

Wybrane metody diagnostyczne spoza obszaru klasyki badań niszczących i nieniszczących.

Stale dla transportu i energetyki. Degradacja materiału elementu i jego struktury początkowej w zakresie SHM, NDT

Zbigniew Hilary Żurek

WPROWADZENIE

Badania materiału konstrukcyjnego, jak stal i jej stopy, prowadzone są na etapie końcowym ich wytwarzania, etapu produkcji, i w cyklach eksploatacji. Katastrofy, które miały miejsce w historii, zapoczątkowane były brakiem doskonałego projektowania, pomniejszaniem masy i współczynnika bezpieczeństwa, a także defektami struktury materiału o wymiarach nanometrycznych, nieleżących blisko powierzchni, a mających wpływ na współczynnik działania karbu. Opisy stosowanych przez autora metod badawczych i diagnostycznych zawarto w poniższym opracowaniu.

1. OBSZAR BADAŃ

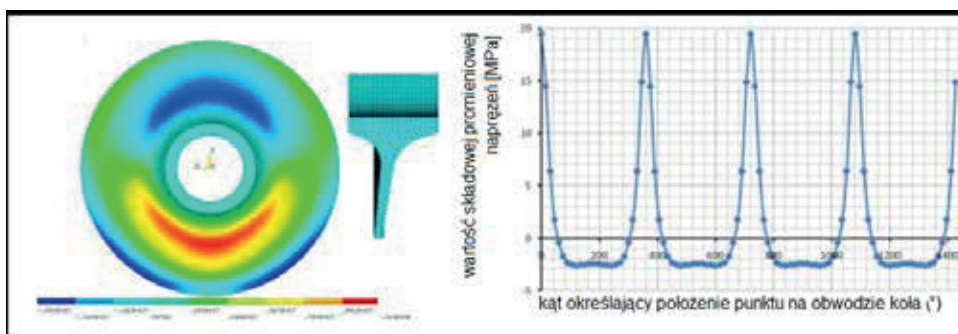
1.1. Podstawowe uwarunkowania mechaniczne obciążenia

Obciążenie eksploatacyjne obserwujemy między innymi w geometrii odkształcenia, strukturze projektowej materiału lub jej utracie a także na powierzchni, które są zmienne

z przyrostem czasu pracy. W pracujących układach mechanicznych obciążenie jest najczęściej zmienne cyklicznie w czasie [1, 2] co do amplitudy i charakteru zmian. W tablicy poniżej podano wybrane przebiegi teoretyczne (tab. 1).

Amplituda obciążenia – od momentu skręcającego, od sił osiowych, oporu czynnika (powietrze, para przegrzana) czy udziału siły tarcia – zmienia parametry fizyczne materiału, takie jak granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie, wytrzymałość rozdzielcza, sprężystość, współczynniki tłumienia fali dźwiękowej, własności cieplne, magnetyczne, i elektryczne jako następstwo obciążenia mechanicznego. Obciążenie eksploatacyjne z postępem czasu może prowadzić nawet do zmiany lub utraty wejściowej struktury materiału. Prowadzi to do przyspieszenia procesu zmęczenia. Należy też uwzględnić cykliczne procesy rozruchu i zatrzymania (energetyka i transport)





Na przebieg zależności $\sigma = f(t)$ ma wpływ rozkład sił działających na element, ale także geometria tego elementu. Dla tej samej wartości składowej naprężenia, zmiany w amplitudzie,

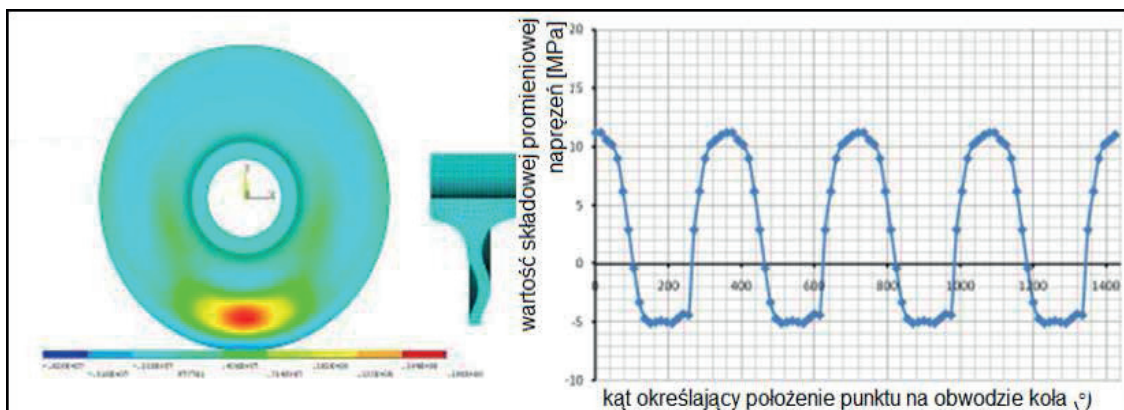


Rys. 1. Obraz rozkładu składowej promieniowej naprężenia w tarczy płaskiej oraz wykres przebiegu zmian wartości składowej promieniowej w funkcji obrotu

Tabela 1 Przykłady teoretycznych cykli obciążenia mechanicznego

Wykres zależności $\sigma=f(t)$ Nazwa cyklu	Wyznaczanie naprężenia			Zależności	
	maksymalne minimalne $\sigma_{\max},$ σ_{\min}	średnie σ_m $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$	amplituda naprężenia σ_a $\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$	amplitudy cyklu $R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$	stałości obciążenia $\chi = \frac{\sigma_m}{\sigma_a}$

stały (+ lub) 	$\sigma_{\max} =$ $\sigma_{\min} > 0$	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min}$	0	+1	$+\infty$
jednostronny (+ lub -) 	$\sigma_{\max} > 0$ $\sigma_{\min} > 0$	> 0	$\neq 0$	$0 < R < 1$	$1 < \chi < +\infty$
od zera tętniący (+ lub -) 	$\sigma_{\max} > 0$ $\sigma_{\min} = 0$	$\frac{1}{2} \sigma_{\max}$	$\frac{1}{2} \sigma_{\max}$	0	1
wahadłowy 	$\sigma_{\max} =$ $-\sigma_{\min} > 0$ $\sigma_{\min} < 0$	0	$\sigma_{\max} = \sigma_{\min} $	-1	0



Rys. 2. Obraz rozkładu składowej promieniowej naprężenia w tarczy falistej oraz wykres przebiegu zmian wartości składowej promieniowej w funkcji obrotu

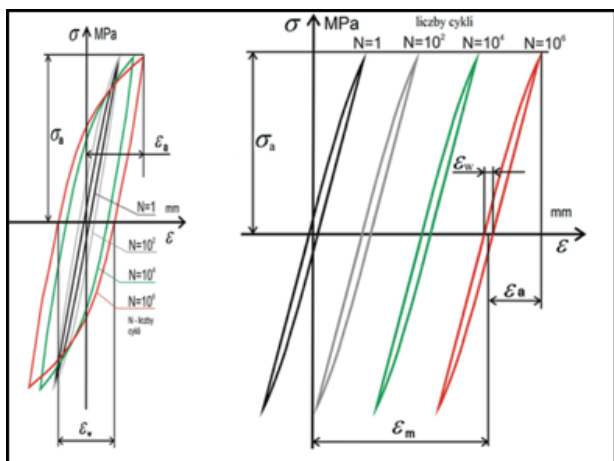
Tabela 2. Skład chemiczny stali w %

Stal P54T	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
				max						
Norma	0,5÷0,5 8	0,6÷0,9	0,15÷0,4	0,04	0,04	0,3	0,3	0,3	0,05	0,05
Wytop 314065	0,58	0,86	0,36	0,019	0,019	0,02	0,02	0,04		0,001

Tabela 3. Skład chemiczny stali w %

Stal P54T	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
				max						
Norma	0,52	0,8	0,4	0,02	0,015	0,3	0,3	0,3	0,05	0,06
Wytop 223382	0,49	0,71	0,3	0,11	0,007	0,19	0,05	0,05		0,027
Koło nr 88	0,51	0,729	0,306	0,112	0,0049	0,201	0,049	0,053		0,024



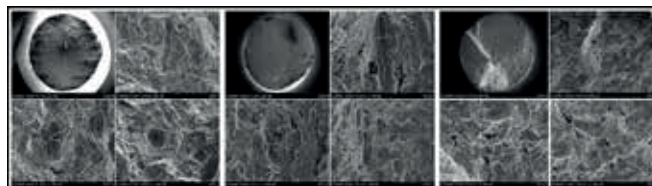


Rys. 3. Zmęczeniowe pętle histerezy przy dominującym efekcie cyklicznej plastyczności (z lewej 3a), zmęczeniowe pętle histerezy przy dominującym efekcie ratchetingu (z prawej 3b) [4, 5, 6].

*grzechotka, podnośnik lub wydłużanie bez poszerzenia

jak i czasookresu działania siły można optymalizować proces obciążenia (rys. 1, 2). Najczęściej stosowanym przebiegiem obciążeń zmęczeniowych jest przebieg wahadłowy o współczynniku amplitudy cyklu równym $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 1$. Przebieg wahadłowy zbliżony do pokazanego na rysunku (rys. 2) zastosowano mechanicznie na próbkach klepsydrycznych. Badania prowadzono w ramach grantu własnego [3]. Badania ulokowano w Zakładzie Wytrzymałości Materiałów IPPT PAN kierowanym przez Profesora Lecha Dietricha [4, 5, 6].

