względem sposobu oddziaływania na naprężenia zmęczeniowe na trzy podgrupy. Próbki należące do poszczególnych podgrup pokrywały się podgrupami wyznaczonymi za pomocą punktów doświadczalnych wykresu Wöhlera. Dla przyjętej pierwszej podgrupy próbek stali P54T trwała wytrzymałość zmęczeniowa wynosi 280 [MPa], a dla drugiej podgrupy 360 [MPa]. Trzecią podgrupę tworzą tylko dwie próbki i wyznaczenie trwałości zmęczeniowej nie było możliwe.

Badana stal podczas zadanej historii naprężeń charakteryzuje się powiększaniem szerokości zmęczeniowej pętli histerezy i efektem ratchetingu, który dominuje w początkowej fazie obciążania. Te dwa efekty powinno się brać pod uwagę w modelowaniu zachowania się materiału w obliczeniach inżynierskich z zastosowaniem metody elementów skończonych.

# 10. Diagnozowanie zmęczenia materiału metodą pomiaru parametrów magnetycznych

Zaproponowana w pracy metoda badania zależności parametrów magnetycznych od zmęczenia materiału, polegała na obserwacji trendu zmian własności magnetoindukcyjnych materiału w funkcji amplitudy naprężeń zmęczeniowych w cyklu wahadłowym.

Badania magnetyczne i magneto-indukcyjne ograniczono do materiału obręczy kolejowych (stal P54T), ze względu na złożony zakres badań. Materiał ten wybrano pomimo stwierdzonej niejednorodności mechanicznej materiału objawiającej się zmiennymi parametrami zmęczenia. Wybór takiego materiału był celowy ze względu na możliwość wykazania przydatności metod magnetycznych w diagnozowaniu zmęczeniowym nawet w materiałach o tak złożonym mechanizmie niszczenia.

### 10.1. Badanie jednorodności materiału

W związku z tym, iż poszczególne próbki materiału tej samej obręczy charakteryzowały się różna strukturą, w tym liczbą i charakterem wtrąceń niemetalicznych mających wpływ na własności mechaniczne materiału, należało przeprowadzić selekcję tych próbek przed przystąpieniem do badań zmęczeniowych.

Przyjętym w pracy sposobem badania jednorodności była analiza właściwości magnetycznych i elektrycznych badanego materiału.

### 10.1.1. Analiza jednorodności materiału metodą magnetyczną

Niejednorodności struktury materiału mają swoje odbicie w niejednorodności magnetycznej [78, 117, 130, 131]. Wielkościami magnetycznymi zmieniającymi się wraz ze zmianą struktury materiału są przede wszystkim: przenikalność magnetyczna początkowa i maksymalna, natężenie pola koercji, straty histerezowe, straty wiroprądowe, straty relaksacyjne [38].

Właściwości magnetyczne materiału ferromagnetycznego można przedstawić na magnetycznej pętli histerezy. Przebiegi pętli histerezy magnetycznej dla próbek klepsydrycznych stali stosowanej na koła i obręcze kolejowe badano za pomocą specjalnie zaprojektowanego stanowiska pomiarowego składającego się z generatora funkcyjnego, obwodu magnesującego oraz sondy pomiarowej. Na rysunku 10.1 przedstawiono widok stanowiska oraz sondy pomiarowej wykorzystanych do badań.


Rys. 10.1. Stanowiska pomiarowego wraz z sondą

Schemat elektroniczny generatora oparto o układ scalony ICL 8038. Napięcie wyjściowe generatora było kierowane do wzmacniacza operacyjnego mocy OPA 541. Zasada pracy urządzenia polegała na przemagnesowywaniu próbki klepsydrycznej prądem przemiennym i pomiarze zmian wartości magnesowania w stałej odległości od miejsca przewężenia próbki. Ocenę przyjętego sposobu magnesowania do badań wyznaczono za pomocą symulacji MES 2D. Na rys. 10.2 przedstawiono projekt urządzenia magnesującego, a na rys. 10.3 rozkład modułu indukcji magnetycznej w obwodzie zasilanym prądem stałym.



Rys. 10.2. Projekt urządzenia magnesującego obwodu pomiarowego



Rys. 10.3. Rozkład modułu indukcji magnetycznej w obwodzie zasilanym prądem stałym

Badana próbka klepsydryczna stanowiła zworę zamykającą obwód magnetyczny. Testowano obwód ze szczeliną i bez szczeliny. Częstotliwość zmiennego pola magnetycznego mieściła się w zakresie od 0,1 [Hz] do 5 [Hz], dzięki temu eliminowano wpływ prądów wirowych (naskórkowość) na wyniki pomiaru [38, 80, 81].

Na rysunkach od 10.4 do 10.5 a i b przedstawiono efekty magnesowania polem stałym oraz przemiennym próbek klepsydrycznych wykonanych z stali ferromagnetycznej.



Rys. 10.4. Rozkład modułu indukcji magnetycznej dla pola magnesującego stałego



Rys. 10.5. Rozkład modułu indukcji magnetycznej: a- dla pola magnesującego f = 50[Hz], b - dla pola magnesującego f = 5[Hz]

W związku z korzystnym rozkładem modułu indukcji magnetycznej w zmiennym polu dla niższych częstotliwości, w badaniu zastosowano częstotliwość magnesowania: f = 0,1[Hz] i f = 8,0 [Hz]. Ich zastosowanie dodatkowo pozwoliło na ograniczenie wpływu prądów wirowych na przebieg pętli histerezy magnetycznej.

Na rysunku 10.6 przedstawiono zbiorcze przebiegi pętli histerezy magnetycznych dla próbek wyciętych w kierunku promieniowym oraz obwodowym.

Analiza dynamicznych pętli histerezy magnetycznej wykazała minimalne różnice momentów magnetycznych w próbkach, które wycięto w różnych kierunkach z obręczy koła kolejowego.



Rys. 10.6. Przebiegi pętli histerezy próbek stali P54T dla różnych kierunków wycięcia

Szczegółowa analizę magnetyczną próbek przeprowadzono za pomocą koercjometru. Wyniki natężenia koercji *Hc* przykładowych próbek przedstawiono w tabeli 10.1.

nr próbki	$Hc_1$	$Hc_2$	Hc ₃	nr próbki	$Hc_1$	$Hc_2$	Hc ₃
in prooid	[A/m]	[A/m] [A/m]	[A/m]	[A/m]	[A/m]		
p27	942,82	942,82	942,82	o20	1198,5	1198,5	1185
p28	926,84	942,82	934,83	o21	1038,7	1022,72	1011,2
p29	910,86	910,86	910,86	022	830,96	846,94	837,4
p30	910,86	910,86	910,86	023	1006,74	910,86	900,6
p31	1022,72	990,76	1006,74	o24	942,82	926,84	916,4
p35	990,76	974,78	982,77	028	1008,84	990,76	979,6
	Próbki pro	omieniowe		Próbki obwodowe			
gdzie: $Hc_{1}$ , $Hc_{2}$ , $Hc_{3}$ - numer kolejnego pomiaru natężenia koercji $Hc$							

Tabela 10.1. Wyniki pomiaru natężenia koercji

Kolorem zielonym zaznaczono próbki o największym odchyleniu od wartości średniej. Na rys. 10.7 zestawiono wyniki *Hc* dla próbek nieobciążonych wyciętych obwodowo i promieniowo.





Różnica poziomów średnich wartości *Hc* dla próbek promieniowych i obwodowych wynosi tylko 1,7%. Wykazano, iż materiały wycięte w kierunku obwodowym charakteryzowały się większą niejednorodnością magnetyczną, spowodowaną procesem walcowania.

## 10.1.2. Analiza jednorodności materiału metodą pomiaru indukcyjności

W kolejnym etapie badania jednorodności materiału mierzono indukcyjność za pomocą cewki obejmującej środkową cześć próbki. Indukcyjność cewki zależy od konstrukcji układu pomiarowego oraz właściwości magnetycznych wypełniającego ją materiału. W tabeli 10.2. zamieszczono serię wyników z pomiaru indukcyjności materiału w funkcji częstotliwości prądu zasilającego cewkę. Kolorem zielonym zaznaczono próbki o skrajnych wartościach indukcyjności.

	P	róbki obwod	lowe		Próbki promieniowe				
Nr	f ₄ = 100[Hz]	f ₃ = 120[Hz]	f ₂ = 1[kHz]	f ₁ = 10[kHz]	Nr próbki	f ₄ = 100 [Hz]	f ₃ = 120[Hz]	f ₂ = 1[kHz]	f ₁ = 10[kHz]
prooki	L ₄ [mH]	L ₃ [mH]	L ₂ [µH]	L ₁ [µH]	PIOOKI	L ₄ [mH]	L ₃ [mH]	L ₂ [µH]	L ₁ [µH]
p27	0,082	0,082	60,0	30,3	o20	0,075	0,080	58,1	29,5
p28	0,083	0,081	59,3	29,0	o21	0,078	0,074	54,4	26,6
p30	0,078	0,082	56,7	28,1	o23	0,075	0,082	59,2	29,2
p31	0,084	0,083	60,3	30,6	o24	0,083	0,086	60,5	30,2
p32	0,084	0,081	57,8	28,4	o25	0,081	0,082	59,1	28,9
p35	0,071	0,074	53,8	28,3	o28	0,079	0,080	56,7	27,7

Na rys. 10.8 przedstawiono wyniki indukcyjności badanych próbek nieobciążonych wyciętych w kierunku obwodowym i promieniowym, dla dwóch częstotliwości prądu zasilającego cewkę.



Rys. 10.8. Wartości średnie i odchylenia standardowe indukcyjności próbek obwodowych i promieniowych dla częstotliwości f=100 [Hz] i 120 [Hz]

Wyniki pomiaru indukcyjności badanego materiału dla częstotliwości prądu magnesującego  $f = 1\ 000$  i  $f = 10\ 000$  [Hz] przedstawiono na rys. 10.9.



Rys. 10.9. Wartości średnie i odchylenia standardowe indukcyjności próbek obwodowych i promieniowych dla częstotliwości  $f = 1\ 000\ [Hz]$  i 10 000 [Hz]

Wyniki pomiarów indukcyjności próbek klepsydrycznych nie wykazują zmian przenikalności w dolnych zakresach częstotliwości prądu magnesującego. Niewielkie różnice rzędu 5,5% zarejestrowano dla częstotliwości 10 [kHz]. Dokładność pomiaru indukcyjności jest uzależniona od częstotliwości prądu magnesującego, im wyższa częstotliwość tym dokładniejszy pomiar [80].

#### 10.1.3. Podsumowanie badań jednorodności materiału

Na podstawie analizy wyników pomiarów jednorodności magnetycznej oraz indukcyjności przeprowadzono selekcję próbek przeznaczonych do badań zmęczeniowych. Wybrano próbki o zbliżonych właściwościach natężenia pola koercji *Hc* i indukcyjności *L*. Testy wykazały różnicę pomiędzy natężeniem pola koercji próbek wyciętych promieniowo i obwodowo na poziomie 2% oraz indukcyjności na poziomie 5,5% (przy częstotliwości 10 [kHz]).

## 10.2. Detekcja procesów zmęczeniowych metodą magnetyczną

Pomiar natężenia koercji przeprowadzono na próbkach przed zadanym obciążeniem zmęczeniowym oraz na próbkach zerwanych. Próbki materiału wycięte w kierunku obwodowym i promieniowym zostały badane niezależnie. Wartości natężenia koercji próbek stli P54T wyznaczono za pomocą koercjometru laboratoryjnego. Na rysunku 10.10 zestawiono wyniki pomiaru.



Rys. 10.10. Porównanie natężenia koercji dla próbek nieobciążonych i zerwanych

Analiza wyników badań wykazała, że materiał obciążony zmęczeniowo do zerwania charakteryzuje się o 20% niższym natężeniem koercji *Hc* w porównaniu z materiałem nieobciążonym. Rozpatrując tylko zmiany natężenia koercji można stwierdzić, że parametr ten umożliwia diagnostykę procesów zmęczeniowych materiału.

## 10.3. Wpływ obciążeń eksploatacyjnych na parametry magnetyczne

Badanie zależności parametrów magnetycznych od zmęczenia materiału, polegało na obserwacji trendu zmian własności magnetoindukcyjnych materiału w funkcji amplitudy naprężeń zmęczeniowych w cyklu wahadłowym. Przyjęte do badań amplitudy naprężeń wynosiły: 100, 200 i 300 [MPa]. Dla wszystkich próbek przyjęto stałą liczbę cykli obciążeniowych wynoszącą  $N = 2 \cdot 10^5$  oraz częstotliwość f = 20 [Hz].

Próbki klepsydryczne zostały pocięte w miejscu przewężenia techniką elektroiskrową na cztery części jak pokazano na rys. 10.11.



Rys. 10.11. Sposób przygotowania materiału do badań magnetycznych

Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych...

Pomiar wielkości magnetycznych i magneto-indukcyjnych materiału w wyznaczonych strefach pozwolił na dodatkową ocenę zmian zachodzących w różnych przekrojach próbki klepsydrycznej. W tabeli 10.3 zestawiono wielkości charakteryzujące wybrane próbki.

Nr próbki	Średnica min.[mm]	Pole Przekroju poprzecznego [mm ² ]	σ _a amplituda naprężenia [Mpa]	Siła [N]	
P_13	3,938	12,1798	100	1217,98	
P_14	3,9992	12,5613	200	2512,27	
P_15	4,0125	12,645	300	3793,51	
P_19	4,0161	12,6677	100	1266,77	
P_20	4,0419	12,831	200	2566,2	
P_21	4,0494	12,8787	300	3863,6	
P_22	4,0059	12,6035	300	3781,04	
P_23	4,0395	12,8158	100	1281,58	
P_24	3,8493	11,6373	200	2327,47	
P_25	3,938	12,1798	100	1217,98	
P_26	4,004	12,5915	200	2518,3	
P_28	4,0411	12,8259	300	3847,78	

Tabela. 10.3. Tabela parametrów obciążanych próbek

#### 10.3.1. Badania zmian natężenia koercji pod wpływem obciążeń zmęczeniowych

Pomiary natężenia koercji wyznaczono na stanowisku laboratoryjnym Zakładu Materiałów Amorficznych i Nanokrystalicznych Instytutu Nauki o Materiałach Uniwersytetu Śląskiego za pomocą koercjometru magnetycznego. Testy wykonano dla dwóch części wewnętrznych i dwóch zewnętrznych przewężenia próbki klepsydrycznej - rys. 10.11). Wyniki pomiarów *Hc* w częściach wewnętrznych (środkowych) próbki klepsydrycznej, dla przyjętych amplitud naprężeń i przy przebiegu  $N = 2 \cdot 10^5$  cykli przedstawiono na rysunku 10.12.



Rys. 10.12. Wynik analizy zmian natężenia koercji *Hc* w częściach wewnętrznych przewężenia próbek klepsydrycznych (środkowych) w funkcji amplitudy naprężenia

Pomiar natężenia koercji w części zewnętrznej przewężenia przedstawiono na rys. 10.13.



Rys. 10.13. Wynik analizy zmian natężenia koercji *Hc* w częściach zewnętrznych przewężenia próbek klepsydrycznych w funkcji wartości amplitudy naprężenia

Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych...

Z analizy przedstawionych rysunków wynika, iż dla stali P54T w części środkowej przewężenia próbki klepsydrycznej natężenie koercji *Hc* wzrasta wraz ze wzrostem amplitudy naprężeń działających na próbkę. Największe różnice występują pomiędzy materiałem nieobciążonym a materiałem obciążonym i wynosi ona 19%. Dalsze przyrosty obciążeń wykazują niewielkie zmiany natężenia koercji - rzędu 3%.

# 10.3.2. Badanie zmian parametrów przenikalności magnetycznej i kąta stratności od obciążeń zmęczeniowych

Badania magneto-indukcyjne przeprowadzono na mierniku własności fizycznych PPMS (Physical Property Measurement System) firmy Quantum Design. Za pomocą tego urządzenia wyznaczono parametry magneto-indukcyjne materiału takie jak: przenikalność magnetyczną - część rzeczywistą, część urojoną oraz tangens kąta strat. Sposoby wyznaczania tych parametrów za pomocą metod indukcyjnych i magnetycznych przedstawiono w załączniku 1. Na rysunku 10.14 znajduje się fotografia miernika PPMS wraz z oprzyrządowaniem.

Pomiary wielkości magneto-indukcyjnych prowadzone były w zakresie natężenia pola magnesującego H od 40 [A/m] do 1100 [A/m] w przedziale częstotliwości f od 15 [Hz] do 1030 [Hz]. Parametry te mierzono dla części wewnętrznych (środkowych) przewężenia próbek klepsydrycznych.



Rys. 10.14. Miernik własności fizycznych PPMS wraz z oprzyrządowaniem

Wyniki pomiaru przenikalności magnetycznej czynnej (rzeczywistej)  $\mu'$  dla natężenia pola magnetycznego H = 40 [A/m] i częstotliwości f = 1030 [Hz] przedstawiono na rysunku 10.15. Różnice zmian przenikalności magnetycznej czynnej ( $\mu'$ ) pomiędzy próbkami obciążonymi a nieobciążonymi wynoszą około 3%.



Rys. 10.15. Zmiany przenikalności magnetycznej czynnej w zależności od amplitudy naprężeń, dla f = 1030 [Hz] i H = 40 [A/m]

Wyniki pomiarów parametru przenikalności magnetycznej biernej ( $\mu$ "), stali P54T dla różnych wartości naprężeń w czasie 200 000 cykli, zostały przedstawione na rysunkach 10.16 i 10.17.



Rys. 10.16. Zmiany przenikalności magnetycznej biernej w zależności od amplitudy naprężeń, dla f=15 [Hz] i H=800 [A/m]

Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych...



Rys. 10.17. Wynik analizy zmian przenikalności magnetycznej biernej w zależności od amplitudy naprężeń, dla f = 1030 [Hz] i H = 1180 [A/m]

Wyniki pomiarów przenikalności magnetycznej biernej ( $\mu$ ") próbek stali P54T uwidaczniają różnicę pomiędzy próbkami obciążonymi i nieobciążonymi. Różnice parametru  $\mu$ " pomiędzy, wyniosły około 10%. Wykazano brak korelacji parametru  $\mu$ " pomiędzy próbkami w kolejnych zmianach obciążeń.