Jak obserwujemy na rysunkach (rys. 1, rys. 2), charakter obciążenia możemy regulować w pewnym w zakresie samą



Rys. 4. Przelomy próbki P1 (od lewej) - a, przelom próbki P2 (środek) - b, przelom próbki P3 (od prawej) - c

Tabela 4. Zakres badań zmęczeniowych grupy próbek serii P

Numer próbki	Średnica w najmniejszym przekroju mm	Pole przekroju poprzecznego mm ²	Naprężenia nominalne MPa	Nominalna siła sterująca N	Liczba cykli próbki (*zerwanie)
P1	3,964	12,34	400	4937	3300000*
P2	4,001	12,57	400	5029	111000*
P3	4,017	12,67	380	4816	119241*
P4	4,009	12,62	360	4545	4530367
P5	4,087	13,12	410	5378	58044*
P6	3,974	12,40	400	4961	42379*
P7	3,922	12,08	340	4108	281376*
P8	3,972	12,39	330	4089	336570*
P9	4,032	12,77	320	4085	6648504*
P10	4,013	12,65	325	4110	5182432
P11	4,029	12,75	335	4270	6851200

Tabela 5. Zakres badań zmęczeniowych grupy próbek serii Pu

Numer próbki	Średnica najmniejszego przekroju mm	Pole przekroju poprzecznego mm ²	Naprężenia nominalne MPa	Nominalna siła sterująca N	Liczba cykli próbki (*zerwanie)
Pu1	4,007	12,608	500	6303,9	3480*
Pu2	4,036	12,792	400	5116,9	93029*
Pu3	4,004	12,591	380	4784,5	332039*
Pu4	4,007	12,611	450	5675,0	17419*
Pu5	3,993	12,519	350	4381,8	214074*
Pu6	4,018	12,680	300	3804,1	2500000*
Pu7	4,024	12,716	360	4577,9	435955*
Pu8	4,010	12,627	330	4166,8	991612*
Pu9	4,007	12,608	500	6303,9	3480*

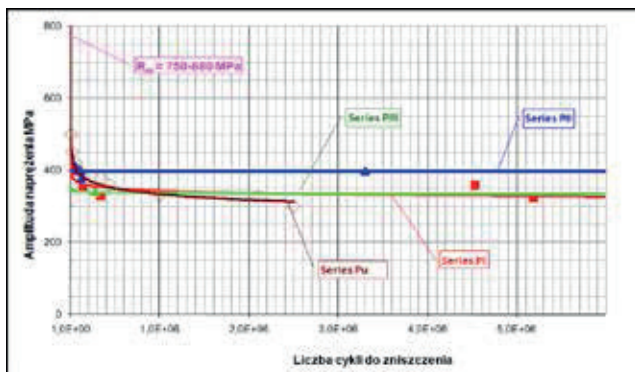
geometrią (np. tarczy koła jezdnego), a tym samym mamy wpływ na rozkład obciążenia i czasookres eksploatacji [7].

Z pierwszych uzyskanych wyników badań w zakładzie IPPT (stanowisko MTS poniżej), na próbkach o kształcie klepsydry z gwintami po obu stronach do mocowania w maszynie, uzyskano niespodziewane spostrzeżenia. Wykazano znaczną niejednorodność materiału stosowanego w kolejnictwie mimo deklarowanej zgodności materiału z normą (tab. 2, 3). Porównywano określoną liczbę cykli obciążeniowych do zerwania próbki. Wykazano znaczne różnice w ilościach cykli do zerwania próbek (tab. 4).

Znajomość standardowej procedury Wöhlera *nie daje żadnych podstaw* do oceny ewolucji procesu rozwoju uszkodzeń pod wpływem obciążeń cyklicznych (rys. 3). Podobnie jak wyznaczamy pętle histerezy magnetycznej, wyznaczamy pętle odkształceń sprężystych w funkcji przebiegu (sinusoidalnego) amplitudy naprężenia. Zastosowano następujące procedury oceny materiału próbek (4, 5, 6, 7).

Pod względem zróżnicowanych mechanizmów rozwoju uszkodzeń zachowanie zmęczeniowe stali w zakresie zmęczenia można podzielić na dwie zasadnicze grupy (rys. 3a, 3b), opisywane przebiegiem pętli histerezy mechanicznej. Zachowanie pierwszej grupy metali pod wpływem obciążeń cyklicznych jest opisane cykliczną plastycznością generowaną mikropoślizgami poprzedzającymi powstanie pasm poślizgów. Typowym zachowaniem tej grupy metali jest zwiększająca się szerokość pętli histerezy wykresu naprężenie – odkształcenie, jak uwidoczono na rys. 3a. Odkształcenie niesprężyste, amplituda odkształcenia ϵ i granica plastyczności mogą być miarą rozwoju uszkodzeń, wykorzystaną do wyznaczenia wartości parametru uszkodzeń w kolejnych cyklach obciążenia (N). Podstawową wadą jest wysoka trudność monitorowania małego obiektu. Możliwe jest zainstalowanie oprzyrządowania w momencie jego uruchomienia, jak np. laserowe skanowanie (względne i bezwzględne) ruchu przęsła mostu lub jego fragmentów.

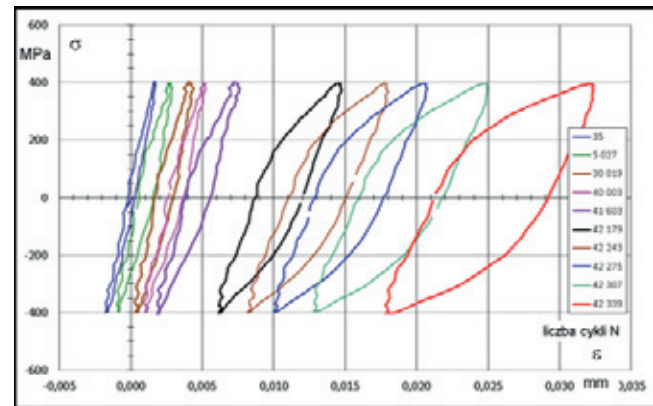
Wyniki badań uwiarygodniły niespodziewaną niejednorodność struktury i przyczyn pęknięcia, wykazaną liczbą cykli do zerwania (tabela 4) i fotografii przełomu (rys. 4 a, 4 b, 4 c) próbek P1, P2, P3. Ponieważ porównywano wyniki różnych producentów stali (tabela 4, 5), zostały one utajnione [8].



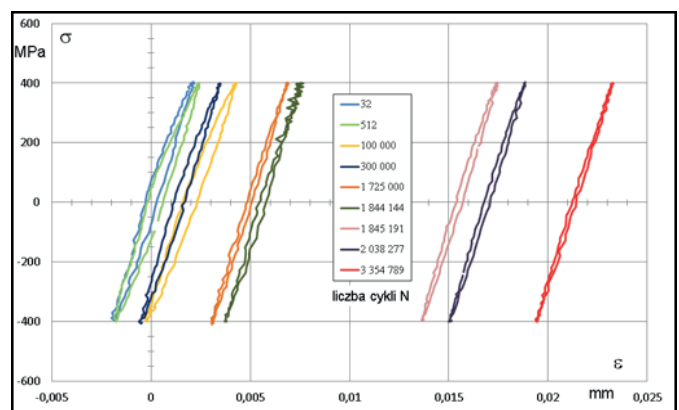
Rys. 5. Krzywa Wöhlera dla próbek serii P (producenci PI, PII, PIII) i próbek serii Pu

Ze względu na charakter zmęczenia (rys. 5) materiału (tabela 4, 5) próbki zaszeregowano do trzech grup [prace badawcze

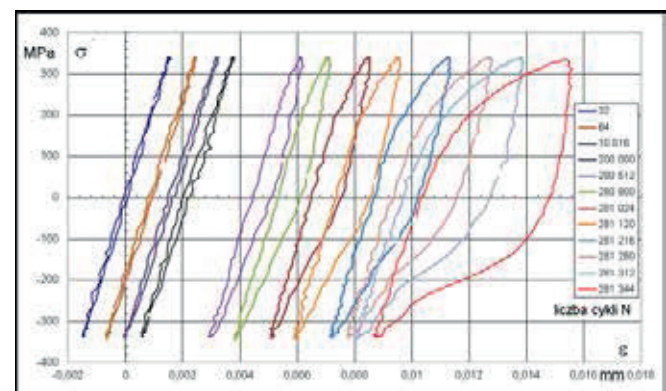
IPPT PAN, 2, 3]. Do pierwszej grupy zaliczono próbki P4, P6, P7, P9, P10 i P11 (kolor czerwony). Do drugiej grupy zaliczono próbki P1, P2, P3 i P5 (kolor niebieski). Trzecią grupę stanowią dwie próbki P8 i P12 (kolor zielony). Dla zobrazowania różnic w parametrach mechanicznych materiału przedstawiono przykłady dla wybranych próbek w grupach, jak pokazano na rysunkach (rys. 6, 7, 8).



Rys. 6. Zmiany ϵ_m i ϵ_a dla próbki P6 w funkcji liczby cykli oraz pętle histerezy próbki P6 dla wybranych cykli (rys. 3 b)



Rys. 7. Zmiany ϵ_m i ϵ_a dla próbki P1 w funkcji liczby cykli oraz pętle histerezy próbki P1 dla wybranych cykli (rys. 3 b)



Rys. 8. Zmiany ϵ_m i ϵ_a dla próbki P8 w funkcji liczby cykli oraz pętle histerezy próbki P8 dla wybranych cykli

Informacji, których brak na krzywych Wöhlera, można się doszukać w przebiegach odkształceń dwu – (i wielosiowych) pokazanych na powyższych rysunkach (rys. 6, 7, 8)

1.2. Parametr mechaniczny uszkodzenia

Wyznaczanie czasu niezawodnej eksploatacji wiąże się z koniecznością monitorowania zmian degradacyjnych materiału (utrata parametrów mechanicznych w powiązaniu ze zmianami parametrów fizycznych [3, 7, 8], a szczególnie monitorowania parametrów magnetycznych i elektrycznych) [7, 8].