Wyniki zmian tangensa kąta strat  $tg\delta$  dla parametrów pola magnesującego: f = 120 [Hz] i H = 1140 [A/m] w funkcji amplitudy naprężeń przedstawiono na rysunku 10.18.



Rys. 10.18. Wynik analizy zmian tangensa kąta strat  $tg\delta$  w zależności od amplitudy naprężeń, dla f = 120 [Hz] i H = 1140 [A/m]



Na rys. 10.19 dla parametrów pola magnesującego: f = 1030 [Hz] i H = 1140 [A/m].

Rys. 10.19. Wynik analizy zmian tangensa kąta strat  $tg\delta$  w zależności od wartości amplitudy naprężeń, dla f =1030 [Hz] i H =1100 [A/m]

Tangens kąta strat w funkcji amplitudy zadanego obciążenia wykazuje korelację dodatnią z amplitudą naprężenia działającego na próbkę. Wraz ze wzrostem amplitudy naprężenia wzrasta tangens kąta strat (rys 10.18 i 10.19). Różnica wartości średniej tego parametru dla amplitudy naprężenia równej 300 [MPa] a próbką nieobciążoną wyniosła 9,2%. Największe różnice zarejestrowano przy polu magnesującym w zakresie częstotliwości od 800 [Hz] do 1030 [Hz] oraz natężenia pola magnetycznego powyżej 800 [A/m].

#### 10. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiona w pracy metoda oceny zmęczeniowej stali wykorzystywanej w kolejnictwie metodą magnetyczną, polegała na laboratoryjnym wyznaczeniu zakresów zmian wybranych parametrów magnetycznych t.j. natężenie koercji, przenikalność magnetyczna oraz tangens kąta strat w funkcji amplitudy naprężeń zmęczeniowych w cyklu wahadłowym. Do badań wybrano próbki stali P54T, czyli materiału, który począwszy od struktury wyjściowej do struktury o dużym stopniu zmęczenia charakteryzował się znaczną niejednorodnością: strukturalną, deformacyjną oraz wytrzymałościową.

W badanych próbkach materiału wykryto liczne wtrącenia niemetaliczne, tj. tlenki aluminium  $Al_2O_3$  i siarczki manganu MnS. W strukturze materiału obciążonego zaobserwowano rozdrobnienie struktury perlitycznej oraz utratę ciągłości materiału na granicach wtrąceń niemetalicznych.

W przeprowadzonych badaniach magnetycznych próbek stali stosowanych w kolejnictwie, wykazano, że:

- zmiany parametrów magnetycznych, dla stali niskowęglowej stosowanej na obręcze kół kolejowych (natężenie koercji, przenikalność magnetyczna czynna i bierna oraz tangens kąta strat) od zadanych obciążeń zmęczeniowych wahadałowych umożliwiają wykrywanie procesów zmęczeniowych w materiale tym samym potwierdzając tezę pracy,
- związki ilościowe: natężenia koercji, przenikalności magnetycznej biernej i tangensa kąta stratności spowodowane przejściem badanego materiału od stanu nieobciążonego zmęczeniowo do stanu zmęczeniowego po seriach obciążeń, sięgają kilkunastu procent. Wielkość tych zmian stwarza możliwość wykorzystania ich do oceny stopnia zmęczenia materiału,
- odpowiednie natężenie i zakres częstotliwości pola magnesującego materiał pozwala na ocenę stopnia zmęczenia mechanicznego materiału za pomocą technik magneto-indukcyjnych. W badanej stali najwyższą czułość wykrywania stref zmęczenia materiału uzyskano dla natężenia pola magnetycznego w przedziale od 800 [A/m] do 1140 [A/m] i częstotliwości w przedziale od 800 [Hz] do 1030 [Hz]. Wskazane parametry magnetyczne mogą być wykrywane metodą magnetyczna i metodą magneto-indukcyjną.

Zastosowanie w diagnostyce zmęczeniowej metod magnetycznych i magnetoindukcyjnych wzbogaca defektoskopię pęknięć o metodę wykrywania zmian zmęczeniowych w materiale, co pośrednio może poprawić bezpieczeństwo ruchu kolejowego. Badania magnetyczne i magneto-indukcyjne są tanie i skuteczne. Kierunki dalszych badań:

Trwają prace nad wdrożeniem wyników badań do zastosowań praktycznych. Projektowana aparatura badawcza stworzy możliwości wdrożenia tej metody pomiarowej przez służby utrzymania taboru. Prace te są prowadzone w ramach grantów realizowanych w Katedrze Transportu Szynowego.

## Literatura

- Adamski M., Golasz J., Kalisiewicz J., Wnioskowanie o przyczynach wczesnych pęknięć kół kolejowych na podstawie pomiarów naprężeń własnych, 22 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Szczyrk 1993.
- 2. Amir D. Aczel, Statystyka w Zarządzaniu, Wydawnictwo Naukowe PWN 2003.
- 3. ASTM Handbook vol.19, Fatigue and Fracture, *ASM International 1996*.
- 4. ASTM Standard E 466-96, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude, *Axial Fatigue Test on Metali Material*, 1997.
- 5. Bawolski R., Badania nieniszczące. *Trakcja i wagony, nr 3, 1980.*
- 6. Bawolski R., Kwalifikacja osi zestawów kołowych pojazdów szynowych na podstawie wyników badań ultradźwiękowych. *Trakcja i wagony, nr 9, 1983.*
- 7. Bizoń K., Symulacyjna ocena obciążeń zmęczeniowych w tarczy koła napędnego zestawu kołowego, *Kongres Mechaniki Polskiej, KMP 2007, Warszawa 28-31 sierpnia 2007.*
- 8. Bojarski Z., Łągiewka E., Rentgenowska analiza strukturalna, *Wyd. UŚ, Katowice 1995*.
- 9. Bombardier, 2007, Whell tread damage An Elementary Guide.
- 10. Bozorth M. R., Ferromagnetism, *IEEE Magnetics Society*, New York 1993.
- 11. Cawley P., Non-destructive testing current capabilities and future directions. *Proceedings of the IMechE, Part L, 2001.*
- 12. Cedrat: Flux CAD package for electromagnetic and thermal analysis using finite elements. *User guide*, 2001.
- Cegielny E., Karwała K., Tułecki A., Rola badań nieniszczących w zapewnieniu odpowiedniej jakości technologicznej zestawów kołowych pojazdów szynowych. *Problemy eksploatacji, nr 2, 2003.*
- 14. Chaboche J. L., Differential Law for Nonlinear Cumulative Fatigue Damage, Materiale and Buildings Research, *Paris Instytut Technique Du Batiment Et Des Travaus Publies, Annales de l'ITBTP, HS No. 39, 1977.*
- 15. Chmiel E., Metody i kryteria diagnostyki szyn, obręczy i kół monoblokowych, Spała, 1987.
- 16. Chmiel J., Chmiel E., Problemy ultradźwiękowych badań w kolejnictwie. *Ultradźwiękowe badania materiałów, referaty seminaryjne, Zakopane, 1995.*
- 17. Deputat J., Badania nieniszczące podstawy i problemy. Podstawy fizyczne Badań Nieniszczących, Gliwice, 1995.
- 18. Diener M., Towards better Rail Wheel Materiale, ETH Zurych 2007.
- 19. Dietrich L., Badania właściwości mechanicznych materiałów o złożonym stanie naprężenia identyfikacja anizotropii plastycznej. *Przegląd Mechaniczny*, 23-24, 1996.

- 20. Dietrich L., Rutecka A., Kowalewski Z., Mechanical characterization Fatigue and Creep of A356+TiB₂ based MMC, *IPPT Report 2009 for INASMET San Sebastian, Spain.*
- 21. Dietrich L., Kukla D., Rozwój uszkodzeń i degradacja właściwości mechanicznych pod wpływem obciążeń cyklicznych, *raport badawczy, IPPT Warszawa, 2009.*
- 22. Dietrich L., Radziejewska J., Report IPPT 2009, NADIA New Automotive components Designed for and manufactured by Intelligent processing of light Alloys, *Sixth Eu Framework Programme 2009*,
- 23. Dietrich L., Rozwój uszkodzeń struktury i ocena stopnia degradacji materiałów konstrukcyjnych. Konferencja Badania Mechanicznych Właściwości Materiałów i Konstrukcji, Zakopane, 14-17 grudzień 2004, Materiały Konferencyjne IPPT PAN Lapromat.
- Dietrich L., Socha G., Development of damage due to cyclic loading at different states of stress. 22nd Danubia Adria Symposium on Experimental Methods and Solid Mechanics, , Monticelli Terme – Parma, Italy, September 28 – October 1, 2005.
- 25. Dietrich L., Uszkodzenia, degradacja zmęczenie materiałów konstrukcyjnych, *materiały konferencyjne Lapromat, Zakopane, 5-8 grudnia 2005.*
- 26. Dobosiewicz J., Badania diagnostyczne urządzeń cieplno-mechanicznych w energetyce, Część 1. Zagadnienia ogólne. Turbiny i generatory. Warszawa, Biuro Gamma, 1998.
- 27. Dobrowolski M., Współczesne problemy radiografii przemysłowej. Seminarium Ultradźwiękowe Badania Materiałów, Zakopane 2000.
- 28. Domenko A., Obwodowe modele układów z polem elektromagnetycznym. *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.*
- 29. Dryzek J., Dryzek E., Subsurface Zones in Aluminium Detected by Positron Lifetime Spectroscopy, *Materials Science Forum 2004*.
- 30. Dubowicki M., Rudnik S., Obręcze kół pojazdów szynowych, Warszawa 1957.
- 31. Ekberg A., Kabo E., Fatigue of railways wheels and rails under rolling contact and thermal loadig-an overview, *Wear 258, 2005.*
- 32. Essingler V., Kieselbach R., Koller R., Weisse B., The railway accident of Eschede technical background. *Engineering Failure Analysis 11, 2004.*
- 33. ERADIS Kolejowa Baza Danych Europejskiej Agencji Interoperacyjności i Bezpieczeństwa, 2011.
- 34. Göktepe M., Non-destructive crack detection by capturing local flux leakage field. *Sensors* and Actuators A91, 2001.

- 35. Greek R. E., Duke J.C., Ultrasonic and Acoustic Emission Detection of Fatigue Damage, Interational Advances In Nandestructive Testing, vol. 6, Gordon and Breach Science Publisher 1979.
- George W. Woodruff, Micromechanical Modeling of High Cycle Fatigue Processes, 2007 ASM/TMS Symposium on Computational Materials Design GE Global Research, August 20-21, 2007.
- 37. Grimberg R., Leitoiu S., Bradu B.E., Savin A., Andreescu A.:, Magnetic sensor used for the determination of fatigue state in ferromagnetic steels. *Sensors and Actuators 81, 2000.*
- 38. Heptner H., Strope H.: Magnetyczne i indukcyjne badania metali. *Wydawnictwo Śląsk*, 1972.
- 39. Hintze H., Nondestructive testing of railroad wheels at German Bahn AG. *The German-French Automation Workshop - Aachen. NDT, vol.2, no.06, April 1997.*
- 40. Holman, P.A.: Magnetoresistance (MR) Transducers and how to use them as sensors, 2000
- 41. Hronmüller H.: Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1995.
- 42. Inoue T., Hoside T., Yoshikawa Y., Kimura Y.: A Damage Mechanics Approach to Crack Initiation in Polycristalline Copper under Multiaxial Low-cycle Fatige, *Mechanical Behaviour of Materials-V, Proceedings of 5th Conference, Pergamon Press*, 1987.
- 43. Janeczek T., Diagnostyka eksploatacyjna kolejowych zestawów kołowych metodą magnetyczną, *Rozprawa Doktorska, Politechnika Śląska, Wydział Transportu, 2009.*
- 44. Janeder A., Smith C., Schnider R., Magnetoresistive sensor for nondestructive evaluation. 10th SPIE International Symposium, Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostic, Conference 1997.
- 45. Jergéus J., Martensite formation and residual stresses around railway wheel flats. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. *Part C, Journal of mechanical engineering science*, 1998.
- 46. Jezierski G., Radiografia neutronowa, *DOZiR Techniczny* 4/2008.
- 47. Jilken L., Backlund J., Electromagnetic Datection of Low Cycle Fatigue, Mechanisms of Deformation and Fracture, *Pergamon Press, Oxford 1979*.
- 48. Kaczanow L. M., Introduction to Continum Damage Mechanics, Martinus Nijhoff, *The Netherlands, 1986.*
- Kaleta J., Susz S., Magnetowizyjny system do badań dwuosiowego stanu naprężenia w warunkach obciążenia w warunkach obciążenia cyklicznego, XVII Symp. Mech. Dośw. Ciała Stałego, Jahranka, 17-19 października 1996.

- 50. Kappes W., Kröning M., Rockstroh B., Salzburger H.J., Walte F., Non-destructive testing of wheel-sets as a contribution to safety of rail traffic. *Corende 2000 Congreso Regional de Ensayos No Dostructivosy*, *Buenos Aries CNEA 2000*.
- 51. Kobic J., Pośpiech P., Wiedermann J., Perchuć L., Charakterystyka podstawowych wad obręczy i kół bezobręczowych: Rozwój infrastruktury transportowej Śląska i północnych Moraw – część środkowoeuropejskiego systemu transportowego. Ostrava – Katowice, 29.04 – 06.05.1997.
- 52. Kosmas K., Sargentis Ch., Tsamakis D., Hristoforou E.: Nondestructive evaluation of magnetic metallic materials using Hall sensors. *Journal of Materials Processing Technology*, No. 161, 2005.
- 53. Krause-Rehberg R,, Leipner H.S., Positron Annihilation in Semicoductors, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1999.
- 54. Kukla D., Dietrich L., Socha G., Kurzydłowski K.J., Manaj W.: Nieniszczące badania degradacji zmęczeniowej stali Cr-Mo, *Dozór Techniczny, tom 6, 2003*.
- 55. Lamaitre J. Plumtree A., Application of Damage Concepts to Predict Creep Fatigue Failures, *Journal of Engineering Materiale and Technology, ASME, vol. 110, , 1979.*
- Lamatiere J., Dufailly J., Damage Measurements, *Engineering Fracture Mechanics, vol.* 28(5,6), 1987.
- 57. Lewińska-Romicka A.: Badania nieniszczące. Podstawy defektoskopii. WNT, Warszawa, 2001.
- 58. Li C., Quain Z., Li G., The Fatigue Damage Criterion and Evolution Equation Containing MAterial Microparameters, *Engineering Fracture Mechanics, vol. 3(4), 1989.*
- 59. Lynn K.G., Byrne J.G., Positron Lifetime Studies Made in Fatigue Damaged AISI 4340 Samples, *Metallurgical Transactions, vol. 7A, 1976.*
- 60. Machalin E.S., Dislocation Theory of the Fatigue of Metals, N.A.C.A Report 929, 1949.
- 61. Madej H.: Diagnosis of Tooth Surface Failure by Vibration Analysis. *Machine Dynamics Problems. Vol. 27, No 3, 2003.*
- 62. Madej J.: Thermograms of tamages, *Mechanics Research Communication*, 32, *Elservier*, 2005.
- 63. Maldague X., P.V. Xavier., Couturier J. P: Review of pulsed phase thermography. *W: IV Workshop on Advances in Infrared Technology*, 1997.
- Maras J.J., Van der Walt J.S.: An Overview of Railroad Wheel Rim Failure Modes under Heavy Axle Loads. 14th International Wheelset Congress, 17-21 October, Orlando, USA, 2006.

- 65. Morrow J.D., Cycle plastic strain energy and fatigue of metals, Internal friction damping and cyclic plasticity, *ASTM STP 378*, *Philadelphia PA*, *1965*.
- 66. Moroń J.W., Rasek J.: Peremeability disaccomodation in a Fe-C-N in the temperature range from –40°C to 180 C°, *Acta Physica Polonica Vol. XXXV, 1969*.
- 67. Oliferuk W.: Nieniszczące badania materiałów, *Materiały XII SeminariumTermografia* aktywna w badaniach materiałów. Zakopane : IPPT PAN, 2006.
- 68. ORE E162 Zerstörungsfreie Prüfung von Eisenbahnmaterialien in Betrieb. *RP5 Art und Grösse kritischer Fehler in Rädern und Radsatzwellen. Utrecht, April 1987.*
- 69. Piec P.: Zjawiska kontaktowe w elementach pojazdów szynowych. *Politechnika Krakowska, Kraków, 1999.*
- Pleshakow V. V., Filonom V.V., Sokolik A. I., Evaluation of the Level of Fatigue Damage Cumulation In Surfach Layer of High-Strngth Stells, *Strngth of Materiale, vol. 19(6)*, 1987.
- 71. Pluvinage G., Raguet M., Physical and Mechanica Measurements of Damage In Low-Cycle Fatigue: Applications for Two-Level Tests, fatigue Mechanisms, American Society of Testing Material, 1983.
- 72. Podemski J., Marczewski R, Wózki wagonowe, Wydawnictwo Komunikacji *i Łączności, Warszawa 1981.*
- 73. Podemski J., Marczewski R., Majchrzak Z., "Wagony kolejowe. Zestawy kołowe i maźnice", *Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa* 1978.
- 74. Popovic R.S., Flanagan J.A., Besse P.A.: The future of magnetic sensors. Sensors and Actuators, *A 56, 1996*.
- 75. Praca Badawcza Katedry Transportu Szynowego NB202/RT4/2006. Ocena jakości kół monoblokowych, Gliwice 2006.
- 76. Praca Badawcza Katedry Transportu Szynowego NB 221/RT4/2009. Wykonanie badania osi nr 9101 oraz 9102 do ET22 w oparciu o wykonaną analizę ciągłości struktury materiału za pomocą opracowanej przez prof. Z. Żurka parametrycznej metody magnetycznej we wskazanych strefach osi, Gliwice 2009.
- 77. Praca zbiorowa: Badania defektoskopowe elementów pojazdów szynowych. WKŁ, Warszawa, 1979.
- Rasek J., Stokłosa Z.: Badania właściwości materiałów metodami magnetycznymi Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji, *Seminarium Szkoleniowe*, *IPPT PAN, Zakopane*, 15–17 grudnia 2004.