Rejestracja zmian odpowiedzi materiału próbek w badaniach zmęczeniowych poprzez pomiar ich odkształceń, w kolejnych cyklach o stałej amplitudzie i średnim poziomie naprężenia, umożliwia zdefiniowanie dominującego mechanizmu uszkodzeń zmęczeniowych, wybór wielkości dla zdefiniowania parametru uszkodzenia zmęczeniowego oraz określenie ewolucji procesu rozwoju uszkodzeń, jak i wskazanie momentu utraty własności mechanicznych [4, 5, 6, 7]. W materiałach przedstawionych w poprzednim rozdziale wyróżniono grupy odkształceń na zadane obciążenia mechaniczne:

- w I grupie wyróżniono przewagę mechanizmów *ratchetingu* nad mechanizmami cyklicznej plastyczności;
- w II grupie wyróżniono jednoczesny rozwój mechanizmów cyklicznej plastyczności i *ratchetingu*;
- w III grupie wykazano silny rozwój mechanizmów *ratchetingu* na początku procesu rozwoju uszkodzeń z późniejszym zatrzymaniem mechanizmów uruchomionych na początku.

Parametr uszkodzenia zmęczeniowego D jest podstawowym uznanym parametrem badań niszczących i definiowany zgodnie z zależnością:

$$D = \frac{\varepsilon_m - (\varepsilon_m)_{\min}}{(\varepsilon_m)_{\max} - (\varepsilon_m)_{\min}}$$

gdzie: ε_m oznacza średnią wartość odkształceń w rozpatrywanym cyklu obciążenia, $(\varepsilon_m)_{\min}$ oznacza średnią wartość odkształcenia w pierwszym cyklu na początku procesu rozwoju uszkodzeń; $(\varepsilon_m)_{\max}$ oznacza średnią wartość odkształcenia w ostatnim cyklu.

Definicja dotyczy tylko II okresu stabilnego wzrostu uszkodzeń zmęczeniowych, a wartości min i max odnoszą się do początku i końca tego okresu.

W ocenie parametrów magnetycznych i elektrycznych możliwa jest dodatkowa ocena związana z procesem umacniania i osłabiania materiału. Punkty te mogą przyjmować wartości większe od max lub średnie czy niższe. Wartość parametru uszkodzenia dla początku okresu II jest z definicji równa zero, a na końcu równa jedności.

Zmiany średnich odkształceń w kolejnych cyklach II okresu rozwoju uszkodzeń zmęczeniowych dla poszczególnych próbek przedstawiono wraz aproksymacją punktów doświadczalnych dla całego okresu przy pomocy funkcji potęgowej. Wartości wykładników potęgowych aproksymacji wykorzystano do podziału całego zbioru danych doświadczalnych na trzy wspomniane wcześniej grupy.

Na wykresach (rys. 9) podano zmiany parametru uszkodzeń D oraz wykres ewolucji tego parametru w funkcji żywotności

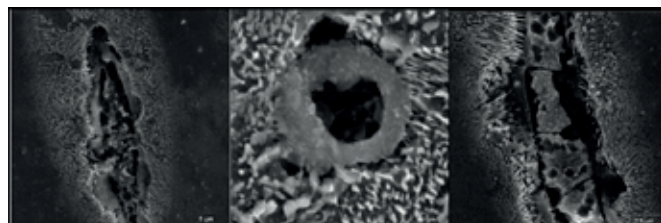
próbki, we współrzędnych unormowanych. W wyniku przeprowadzonych badań [3, 4, 5] zespół badawczy IPPT wykazał, że charakter rozwoju procesu uszkodzeń zmęczeniowych badanych stopów przeznaczonych na obręcze kół kolejowych i monobloków kół jest zdeterminowany samą inicjacją procesu. Największe prędkości rozwoju uszkodzeń są na samym początku procesu, a dla zwiększających się liczb cykli prędkość wzrostu parametru uszkodzeń stopniowo maleje.

1.3. Badania metalograficzne stali niskowęglowych i wpływ wtrąceń niemetalicznych

Przedmiotem badań była także stal węglowa konstrukcyjna P54T przeznaczona do produkcji obręczy kół kolejowych zestawów kołowych o dużej intensywności eksploatacji. Badana stal stosowana jest w stanie ulepszonym cieplnie, tj. po hartowaniu w temp. 820–850°C i odpuszczaniu w temp. 480–630°C. Ponadto w badanej strukturze ujawniono wtrącenia niemetaliczne, głównie tlenki aluminium (Al_2O_3) i siarczki manganu (MnS). Analizę składu chemicznego ujawnionych wtrąceń przy użyciu mikroanalizy rentgenowskiej przedstawiono na rysunku 10.

Próbki stali P54T w stanie początkowym, tj. niepoddane obciążeniom zmęczeniowym, wykazują strukturę ferrytyczno-perlityczną. Ferryt występuje na granicach pierwotnych ziaren austenitu (rys. 11 – mikroskop optyczny, rys. 12 – mikroskop skaningowy).

Próbki stali P54T poddane obciążeniom zmęczeniowym wykazują strukturę ferrytyczno-perlityczną. Podobnie jak w stanie wyjściowym, ujawniono wtrącenia niemetaliczne, głównie tlenki aluminium Al_2O_3 i siarczki manganu MnS .

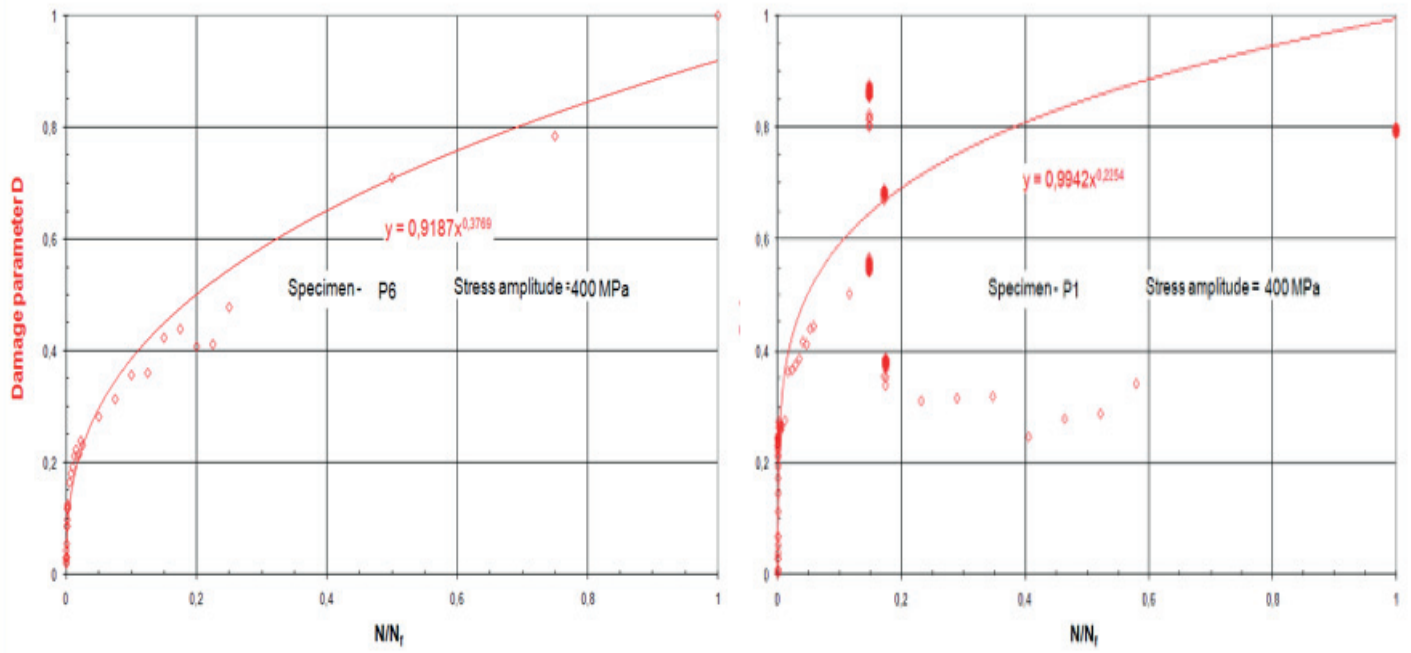


Rys. 10. Obrazy wtrąceń niemetalicznych i ich wpływ na zarodkowanie pęknięć materiału

W stosunku do stanu wejściowego ujawniona struktura charakteryzuje się:

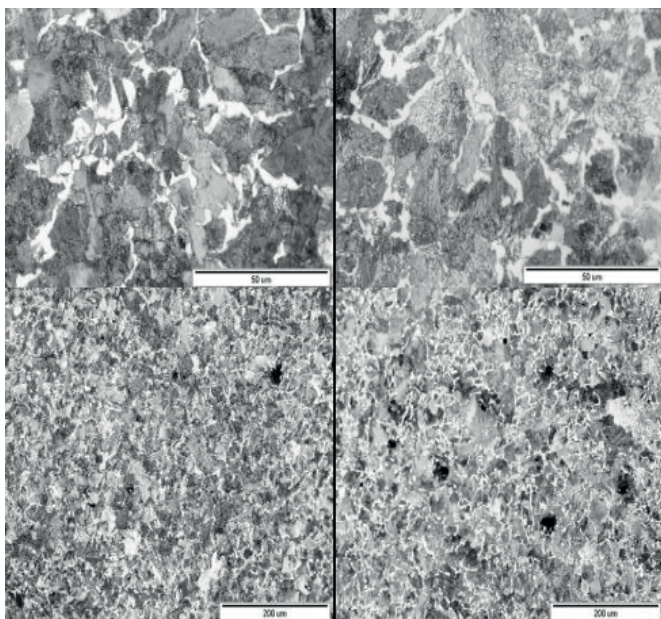
- większym rozdrobnieniem perlitu;
- utratą ciągłości materiału na niektórych wtrąceniach niemetalicznych, takich jak siarczki manganu MnS i tlenek aluminium Al_2O_3 .