- 79. Rasek J.: Wybrane zjawiska dyfuzyjne w metalach krystalicznych i amorficznych, *Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2000.*
- 80. Rawa H.: Podstawy elektromagnetyzmu: *Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.*
- 81. Reinboth H.: Technologia i zastosowanie materiałów magnetycznych, WNT, Warszawa 1964.
- 82. Rockstroh B., Kappes W., Walte F., Kröning M., Bessert S., Schäfer W., Schallert R., W. Bähr, Joneit D., Montnacher A., Goetz J., Seitz R., Hintze H., Pieper W., Schümann N., Heilmann P., Kushnarev A., Smorodinskiy Y., Kamradin V., Wang Z., Li Qi , Xu Y: Ultrasonic and Eddy-Current Inspection of Rail Wheels and Wheel Set Axles, *17th World Conference on Nondestructive Testing*, 25-28 Oct 2008, Shanghai, China.
- Rockstroh B., Kappes W., Walte F., U. A.: Prüflinienen für die R\u00e4der oder Radreifen produktion bzw. Radsatzinstanthandlung, 8 Internationale Schienenfahrzeugtagung 4.-6. Oktober 2006, Rad Schiene, Dresden, 2006.
- 84. Rudlin J.R., Shipp R.: Review of techniques for rail axle inspection. TWI Report no:13937/1/02, July 2002.
- 85. Rudolph W.: Uszkodzenia powierzchni tocznych kół taboru kolejowego i ich powstawanie. *Glass.Ann., nr 3, 1964.*
- Senczyk D.: Metody i techniki badawcze z zastosowaniem promieniowania rentgenowskiego w nowoczesnych badaniach nieniszczących. 28 Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Zakopane, 1999.
- 87. Sikora R., Komorowski M., Gratkowski S., Pacuk J.: A magnetic method in the testing of ferromagnetic materials. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, vol.21, American Institute of Physics, 2002.*
- Sitarz M., Żurek Z.H., Janeczek T. : Defektoskopia magnetyczno pomiarowa osi kolejowych zestawów kołowych. Politechnika Radomska, *Prace Naukowe Transport*, *nr 1(15)*, 2002.
- 89. Sitarz M., Żurek Z.H.: Diagnostyka obręczy zestawów kołowych z wykorzystaniem pola magnetycznego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport, nr40, Gliwice 2000.
- 90. Shenoy M., Kumar R., McDowell D., Modeling Effects of Nonmetallic Inclusions on LCF in DS Nickel-Base Superalloys, *International Journal of Fatigue*, Vol. 27, 2005.

- Shenoy M., Gordon A., Neu P., McDowel D., Thermomechanical Fatigue Behavior of a Directionally Solidified Ni-Base Superalloy, ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 27, 2005.
- 92. Stanisz A.: Przystępny kurs statystyki, Warszawa 2001.
- 93. Socha G., Experimental investigations of fatigue cracks nuclettion, growth and coalenscence In strutural steel, *Int. Journal of Fatigue, vol. 25/2, 2003.*
- 94. Socha G., Dietrich L., Sposób określania stopnia uszkodzenia materiału konstrukcyjnego wywołanego obciążeniami eksploatacyjnymi, *Zgłoszenie Patentowe P 359 943*.
- 95. Socha G., Nowa metoda wczesnego wykrywania i monitorowania kumulacji zniszczenia zmęczeniowego stali konstrukcyjnych, *monografia IPPT PAN, Warszawa 2004*.
- 96. Socha G., Prediction of the fatigue life on the basis of damage progress rate curves, International Journal of fatigue vol. 26 no 4, 2004.
- 97. Starke P., Walther F., Eifler D., Hysteresis, Temperature and Resistance Measurements for the Characterisation of the Fatigue Behaviour of Metals, 5th Int. Conference Structural Integrity of Welded Structures (ISCS2007), Timisora, Romania, 20-21 Nov 2007.
- 98. 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, 2006*
- 99. Statsoft, Analiza Weibulla niezawodności czasu uszkodzeń, pomoc elektroniczna dostępna w programie Statistica 9.0 oraz na www.statsoft.pl, V 2010.
- 100. Świderski Z.: Zagadnienia zużycia ściernego i zmęczeniowego układu: kolejowy zestaw kołowy szyny w świetle badań laboratoryjnych i eksploatacyjnych. *Warszawa 1996*.
- 101. Świderski Z.: Rodzaje i przyczyny uszkodzeń w eksploatacji szyn, obręczy i kół. *Spała,* 1987.
- 102. Świderski Z., Bogacz R.,Symulacja warunków eksploatacyjnych powodujących uszkodzenia powierzchni tocznych kół i szyn kolejowych", *Symulacja w Badaniach i Rozwoju Vol. 1, No. 2/2010.*
- 103. Tiara S., X-ray-Diffraction Approach for Studiem on Fatigue and Creep, *Exp. Mechanics, vol. 13, 1973.*
- 104. Trzaska Z., Durski H.: Podstawy krystalografii strukturalnej i rentgenowskiej, PWN, Warszawa, 1994.
- 105. Tumański S., Liszka A.: The methods and devices for scanning of magnetic fields. *Journal* of Magnetism and Magnetic Materials, 2002.

- 106. Tumański S., The experimental verification of the condition of the magnetic material caused by different technological processes. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2000.
- 107. Tumański S., Thin film magnetoresitive sensors. Warsaw University of Technology, IOP Publishing Ltd, 2001.
- 108. Viet J.J., Tourrade J.C., Fortmann J.C., Muller R.: Wheel tread defects. Consideration on their causes and effects in the design and monitoring of running gear. 14th International Wheelset Congress, 17-21 October, Orlando, USA, 2006.
- 109. Vieweswaran R., Krishnakumar R., Pranesh M, Prabhakar O., Damage Curie Approach In Fatigue Rusing Acustic Emission Technique, Advances In Fracture Research-ICF7, Pergamon Press, Oxford, 1989.
- 110. Walnus A., Statystyka w badaniu niezawodności, Statsoft Polska, 2008.
- 111. Wilkenfeld J., John J., Positions as a Nondestructive Probe of Low-Cycle Fatigue Damage in Structural Materials, *Nondestructive Evaluation of materials, Plenum Press, New York, NY*, 1976.
- 112. Willcox M., Downes G.: A brief description of NDT Techniques. Insight NDT 2003.
- 113. Wu Zinxue, Short fatigue crack parameters describing the life time of unnotched Stell specimens, *Int. Journal of Fatigue, vol. 23, 2001.*
- 114. Xavier P.V., Maldague X., Wiley J.: Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. *New York, 2001.*
- 115. Zerbst U., Mädler K., Hintze H.: Fracture mechanics in railway applications–an overview. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005.
- Żuchowski R., Specific Strain Work as Both Failure Criterion and Material Damage Measure, es Mechanica, vol. 27(4), 1989.
- 117. Żurek Z.H., Badania stanu ferromagnetycznych elementów maszyn w polu magnetycznym, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Elektryka z. 196, 2005.
- 118. Żurek Z.H., Badanie magnetycznego pola rozproszenia dla celów diagnostyki maszyn, XL Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2004, tom 1. Hajnówka 15–18 czerwca 2004.
- 119. Žurek Z.H., Bizoń K., Badania rozkładu pól naprężeńw kole napędnym lokomotywy EU07 z wykorzystaniem elementów skończonych; *Computer systems aided science, industry and transport 11th Interational conference, Zakopane 2007.*

- 120. Żurek Z.H., Bizoń K., Witaszek K., Rockstroh B., Magnetische Messgrößen der Werkstoffe für Bahn-Radsätze während und nach einer zyklischen mechanischen Belastung, 9 Internationale Schienenfahrzeugtagung", 23-25. September 2009, Dresden Rad Schiene 2009.
- 121. Żurek Z.H., Diagnostyka Magnetyczna. Perspektywy zastosowania pomiarów magnetycznych w badaniu zmęczenia materiału *wykład. Zakopane 10-13 grudnia 2003.*
- 122. Żurek Z.H., Janeczek T., Untersuchung des ermüdungsprozesses in dem band der bahnradsätze. 9 Internationale Schienenfahrzeugtagung, *Dresden*, 27-29 Februar 2008.
- 123. Żurek Z.H., Magnetic monitoring of fatigue process of the rim material of railway wheel sets, *NDT&E International*, 2006.
- 124. Żurek Z.H., Metody defektoskopowe w detekcji procesów zmęczeniowych. XV International Wheelset Congress, Prague 2007.
- 125. Żurek Z.H., Opracowanie metody magnetycznej do wczesnej detekcji procesów zmęczeniowych w stalach niskostopowych i niskowęglowych, *Grant badawczy PBU50/RT4/2007*.
- 126. Żurek Z.H., Pomiar naprężeń wewnętrznych w materiałach ferromagnetycznych. *Materiały konferencyjne X Seminarium Naukowego, Nowe Technologie i Materiały w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Katowice 2002.*
- 127. Żurek Z.H., Sieradzki S., Cząstkiewicz Z., Diagnostyka elementów ze stali austenitycznych w polu magnetycznym, XVI Konferencja Energetyki, Energetyka – Innowacje – Rozwój- Perspektywy Pałac Wojanów 9-11 październik 2009.
- 128. Żurek Z.H.: Magnetic monitoring of the fatigue process of the rim material of railway wheel sets. *NDT&E International 39, 2006*.
- 129. Żurek Z.H., Szudyga M., Janeczek T., Jacek M., Parametry Magnetyczne Stali Jako Kryterium Oceny Diagnostyki Zmęczeniowej", XXIII Sympozium Mechaniki Eksperymentalnej Ciała Stałego, 11'2008.
- 130. Żurek Z.H., Szudyga M., Magnetometric diagnostics of constructional steels ,*Electrical Review*, *Przegląd Elektrotechniczny*, 1'2009.
- 131. Żurek Z.H., Wyznacznik magnetyczny oceny postępu zmęczenia materiału ferromagnetycznego, Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji, *Seminarium IPPT PAN Wykłady, Zakopane 5-8 grudzień 2005.*
- 132. Instrukcja branżowa OW-304. Warunki techniczne kwalifikacji do naprawy, naprawy i odbioru po naprawie zestawów kołowych wagonowych z maźnicami. *Warszawa, 1997*.