W wyniku hartowania otrzymano strukturę sorbityczną (rys. 16). Ujawniono występowanie nielicznych wysp martenzytu z charakterystycznym układem igieł martenzytu oraz pęknięcia płytek cementytu (na rys. 15). Wybrane fotografie zamieszczone na rysunku 15 przedstawiają fragment struktury przewężenia próbki klepsydrycznej, w którym wykryte wtrącenie niemetaliczne rozsada gniazdo, przenosząc pęknięcie w kierunku materiału.



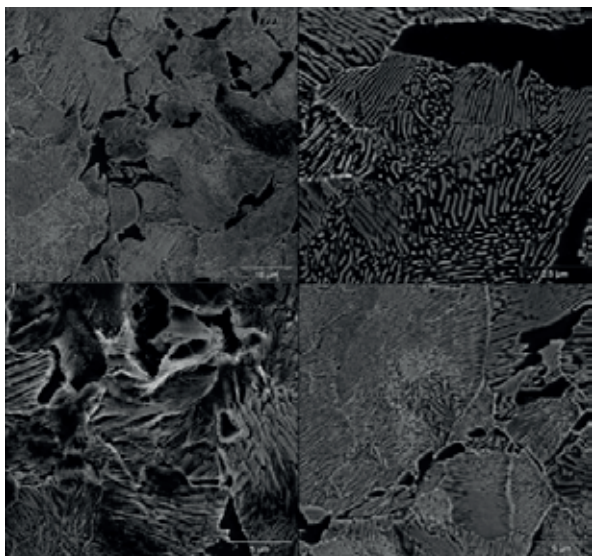
Rys. 9. Zmiany odkształceń oraz parametru uszkodzeń dla próbki P6 w funkcji liczby cykli (z lewej), dla próbki P1 w funkcji liczby cykli (z prawej)

reklama

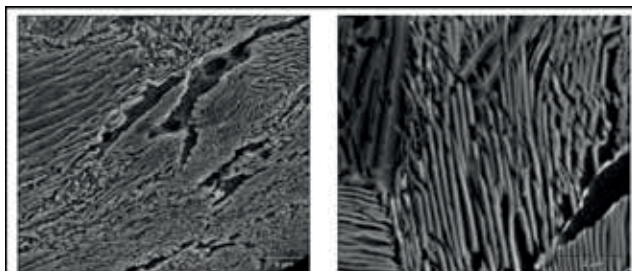


Rys. 11. Stan początkowy w osi próbki klepsydrycznej – mikroskop optyczny

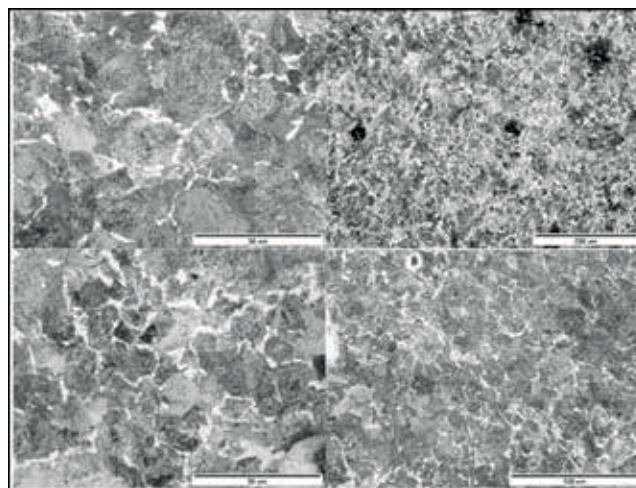
Struktury wtrąceń niemetalicznych nie są wykrywane metodami defektoskopowymi, a mogą być i są przyczyną pęknięcia zestawów kołowych. W eksploatacji osi zestawów kołowych odnotowano przypadki pęknięć od wtrąceń niemetalicznych nieprzekraczających 200 nm.



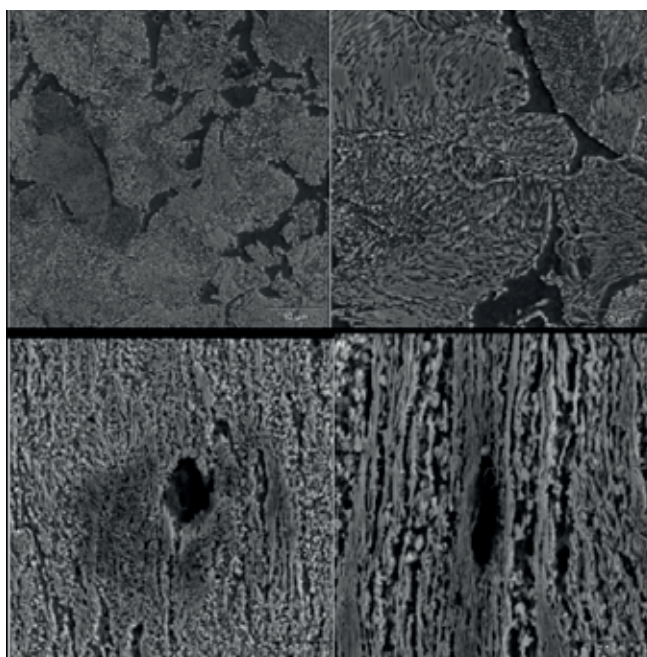
Rys. 12. Stan początkowy w osi próbki klepsydrycznej – mikroskop skaningowy



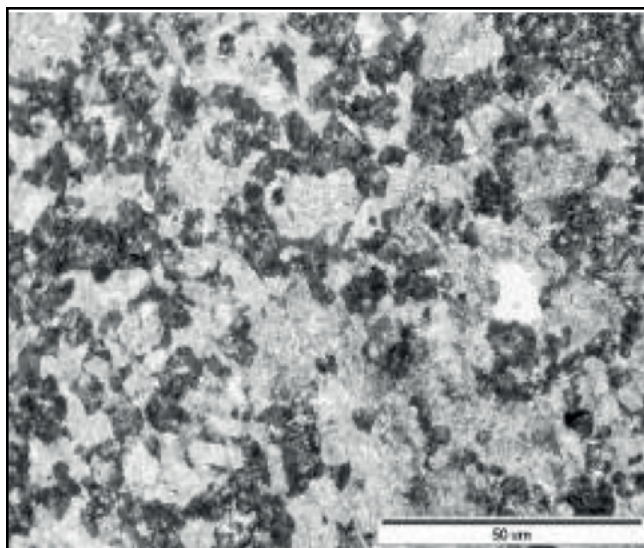
Rys. 13. Płytkowa budowa perlitu, stan początkowy w osi próbki klepsydrycznej – mikroskop skaningowy



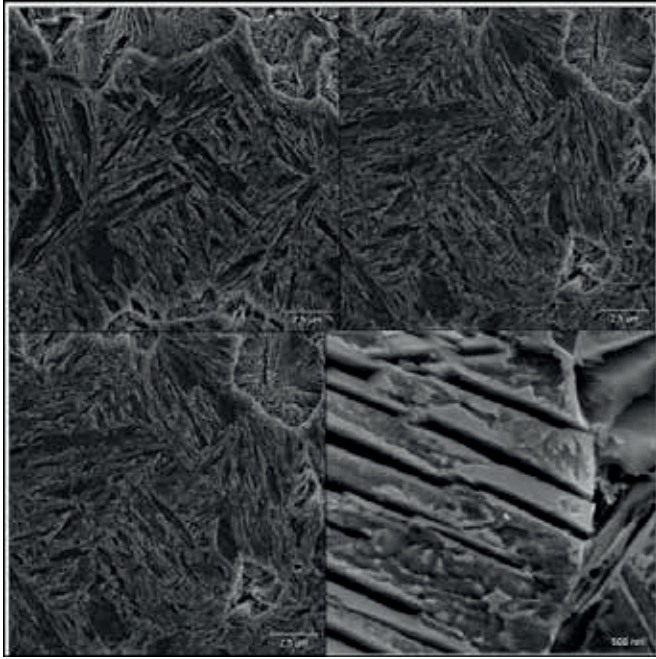
Rys. 14. Środek próbki klepsydrycznej – mikroskop optyczny



Rys. 15. Środek próbki klepsydrycznej – mikroskop skaningowy



Rys. 16. Stan po hartowaniu, środek próbki klepsydrycznej – mikroskop optyczny

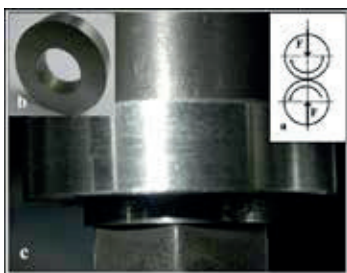


Rys. 17. Stan po hartowaniu, środek próbki klepsydrycznej - mikroskop skaningowy

1.4. Związki obciążeń eksploatacyjnych z parametrami fizycznymi materiału

Przenikalność magnetyczna i przewodność elektryczna w funkcji degradacji materiału

Badania przeprowadzono metodą rolka – rolka [2] na stanowisku badawczym AMSLER (Rys.18). Jest to złożone zagadnienie w temacie trybologii, bardzo istotne dla kolejnictwa. Pozycję rolki napędzającej stanowił pierścień ze stali szynowej 900A. Pierścień przeciwołki wykonany był ze stali T54 stosowanej na obręcze zestawów kołowych [9, 10 11]. Do eksperymentu przygotowano 6 par pierścieni. Dla przyspieszenia procesu zmęczenia materiału zastosowano obciążenie 815 MPa i poślizg 10%.