- 133. Instrukcja badań magnetyczno proszkowych I-LKB-MT-02. Wykonywanie badań magnetyczno-proszkowych osi wagonowych i lokomotywowych, Warszawa 2001.
- Instrukcja technologiczna badań ultradźwiękowych osi wagonowych typu A i B wg PN-92/K-91048, Nr8112/26, *CNTK, Warszawa, 1995*.
- 135. Karta UIC 810-1: Wymagania techniczne na dostawę obręczy surowych ze stali walcowanej dla taboru napędnego i doczepnego.
- 136. Karta UIC 811-1: Warunki techniczne na dostawę osi zestawów kołowych dla pojazdów trakcyjnych i wagonów.
- 137. Karta UIC 812-3: Warunki techniczne dostawy dla kół bezobręczowych z walcowanej stali niestopowej dla pojazdów napędnych i wagonów.
- 138. Norma BN-75/3518-02, arkusz 00: Nieniszczące metody badań. Wytyczne przeprowadzania badań ultradźwiękowych części pojazdów szynowych i elementów stalowych nawierzchni kolejowej.
- Norma BN-75/3518-02, arkusz 01: Nieniszczące metody badań. Badania ultradźwiękowe osi zestawów kołowych elektrycznych zespołów trakcyjnych 3000 V.
- 140. Norma BN-76/3518-02, arkusz 02: Nieniszczące metody badań. Badania ultradźwiękowe osi zestawów kołowych lokomotyw elektrycznych.
- 141. Norma BN-77/3518-02, arkusz 04: Nieniszczące metody badań. Badania ultradźwiękowe osi zestawów kołowych w wagonach eksploatowanych.
- 142. Norma BN-84/3518-02/13: Nieniszczące metody badań. Badania ultradźwiękowe osi zestawów kołowych lokomotyw spalinowych.
- 143. Norma BN-84/3518-02/15: Nieniszczące metody badań. Badania ultradźwiękowe wieńców bezobręczowych kół wagonowych.
- 144. Norma BN-85/3518-02/06: Nieniszczące metody badań. Metoda badania ultradźwiękowego obręczy wagonowych zestawów kołowych.
- 145. Norma BN-86/3518-02/16: Nieniszczące metody badań. Badania ultradźwiękowe osi zestawów kołowych lokomotyw spalinowych serii ST-44.
- PN-EN 13262+A1:2009: Kolejnictwo Zestawy kołowe i wózki Koła Wymagania dotyczące wyrobu .
- 147. Norma PN-K-91019:1992: Stal dla kolejnictwa. Typy kół bezobręczowych i wymiary.
- Norma PN-84/PN-84027/06 Stal dla kolejnictwa. Obręcze do kół pojazdów szynowych. Gatunki.
- Norma PN-91/H-84027/03: Stal dla kolejnictwa. Osie zestawów kołowych do pojazdów szynowych, Gatunki.

- 150. Norma PN-93/K-91047: Wagony, Osie zestawów kołowych, wymagania i badania.
- 151. Norma PN-H-84027-1. Stal dla kolejnictwa. Koła bose. Gatunki.
- 152. www.bonatrans.com, Informator produktowy firmy Bonatrans, 01'2010.
- 153. www.ndt-ag.com: AURA Automated Ultrasonic Railroad Wheel Set Testing Station, 05'2009.
- 154. www.neutra.web.psi.ch, informator naukowy, 5'2009.
- 155. www.pce-italia.it/html/dati-tecnici-1/dispositivo-per-termografia-pce-tc4.htm, *informator produktowy*, 02'2010.
- 156. www.physik.tumuenchen.de/antares/first_neutrons/first_neutrons.html, *informator naukowy*, 08'2009.
- 157. www.southdevonrailway.org/Railway-Wheels.html, informator kolejowy, 02'2010.
- 158. www.spiegel.de, materialy o katastrofie kolejowej w Eschede, 12'2008.
- 159. www.ultrasonic.home.pl informator produktowy, 02'2010.
- 160. www.wikipedia.org/Wiki/Katastrofa kolejowa w Eschede, 12'2008.
- 161. www.zfcst.us.edu.pl/zfcst/ppms.htm, 02'2011.

# Wykaz ważniejszych pojęć i oznaczeń

- J polaryzacja magnetyczna materiału (namagnesowanie),
- $J_a$  polaryzacja magnetyczna austenitu (2,31·10⁻⁴ [T]),
- J_s polaryzacja magnetyczna nasycenia,
- B Indukcja magnetyczna,
- B_s-- Indukcja magnetyczna nasycenia,
- B_r-Indukcja magnetyczna szczątkowa,
- H-natężenie pola magnetycznego,
- H₀₋wartość natężenia magnetycznego pola magnesowania,
- H_s natężenia pola nasycenia,
- H_i pole magnetyczne wnętrza próbki,
- H_a pole magnetyczne wnętrza próbki,
- H_c- natężenie magnetyczne powściągające, natężenie koercji,
- $\mu_r$  magnetyczna przenikalność względna,
- $\mu_i$  przenikalność magnetyczna początkowa,
- $\mu$  przenikalność magnetyczna rzeczywista,
- $\mu_0$  przenikalność magnetyczna próżni =  $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m],
- $\mu_{max}$  przenikalność magnetyczna maksymalna (amplitudowa),
- $\chi$  objętościowa podatność magnetyczna (wartość bezwymiarowa),
- D_M magnetyczny wyznacznik zmęczenia,
- $\delta$  -efektywna grubość ścianek domenowych,

L - indukcyjność,

- L_D średnia szerokość domen magnetycznych,
- N_M Współczynnik odmagnesowania (demagnetyzacji),
- v_L współczynnik odkształcenia poprzecznego (stała Poisson'a)
- E moduł sprężystości podłużnej materiału nieuszkodzonego,
- E'- moduł sprężystości podłużnej materiału uszkodzonego,
- D parametr zniszczenia,
- G mikrotwardości materiału stanu aktualnego,
- $G_{f}$  wartość mikrotwardości materiału w innym momencie niż G,
- $G_0$  wartość mikrotwardości materiału nieuszkodzonego,
- Re granica plastyczności materiału,
- $R_{e0}$  granica plastyczności materiału nieuszkodzonego,

- $\sigma_a$  amplituda naprężenia,
- $\Delta \varepsilon_m$  wartość średnich odkształceń w cyklu,
- $\varepsilon_a$  amplituda odkształceń,
- $\Delta \varepsilon^{i}$  odkształcenie niesprężyste, szerokość zmęczeniowej pętli histerezy w *i*-tym cyklu,
- $\lambda$  współczynnik magnetostrykcji,
- M magnetyzacja,
- KCU udarność próbki z karbem U,
- $N/N_f$  trwałość zmęczeniowa dla danej amplitudy naprężenia.

## Załącznik 1. Sposoby wykorzystania technik magnetoindukcyjnych w defektoskopii

Metody indukcyjne stosowane w badaniach nieniszczących polegają na wykrywaniu różnic fizycznych własności materiału badanych elementów za pomocą zmiennego pola magnetycznego. W praktyce postępuje się w ten sposób, że badany element, o określonych wymiarach, wykonany z materiału o danej elektrycznej przewodności właściwej i przenikalności magnetycznej, wprowadza się w zmienne pole magnetyczne cewki (spełniającej funkcję czujnika), zasilanej prądem zmiennym [105].

Pod wpływem tego pola w elemencie indukują się prądy wirowe, które z kolei wytwarzają własne pole, skierowane zgodnie z regułą Lenza, przeciwnie do pola cewki. W rezultacie wokół cewki powstaje pole wypadkowe różne od pierwotnego. Zmiana, jakiej doznaje pole cewki wskutek wprowadzenia metalowego elementu, zależy od elektrycznych i magnetycznych własności materiału tego elementu i jego wymiarów oraz o konstrukcji cewki i częstotliwości pola wzbudzającego [38].