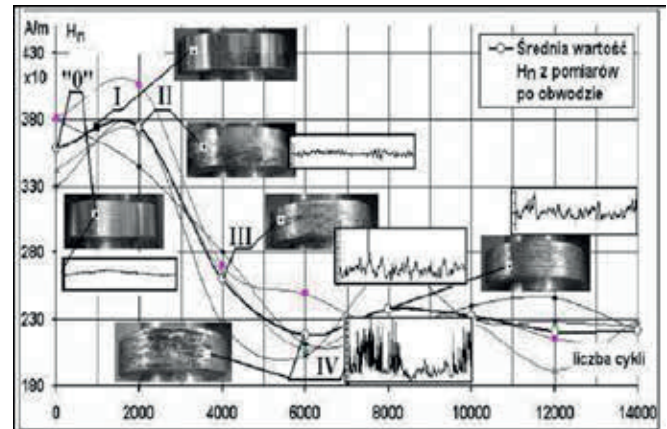
Rys. 18. Pierścień przed i po zamocowaniu



Rys. 19. Podczas pomiaru składowej natężenia pola magnetycznego H_t

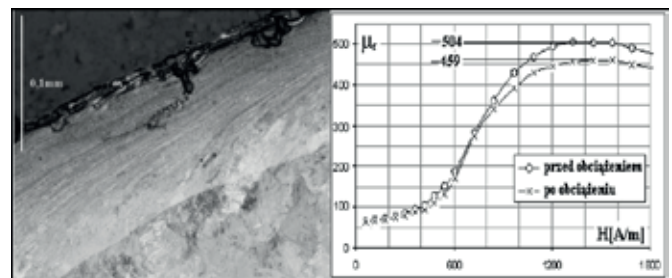
Odształcenia w warstwie powierzchniowej i przypowierzchniowej pokazane na fotografii są powodem zmian przenikalności magnetycznej warstwy powierzchniowej, gdzie widzimy złuszczenie materiału pod nią, gdzie widoczna jest warstwa odształcona plastycznie zgodnie ze skalą widoczną na rysunku (rys. 21).

Wykryto wpływ obciążenia mechanicznego (z danego na stanowisku pomiarowym) warstwy wierzchniej na wynikową uśrednioną zmianę przenikalności magnetycznej próbek pierścieniowych sięgającą 9%. W tej wartości należy doszukiwać się zmian magnetosprężystych w warstwie uszkodzonej, jak i w całym krążku.



Rys. 20. Korelacje pomiędzy składową normalną a stanem powierzchni krążka opisanym składową styczną natężenia pola magnetycznego

Fotografia z wycinka warstwy wierzchniej i podpowierzchniowej odzwierciedla stan obraca składowej pola magnetycznego (rys. 19, 20)



Rys. 21. Fotografia wycinka przekroju warstwy wierzchniej krążka ze stali 900A, wpływ obciążeń mechanicznych na zmianę przenikalności magnetycznej próbek pierścieniowych

Szczegółowy obraz powierzchni z fotografii wycinka (rys. 21) jest trudny do analizy, przebiegi zmian rejestrowanego pola magnetycznego uwidaczniają związek ze stanem powierzchni (rys. 20).

1.5. Związki obciążeń eksploatacyjnych z parametrami fizycznymi materiału

Zmiany parametrów elektrycznych i magnetycznych cewki testującej w funkcji degradacji materiału

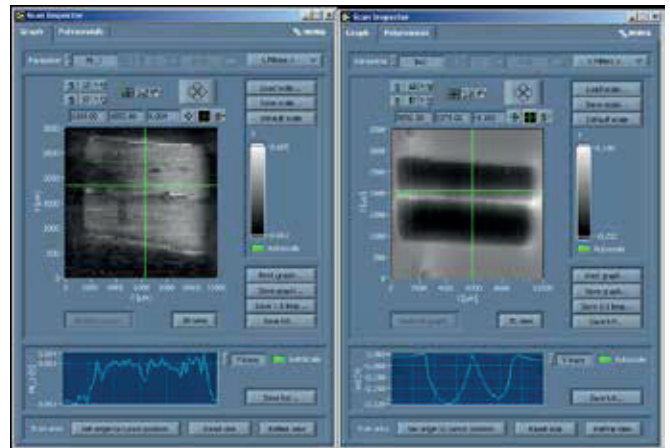
Metoda badania struktury charakteryzującej zmęczenie materiału mikroskopem BEMI przedstawiono na przykładzie

badania materiału obręczy stalowych kół jezdnych lokomotywy. Pomiar zmian magnetycznych stali obręczy wykonane były mikroskopem BEMI (*Barkhausen Noise and Eddy Current Microscope*) zbudowanym i znajdującym się w IZPF, skanującym powierzchnię ze skokiem o dokładności mikrometrycznej (rys. 22) Badania wykonano na próbkach badanych uprzednio na stanowisku AMSLER na wydziale transportu Politechniki Śląskiej [2, 9, 10, 11].



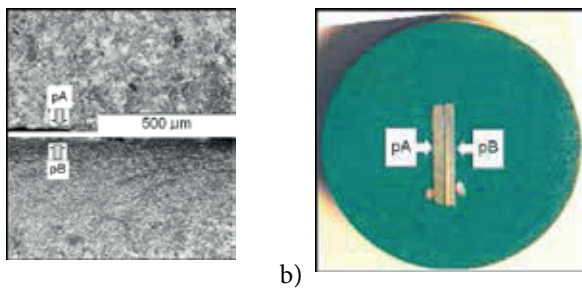
Rys. 22. Stanowisko BEMI – Barkhausen Eddy Current Microscope izfp

pokazano na rysunku od 24. Badania wiroprowdowe są badaniami szeroko rozpowszechnionymi w technikach NDT.



Rys. 24. Wyniki skanowania zglądu

Badania przeprowadzone na mikroskopie BEMI są badaniami, unikalnymi co do testowanego materiału, zakresu badań jak i zastosowanej metodyki. Równoczesne badanie materiału nowego i eksploatowanego miało na celu na wykazanie względnych zmian sygnałów sond pomiarowych z obu powierzchni próbek. Zadanie powiodło się dla zakresu badań prądami wirowymi. Pod sondą mikroskopu BEMI [70] umieszczono próbki zatopione w tworzywie. Możliwość ta zapewniła zachowanie stałej odległości powierzchni sondy (rys. 22) od powierzchni materiału. Detekcja szumu Barkhausena wymagała umieszczenia próbek bezpośrednio w szczelinie obwodu magnesującego, co z kolei wiązało się z trudnością ich poziomowania. Wyniki pomiaru szumu Barkhausena dla określonego namagnesowania i zasadę magnesowania pokazano na rysunku 25. Wyniki pomiaru składowych napięcia sondy (kolejno dla: 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 MHz) przedstawiono na kolejnych rysunku 25.

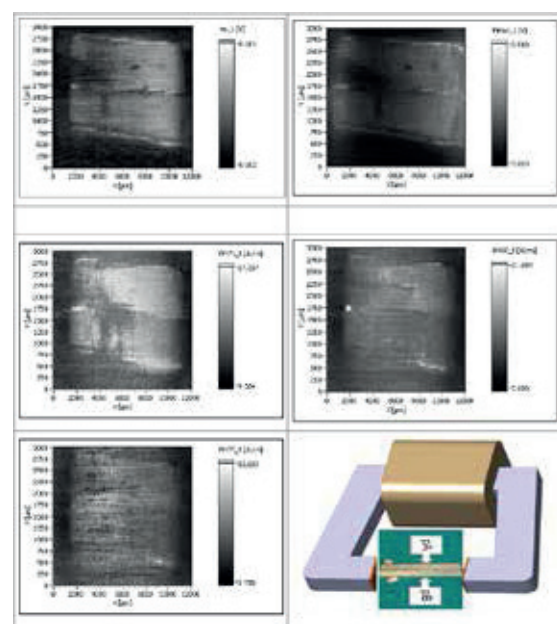


Rys. 23. Struktura materiału próbek - a - próbki zatopione; b - ich zgląd

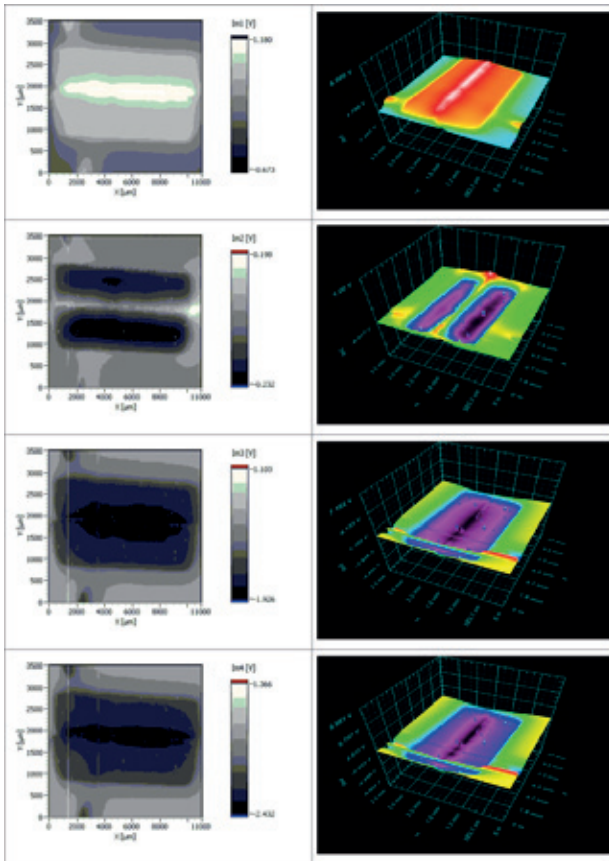
W instytucie Fraunhofera – IZFP (Institut Für Zerstörung – Freie Prüfverfahren, Saarbrücken, Niemcy) przeprowadzono serię badań na mikroskopie na materiale z rys. 21. Wyniki badań obrazowane są na rysunkach 24-31.