W zależności od rodzaju cewki rozróżnia się metodę cewki stykowej i przelotowej. W metodzie cewki stykowej, cewkę przytyka się do powierzchni badanego elementu i zasila prądem zmiennym o częstotliwości f, a odpowiedni układ pomiarowy mierzy wielkość oddziaływania pola prądów wirowych  $H_w$ , wzbudzonych w badanym materiale pod wpływem pierwotnego pola cewki  $H_p$ , na parametry cewki. W metodzie cewki przelotowej badane elementy, przesuwa się przez cewkę. Tutaj także interesuje nas efekt pochodzący od pola prądów wirowych  $H_w$ , wzbudzonych przez pole  $H_p$ .

Cewka o indukcyjności L i rezystancji R przedstawia dla prądu zmiennego o częstotliwości f impedancje równą [38]:

$$\hat{Z} = R + j\omega L , \qquad (1)$$

gdzie:  $\omega = 2\pi f$ .

Impedancje można przedstawić na płaszczyźnie impedancji, czyli w układzie współrzędnych prostokątnych (rys. Z1), odmierzając na osi współrzędnych część rzeczywistą Re  $\hat{Z}$  impedancji  $\hat{Z}$  (wartość rezystancji cewki), a na osi rzędnych – część urojoną Im  $\hat{Z}$  impedancji  $\hat{Z}$ , tj. wartość reaktancji cewki. Impedancje cewki w układzie współrzędnych wyznacza  $P_0$ .

Po wprowadzeniu próbki w pole cewki, co objawia się na wykresie "przesunięciem" od punktu  $P_0$  do punktu P. Wielkość i kierunek zmiany impedancji wyrażonej przez długość odcinka  $PP_0$  i kąt  $\alpha$  zależą ściśle od warunków pomiaru (częstotliwości prądu wzbudzającego, wielkości i kształtu uzwojenia cewki, odległości pomiędzy cewką a badanym elementem),

własności badanego elementu (przewodności elektrycznej właściwej i przenikalności magnetycznej materiału) oraz wymiarów, występowania nieciągłości materiałowych, jak pęknięcia, wtrącenia itd.



Rys. Z1. Wykres impedancji cewki  $P_0$  – impedancja cewki pustej, P – impedancja cewki zawierającej badany element

Zależności indukcji magnetycznej  $L_0$  i  $L_1$  wpływają na parametr przenikalności magnetycznej biernej  $\mu''$  a wartości R₀ i R₁ na przenikalność magnetyczną czynną  $\mu'$ .

Dla materiałów pracujących przy małym poziomie indukcji magnetycznej straty są określane przez wartość tgð. Na rys. Z2 przedstawiono zależność impedancji do indukcyjności wraz z kątem stratności.



Rys. Z2. Kąty fazowe pomiędzy składowymi impedancji i indukcyjności

stąd impedancja:

$$Z = j\omega L + R = j\omega(\mu' - j\mu''), \qquad (2)$$

$$L = L_0 \mu' \,, \tag{3}$$

$$R = \omega L_0 \mu'', \tag{4}$$

$$tg\delta = \frac{\mu''}{\mu'}.$$
 (5)



Rys. Z3. Przebieg  $\mu'$  i  $\mu''$  w funkcji częstotliwości

Wykres impedancji napięć dla w przypadku metody bezwzględnej, polegającej na pomiarze bezwzględnej wartości impedancji uzwojenia, lub napięcia indukowanego w uzwojeniu pomiarowym, przedstawiono na rys. Z4.



Rys. Z4. Metoda bezwzględna – wykres impedancji i napięć

Przy cewce pustej wielkość mierzoną reprezentuje punkt  $P_0$  (wektor OP₀), a po wprowadzeniu badanego elementu cewki wielkość mierzoną reprezentuje punkt P(wektor OP).

Współrzędne punktu  $P_0$  zależą od danych cewki i częstotliwości prądu wzbudzającego, a współrzędne  $P_1$  ponadto od wymiarów i własności materiału badanego elementu. Po wprowadzeniu innego elementu o innych własnościach, wartość pomiarową przedstawia przykładowo punkt  $P_2$  (wektor  $OP_2$ ).

Przy tego rodzaju wykreślnym przedstawieniu napięć zakład się, że kierunki fazowe prądu oraz pola wzbudzającego pokrywają się z dodatnim kierunkiem osi rzeczywistej. W związku z tym napięcie indukowane w uzwojeni pomiarowym pustej cewki, jako przesunięte w fazie o kąt 90° względem prądu, jest zawsze reprezentowane przez "wektor" prostopadły do osi rzeczywistej - jak na rys. Z4.

Impedancja cewki na wykresie może przyjąć różne przebiegi. Jeżeli przez rezystancję cewki (z próbką i bez próbki) rozumiemy sumę rezystancji uzwojenia i rezystancji wniesionej przez prądy wirowe wzbudzone w elemencie, to impedancje pustej cewki reprezentuje punkt  $P_0$  jak na rys. Z5, nie leżący na osi urojonej (chyba że:  $\omega L_0 \gg R_0$ ). Jeżeli natomiast przez rezystancję cewki rozumie się tylko rezystancję wniesioną przez prądy wirowe elementu, to impedancję pustej cewki reprezentuje wektor prostopadły do osi rzeczywistej.



Rys. Z5. Wykres impedancji i napięć pomiarowych w metodzie bezwzględnej z cewką kompensującą

W kontroli metodą indukcyjną bardzo częste zastosowanie znajduje cewka przelotowa, dwuuzwojeniowa. Uzwojenie zewnętrzne (wzbudzające), zasilane prądem zmiennym, zawiera wewnątrz koncentrycznie umieszczone uzwojenie pomiarowe o średnicy  $D_s$ . Do wnętrza uzwojenia pomiarowego wkłada się badaną próbkę o średnicy  $D_p$ . W niniejszych rozważaniach przyjmujemy, że zarówno próbka, jak uzwojenie wzbudzające są bardzo długie.

Przed włożeniem próbki natężenie pola magnetycznego wytworzonego w całym przekroju uzwojenia pomiarowego jest jednakowe i wynosi  $\hat{H}_p$ . Po wprowadzeniu próbki natężenie pola o tej wartości utrzymuje się tylko w przestrzeni między próbką a uzwojeniem pomiarowym, natomiast w obrębie samej próbki, wskutek oddziaływania prądów wirowych, natężenie jest mniejsze, przy czym maleje ono w miarę posuwania się w głąb próbki. Jego wartość  $\hat{H}(r)$ wewnątrz próbki pod względem amplitudy i fazy określa wzór (6). Wraz ze zmianą natężenia pola zmienia się indukcja magnetyczna  $\hat{B}(r)$  wewnątrz próbki.

$$\hat{B}(r) = \mu_0 \mu_r \hat{H}(r), \tag{6}$$

$$\widehat{H}(r) = const = \widehat{H}_p, \qquad (7)$$

oraz jednakowa indukcja:

$$\hat{B}(r) = const = \mu_0 \mu_r \hat{\mu}_{sk} \hat{H}_p , \qquad (8)$$

gdzie:  $\hat{\mu}_{sk}$  jest tzw. przenikalnością skuteczną, wyrażającą się liczbą zespoloną. Przy takim założeniu strumień wypadkowy:

$$\hat{\phi} = const = \mu_0 \mu_r \hat{\mu}_{sk} \hat{H}_0 S_p = \mu_0 \mu_r \hat{\mu}_{sk} \hat{H}_0 \pi r_0^2 , \qquad (9)$$

Wypadkowy strumień magnetyczny  $\hat{\phi}$  próbki można także obliczyć przez zsumowanie elementarnych strumieni  $d\hat{\phi}$  przechodzących przez elementarne powierzchnie pierścieniowe  $dS_p = 2\pi r \, dr$ , otrzymujemy wtedy:

$$d\hat{\phi} = \hat{B}(r) \cdot dS_p = \mu_0 \mu_r \hat{H}(r) \, 2\pi r \, dr \,, \tag{10}$$

$$\hat{\phi} = 2\pi\mu_0\mu_r \int_0^{r_0} \hat{H}(r) \, r \, dr \,, \tag{11}$$

104

przenikalność skuteczną obliczamy z porównania równań (10) i (11):

$$\hat{\mu}_{sk} = \frac{2}{r_0^2 \hat{H}_0} \int_0^{r_0} \hat{H}(r) \, r \, dr \,, \tag{12}$$

Po uwzględnieniu rozkładu pola  $\hat{H}(r)$  wewnątrz próbki cylindrycznej z jednorodnego materiału otrzymujemy :

$$\hat{\mu}_{sk} = \frac{2}{r_0^2 J_0(kr_0)} \int_0^{r_0} J_0(kr) \, r \, dr \,, \tag{13}$$

Wykorzystując zależność:

$$\int x J_0(x) dx = x \cdot J_1(x) + const , \qquad (14)$$

i kładąc x = kr mamy:

$$\int_{0}^{r_{0}} r J_{0}(kr) dr = \left[\frac{r}{k} \cdot J_{1}(kr)\right] \int_{0}^{r_{0}} = \frac{r_{0}}{k} \cdot J_{1}(kr_{0}),$$
(15)

co daje ostatecznie:

$$\hat{\mu}_{sk} = \frac{2}{kr_0} \frac{J_1(kr_0)}{J_0(kr_0)}.$$
(16)

Wynika stąd, że przenikalność skuteczna pod względem wielkości i fazy zależy od średnicy próbki  $D_p = 2r_0$ , przewodności właściwej  $\gamma$  i przenikalności magnetycznej materiału próbki  $\mu_r$ , oraz od częstotliwości f pola wzbudzającego.