Po raz pierwszy poddano jednoczesnemu magneto-indukcyjnemu porównaniu materiałów dwóch próbek (nowej i odkształconej od naprężenia kontaktowego tocznego) [7]. Próbki ze stali niskowęglowej zatapiano w tworzywie (inkludowano od inkluzji), aby pozyskać ich wspólny zgląd. Uzyskane struktury oraz obrazy BEMI pokazane zostały na poniższym obrazie (rys. 23a;b).

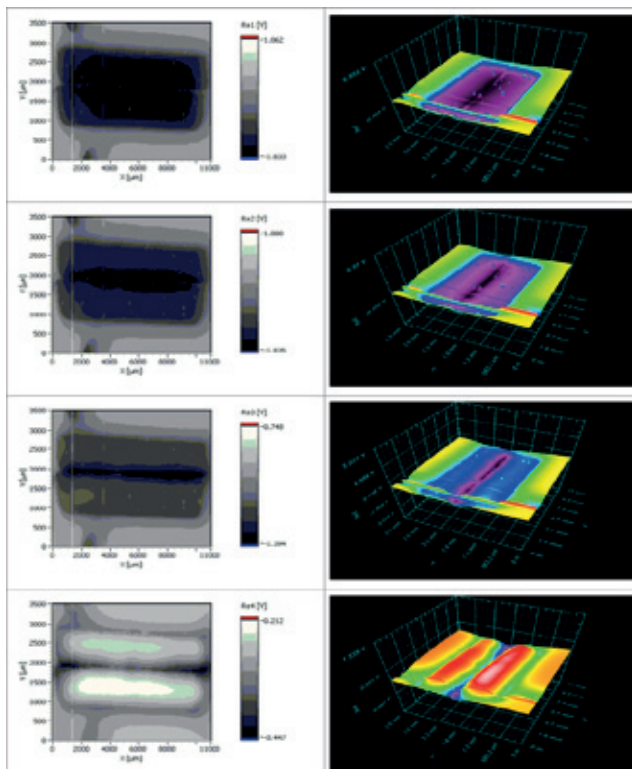
Próbka – pA, wycięta z obręczy koła nowego, przedstawia jednolitą strukturę ferrytyczno-perlityczną. Próbka wycięta z powierzchni tocznej zestawu eksploatowanego (pB) wykazuje znaczną degradację struktury materiału, silne rozdrobnienie ziaren oraz zawalcowania w stosunku do stanu początkowego próbki koła nowego. Stopień degradacji materiału (wycinek eksploatowanej obręczy koła zestawu kołowego – pB) wskazywałby na łatwość detekcji odkształceń plastycznych. Wyniki skanowania powierzchni sondami wiroprowdową i Barkhausena



Rys. 25. Mapy szumu Barkhausena próbek i zobrazowany sposób magnesowania

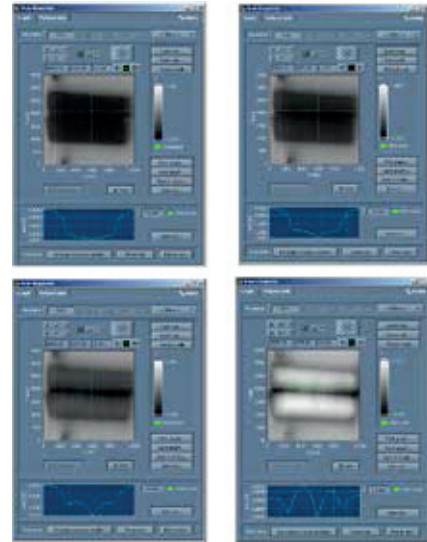


Rys. 26. Mapy wiroprądowe 2D próbek dla składowej urojonej $Im [V]$ po obróbce cyfrowej obrazu oraz odpowiednie mapy wiroprądowe 3D próbek (dla zmodyfikowanego oprogramowania)



Rys. 27. Mapy wiroprądowe 2D próbek dla składowej rzeczywistej $Re [V]$ po obróbce cyfrowej obrazu oraz odpowiednie mapy wiroprądowe 3D

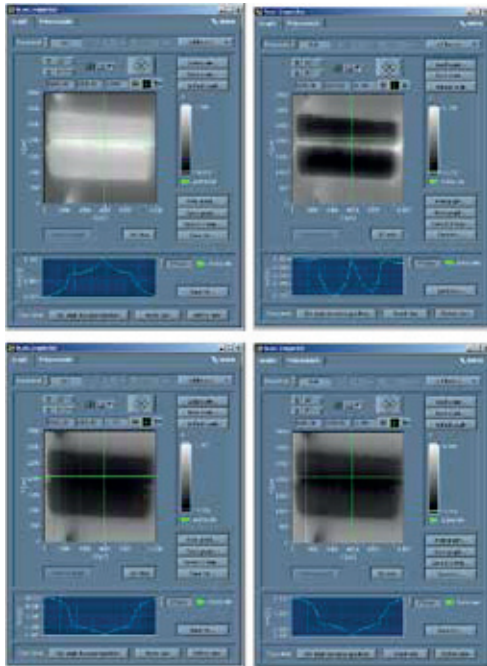
Jak pokazano na rysunkach (rys. 26, 27), nowy sposób wizualizacji wyników pomiarów 3D (opracował Ralf Tschuncky w zakładzie Klausa Schilasko, IZFP) ma wpływ na przyspieszenie oceny stopnia degradacji materiału. Także wyniki pomiaru składowych napięcia sondy (rys. 28) uzyskane dla kolejnych częstotliwości skanowania w podstawowej wersji oprogramowania wskazują wyraźnie na możliwość detekcji odkształceń plastycznych i zmężeń w zakresie od 2 MHz (rys. 29).



Rys. 28. Ekran mikroskopu BEMI (mapy prądów wirowych - $Re [V]$)

reklama

reklama



Rys. 29. Ekran mikroskopu BEMI (mapy prądów wirowych - Im [V])

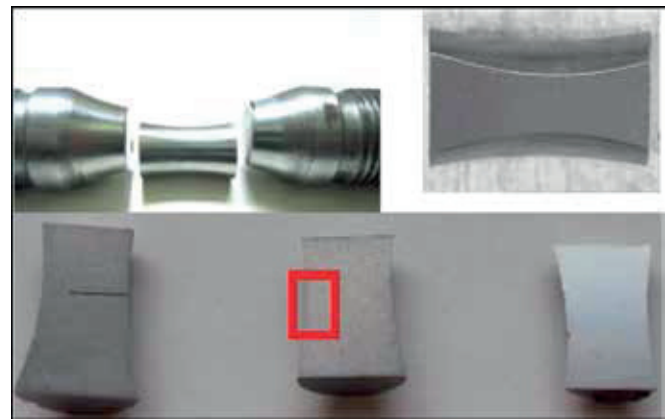
Wykrywanie degradacji zmęczeniowej jest zagadnieniem bardzo złożonym ze względu na wskazanie dodatkowymi badaniami zakresów czułości stali magnetycznych, jak i możliwości pomiarowe zastosowanych urządzeń defektoskopowych.

1.6. Detekcja obciążeń zmęczeniowych w funkcji cykli zmęczeniowych

Rozróżnienie stanu obciążeń próbek jest możliwe przez zastosowanie odpowiedniej wartości nasycenia pola magnetycznego i odpowiedniego przedziału częstotliwości. Częstotliwości pracy głowicy wiroprowodowej oraz poziomy nasycenia magnetycznego materiału zastosowane na stanowisku BEMI nie mają odniesień do zastosowań przemysłowych.

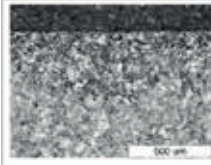
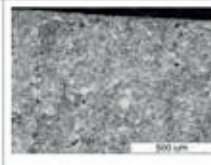
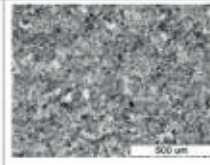
Ten sam zakres badań wykonano dla próbek poddanych obciążeniom zmęczeniowym. Oceniano ilościowe i jakościowe zmiany obrazu sygnałów wiroprowodowych i szumu Barkhausena środkowych części próbek klepsydrycznych. Próbki przecięto wzdłuż, uzyskując dwie połówki, które szlifowano, a jedną z nich wypolerowano. Proces przygotowania próbek i miejsce badania struktur pokazano na rysunku 30.

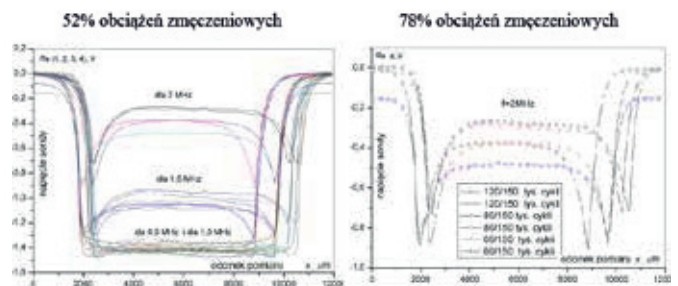
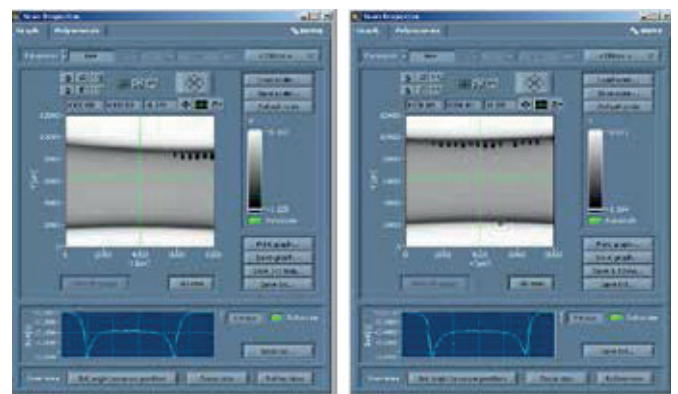
Obrazy struktur dla części środkowych próbek pokazano w tabeli 8. Wzorcowanie zmęczeniowe wykonano według procedury opracowanej w Zakładzie Wytrzymałości Materiałów IPPT PAN. Wyniki pomiarów zamieszczono na rysunkach na rysunku 30 i tabeli 8. Wyniki przedstawione na rysunku 33 potwierdzają konieczność stosowania wysokiej częstotliwości pracy głowicy wiroprowodowej (2,0 MHz) w celu wykrycia obciążeń zmęczeniowych oraz wskazują na nieliniowość związku liczby cykli obciążeń zmęczeniowych i napięcia pomiarowego sondy. Na kolejnym rysunku (rys. 4.25) zestawiono dla porównania wyniki pomiaru dla próbek obciążonych współpracą kontaktową (rys. 4.17). Wykazano różnicę sygnału napięciowego sondy wiroprowodowej w granicach kilkunastu procent, jak pokazano na rysunku 34



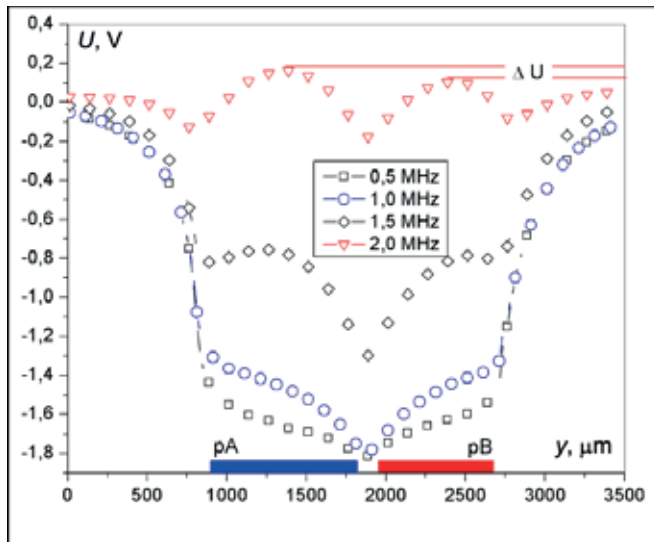
Rys. 30. Proces przygotowania próbek do badań na mikroskopie BEMI

Tabela 8 Przykładowe obrazy struktur po wprowadzeniu obciążeń zmęczeniowych

		
Próbka wzorcowa- na zmęczeniowo 78% (120/150 tys. cykli)	Próbka wzorcowa- na zmęczeniowo 52% (80/150 tys. cykli)	Próbka wzorcowa- na zmęczeniowo 39% (60/150 tys. cykli)

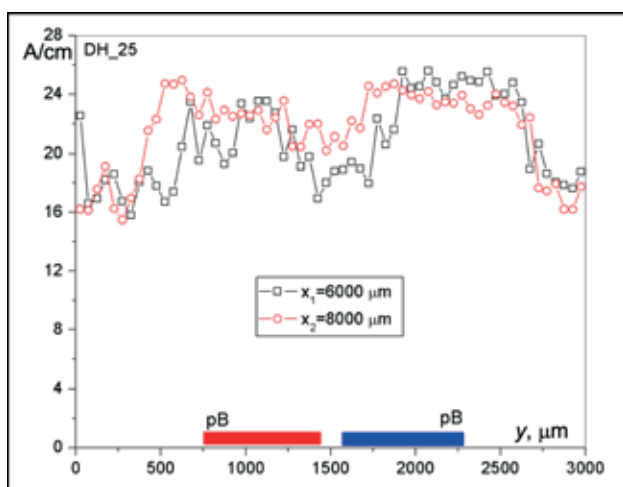


Rys. 31. Wybrane obrazy wiroprowodowe i zarejestrowane poziomy sygnały sondy wiroprowodowej dla czterech częstotliwości



Rys. 32. Przebieg napięcia sondy wiroprowadowej na szerokości próbek z rysunku 29

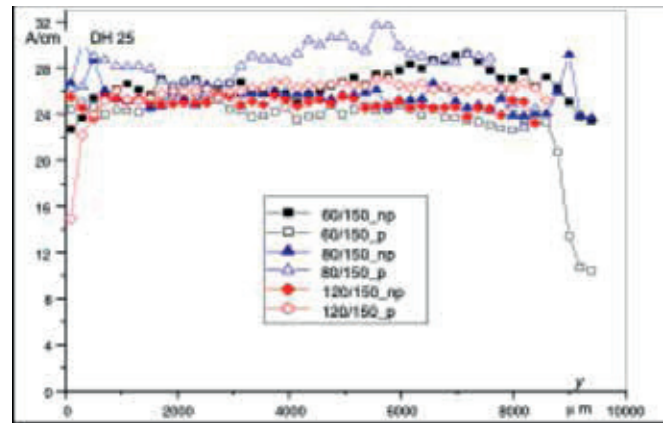
Porównanie próbek (rys. 34) metodą szumu Barkhausena nie daje jednoznacznych wyników w przypadku zmian magnetycznych i elektrycznych materiału (rys 33).



Rys. 33. Rozkład szumu Barkhausena w przekrojach x1 i x2

Na rysunku 33 zestawiono wyniki pomiaru dla próbek klepsydrycznych poddanych obciążeniom mechanicznym cyklicznie zmiennym – polerowanych i niepolerowanych. Wynik badania szumu Barkhausena nie pozwala na jednoznaczną detekcję zróżnicowanego obciążenia zmęczeniowego.

Posługując się metodą wiroprowadową, można zdiagnozować stan materiału tuż przed pęknięciem. Ważny jest dobór częstotliwości pracy sondy, który jednak jest w warunkach poligonowych ograniczony chropowatością odlewu lub odkuwki (tarcza koła pojazdu szynowego). Dalsze badania wykażą, że wykrywanie obciążeń zmęczeniowych jest możliwe nie tylko w badaniach laboratoryjnych.

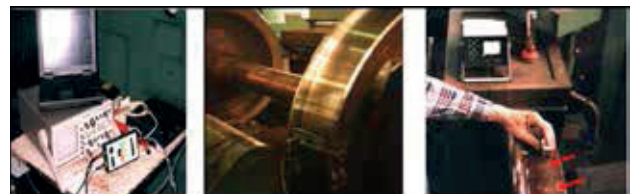


Rys. 34. Rozkład szumu Barkhausena próbek dla różnych stopni degradacji zmęczeniowej

1.7. Badania poligonowe zestawów kołowych

Badanie zestawów kołowych pojazdów szynowych jest ważnym elementem bezpieczeństwa ruchu kolejowego. Sondę pomiarową zastosowano w badaniach zmęczenia materiału i detekcji wad w obręczach oraz czopach osi zestawów kołowych.

Badano zestawy kołowe przeznaczone do regeneracji (po określonym czasie przebiegu) i zestawy po regeneracji (naprawy z przytoczeniem na kolejny poziom naprawczy). Przygotowane stanowisko pomiarowe z oprzyrządowaniem i sondą pomiarową zamocowaną przy badanej powierzchni obręczy zestawu po przeprowadzonej regeneracji zamieszczono na rysunku 35.



Rys. 35. Fotografia stanowiska pomiarowego

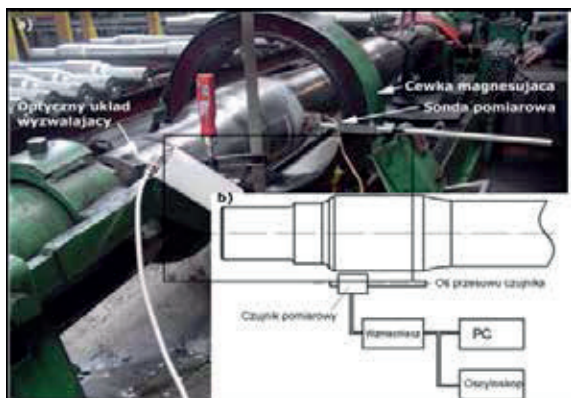
Obręcz zestawu skanowano sondą Na powierzchni obwodu koła (rys. 35) na kierunku 120° wykryto strefę zmian materiału. Zmiany te, jak się okazało, były spowodowane wadliwą eksploatacją związaną z długotrwałymi obciążeniami w zakresie górnej granicy odkształceń sprężystych (od tzw. płaskiego miejsca). Wykryto strefy martenzytu (widoczne po przetarciu plastrem cytryny) powstałe wskutek obciążeń mechanicznych z fazy austenityczno-martenzytycznej (rys. 35). Badaniami defektoskopowymi ultradźwiękowymi nie wykryto tych stref. Jest to typowy stan zmęczenia materiału stali austenityczno-martenzytycznej, będący przyczyną powstawania pęknięć. W sprężystej obręczy stalowej powstają strefy materiału kruchego i twardego. Fakt ten skłania służbę eksploatacji kolei do zmian obowiązujących przepisów, które, jak wykazano, są niewystarczające.