Przy częstotliwościach bardzo małych można przyjąć, że Ar  $J_0(kr) \approx 1$ ,  $J_0(kr_0) \approx 1$ i  $J_0(kr_0) \approx \frac{kr_0}{2}$ ). Wtedy ze wzoru (15) otrzymujemy  $\hat{\mu}_{sk} = 1$ .

Oznacza to, że wówczas nie występują prądy wirowe i w całym przekroju próbki natężenie pola ma stałą wartość  $\hat{H}_0$ . Jeżeli obierzemy częstotliwość *f* tak, by wartość argumentu  $kr_0$  figurującego w powyższych wzorach była równa 1, to zgodnie z wzorem:

$$k^2 = j\omega\gamma\mu_r\mu_\sigma \,, \tag{17}$$

mamy:

$$|kr_{0}| = \left| r_{0}\sqrt{-2\pi j f \gamma \mu_{0} \mu_{r}} \right| = \left| \sqrt{-j} \right| \cdot r_{0} \cdot \sqrt{2\pi f \gamma \mu_{0} \mu_{r}} = 1,$$
(18)

a po uwzględnieniu, że  $\left|\sqrt{-j}\right| = 1$ :

$$2\pi r_0^2 \mu_0 \mu_r = 1, (19)$$

105

Częstotliwość, która spełnia to równanie, oznaczamy przez  $f_g$  i nazywamy ją częstotliwością graniczną. Częstotliwość tę określa więc wzór:

$$f_g = \frac{2}{\pi D_p^2 \gamma \mu_0 \mu_r}.$$
(20)

Po wyrażeniu przewodności właściwej w, średnicy  $D_p$  - w [cm] i podstawieniu  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-9} \left[\frac{\text{Vs}}{\text{Acm}}\right]$ , dla obliczenia częstotliwości granicznej otrzymujemy wzór praktyczny:

$$f_g = \frac{5066}{\gamma \mu_r D_p^2} [\text{Hz}]$$
(21)

W przypadku materiałów niemagnetycznych, gdzie  $\mu_r = 1$ , częstotliwość graniczna zależy tylko od średnicy próbki i przewodności właściwej. Gdy więc podczas pomiarów częstotliwość prądu płynącego przez uzwojenie wzbudzające cewki jest równa częstotliwości granicznej dla danej próbki, wtedy zgodnie z tą definicją dla obliczenia przenikalności skutecznej we wzorze (16) możemy podstawić ( $kr_0$ ) = 1. Gdy częstotliwość pracy f różni się od  $f_g$  argument ( $kr_0$ ) możemy wyrazić jako wielokrotność częstotliwości granicznej. Wychodząc bowiem z definicji  $|kr_0|_{f_g} = 1$ , mamy:

$$|kr_{0}|_{f} = \frac{|kr_{0}|_{f}}{|kr_{0}|_{fg}} = \frac{r_{0}\sqrt{2\pi f\gamma\mu_{0}\mu_{r}}}{r_{0}\sqrt{2\pi fg\gamma\mu_{0}\mu_{r}}} = \sqrt{\frac{f}{f_{g}}}$$
(22)

przy czym zgodnie z (20):

$$f/f_g = \frac{f\gamma\mu_r D_p^2}{5066}$$
(23)

Dochodzimy w ten sposób do wniosku, że argument  $(kr_0)$  funkcji Bessela występujących we wzorze (16), a tym samym i przenikalność skuteczna  $\hat{\mu}_{sk}$  zależą wyłącznie od stosunku  $f/f_g$  częstotliwości pomiarowej do częstotliwości granicznej, który z kolei jest określony przez wymiary próbki (średnicę  $D_p$ ) i jej własności fizyczne (przewodność właściwą  $\gamma$  i przenikalność względną  $(\mu_r)$ . A zatem zarówno przy badaniu grubego wlewka miedzianego o średnicy 200 [mm]  $(f_{g_1})$ , jak i przy badaniu cienkiego drutu wolframowego o średnicy  $10^{-2}$  [mm]  $(f_{g_2})$  otrzymamy jednakowe przenikalności skuteczne, jeśli częstotliwości  $f_1$  i  $f_2$  pola wzbudzającego dobierzemy w obu wypadkach tak, by  $f_1/f_{g_1} = f_2/f_{g_2}$ . Ponieważ rozkład pola  $\hat{H}(r)$  we wnętrzu próbki cylindrycznej jest funkcją wyłącznie tych samych zmiennych, od których zależy przenikalność skuteczna, to dochodzimy do następującego ogólnego stwierdzenia: Rozkład natężenia pola i prądów wirowych w próbkach cylindrycznych oraz ich przenikalność skuteczna są identyczne, gdy częstotliwość pola wzbudzającego jest taką samą wielokrotnością częstotliwości granicznej próbek.

Jest to tzw. prawo podobieństwa, sformułowane przez F. Forstera i jego współpracowników. W zastosowaniu do podanego przykładu mówi ono, że przy równości stosunku  $f/f_g$  natężenie pola i rozkład prądów wirowych zarówno we wlewku miedzianym, jak i w cienkim drucie wolframowym są jednakową funkcją względnej odległości  $r/r_0$  od środka. Z prawa tego będziemy korzystać w dalszych rozważaniach.

Przenikalność skuteczna  $\hat{\mu}_{sk}$  wyrażona wzorem (17) jest podstawową wielkością charakteryzującą stan próbki znajdującej się w zmiennym polu magnetycznym. Przenikalność skuteczna, jako funkcja zmiennej urojonej ( $kr_0$ ), jest wielkością zespoloną, którą można przedstawić w postaci:

$$\hat{\mu}_{sk} = Re \,\hat{\mu}_{sk} + j \, Im \,\hat{\mu}_{sk} \,. \tag{24}$$

#### Załącznik 2. Zmęczeniowe pętle histerezy próbek stali P54T

Zmęczeniowe pętle histerezy P54T stosowanej na obręcze kół kolejowych zestawów kołowych przedstawiono na poniższych rysunkach (rys. Z2.1 – Z2.11).

# **P1**



Rys. Z2.1. Pętle histerezy zmęczeniowej próbki P1 dla wybranych cykli
## Ρ2



Rys. Z2.2. Pętle histerezy zmęczeniowej próbki P2 dla wybranych cykli

## Р3

-0,006 -0,004 -0,002 0,000 0,002 0,004 0,006 0,008 0,010 0,012 0,014 0,016 0,018 0,020 0,022 0,024



Rys. Z2.3. Pętle histerezy zmęczeniowej próbki P3 dla wybranych cykli

 $-0,004 \ -0,002 \ 0,000 \ 0,002 \ 0,004 \ 0,006 \ 0,008 \ 0,010 \ 0,012 \ 0,014 \ 0,016 \ 0,018 \ 0,020 \ 0,022 \ 0,024$ 400 cykle 32 200 0 -200 -400 400 320 200 0 -200 -400 400 20000 200 0 -200 -400 400 300029 200 0 -200 -400 400 പ[MPa] 1000000 200 0 -200 -400 400 1447000 200 0 -200 -400 400 3022018 200 0 -200 -400 400 3043749 200 0 -200 -400 400 cykle 4530309 200 0 -200 -400 -0,004 -0,002 0,000 0,002 0,004 0,006 0,008 0,010 0,012 0,014 0,016 0,018 0,020 0,022 0,024

Ρ4

Rys. Z2.4. Pętle histerezy zmęczeniowej próbki P4 dla wybranych cykli







Rys. Z2.5. Pętle histerezy zmęczeniowej próbki P5 dla wybranych cykli



Rys. Z2.6. Pętle histerezy zmęczeniowej próbki P6 dla wybranych cykli

## Ρ7

 $-0,004 \ -0,002 \ 0,000 \ 0,002 \ 0,004 \ 0,006 \ 0,008 \ 0,010 \ 0,012 \ 0,014 \ 0,016 \ 0,018 \ 0,020 \ 0,022 \ 0,024$ 400 1 2 1 1 Т 1 cykle 32 200 0 -200 -400 400 128 200 0 -200 -400 400 512 200 0 -200 -400 400 10016 200 0 -200 -400 σ [MPa] 400 50000 200 0 -200 -400 400 70000 200 0 -200 -400 400 100000 200 0 -200 -400 400 133347 200 0 -200 -400 400 cykle 133987 200 0 -200 -400  $-0,004 \ -0,002 \ 0,000 \ 0,002 \ 0,004 \ 0,006 \ 0,008 \ 0,010 \ 0,012 \ 0,014 \ 0,016 \ 0,018 \ 0,020 \ 0,022 \ 0,024$ 

Rys. Z2.7. Pętle histerezy zmęczeniowej próbki P7 dla wybranych cykli



Rys. Z2.8. Pętle histerezy zmęczeniowej próbki P8 dla wybranych cykli



Rys. Z2.9. Pętle histerezy zmęczeniowej próbki P9 dla wybranych cykli

116



Rys. Z2.10. Pętle histerezy zmęczeniowej próbki P11 dla wybranych cykli



Rys. Z2.11. Pętle histerezy zmęczeniowej próbki P12 dla wybranych cykli