Zastosowana w badaniach zestawów kołowych sonda pomiarowa może uzupełnić defektoskopię ultradźwiękową. Sonda umożliwia wykrywanie;

- zmiany ciągłości materiału;
- zmiany struktury;
- zmiany naprężeń wewnętrznych.

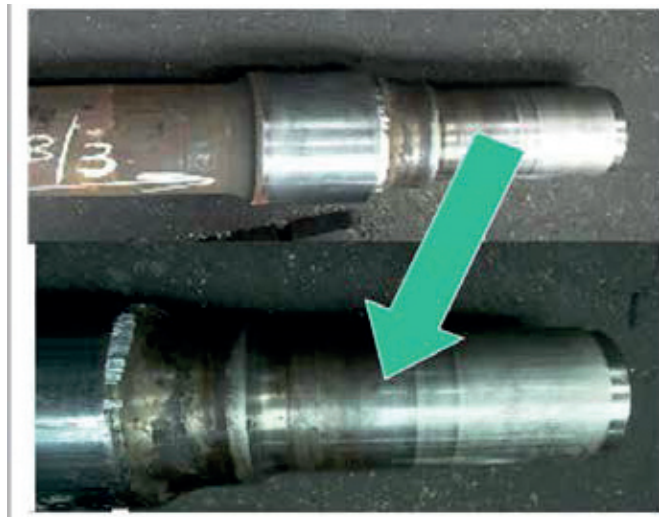
1.8. Badania czopów i osi zestawów kołowych

Oprócz możliwości badań osi, które do tej pory są realizowane metodą magnetyczno-proszkową i dla których wprowadzane są metody magnetyczno-pomiarowe (jak pokazano na rysunku 36), poważny problem stanowi proces naprawy czopów osi zestawów kołowych.

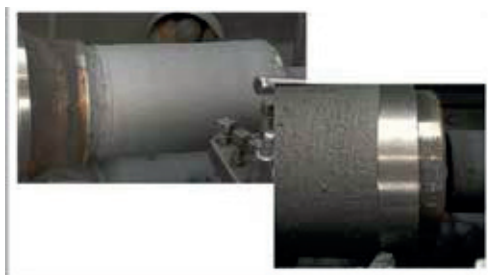


Rys. 36 Stanowisko pomiarowo-badawcze

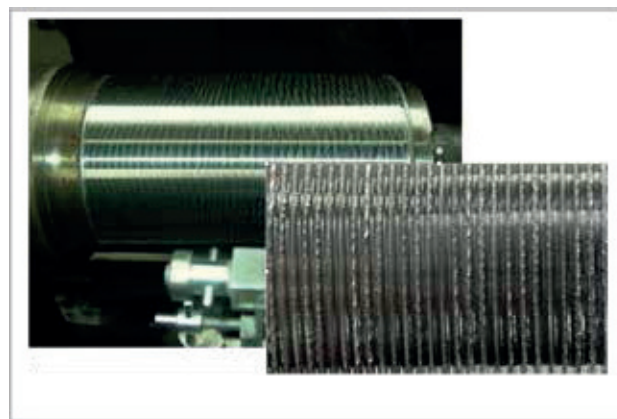
Trudność ta wynika z procesu metalizacji i grubości warstwy nałożonej na materiał rodzimy. Badania te rozpoczęto na zlecenie Zakładów Naprawy Lokomotyw PKP CARGO SA. Proces naprawy ilustrują kolejne fotografie pokazane na rysunkach 37 do 40.



Rys.37 Uszkodzony czop osi wału



Rys. 38 Przygotowanie powierzchni czopu

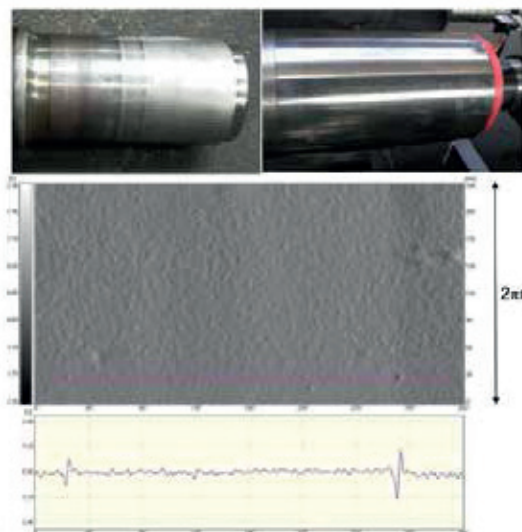


Rys. 39 Metalizowanie i obróbka powierzchni

Badanie elementów okrągłych wymaga zminimalizowania wartości promieniowego bicia elementu i odległości od przetwornika pomiarowego.

Znaczenie przetwarzania sygnału i przetwarzania obrazu dla wszystkich metod badawczych obrazuje przykład czopa osi po regeneracji, który po przejściu przez badania ultradźwiękowe został dopuszczony do eksploatacji. Jednak badania magnetyczne wykazały błędy procesu produkcji badanej osi.

Badania powierzchni tocznej kół przeprowadzono na stanowisku z układem napędowym (rys. 41 a). W badaniach tych wykorzystano układ oraz sondę pomiarową do wykrywania wad powierzchniowych oraz podpowierzchniowych w elementach pojazdów szynowych. Badanie zmian struktury materiału



Rys. 40 Czop osi przed i po regeneracji oraz rozwinięty obraz defektów warstwy napawanej

(np. od utwardzeń cieplnych) przeprowadzono na stanowisku pokazanym na rysunku 41 b.

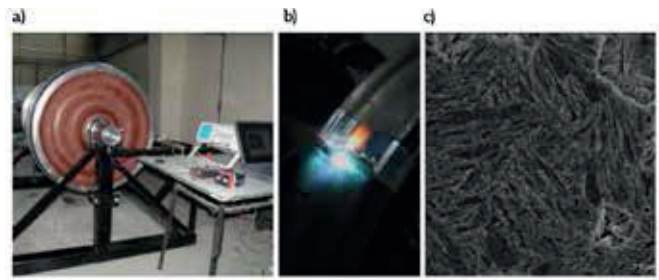
Miejsce powierzchni tocznej obręczy podgrzano palnikiem acetylenowo-tlenowym, następnie powierzchnię schłodzono wodą. Wykresy zamieszczone na rysunku 41 a i 41 b przedstawiają przebiegi zmian pola magnetycznego powierzchni tocznej koła nowego i koła z punktowym podgrzaniem.

2. METODOLOGIA BADAŃ MATERIAŁU ZA POMOCĄ SPEKTROSKOPII IMPEDANCJI

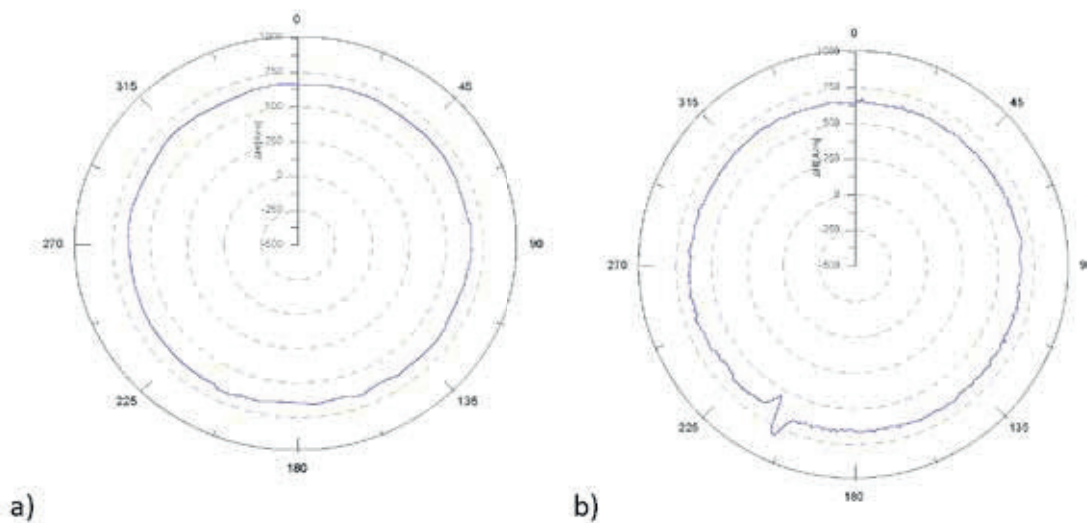
Badania nieniszczące

Rozkład natężenia pola i prądów wirowych w próbkach cylindrycznych oraz ich przenikalność skuteczna dla jednakowego stosunku f/f_g nie są identyczne. Jest to tzw. prawo podobieństwa, sformułowane przez F. Förstera i jego współpracowników. Częstotliwość graniczna jest opisana zależnością:

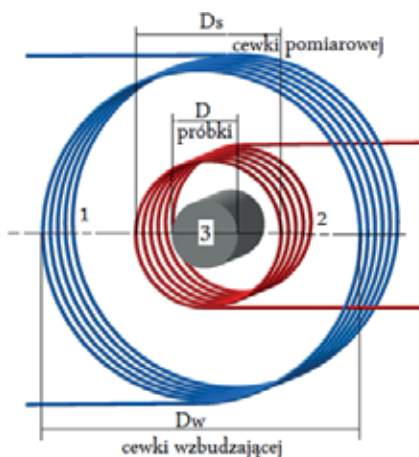
Przenikalność skuteczna $\underline{\mu}_{sk}$ materiału jest podstawową wielkością charakteryzującą stan próbki znajdującej się w zmiennym polu magnetycznym.



Rys. 41 Widok stanowiska do badań powierzchni tocznej kół kolejowych zestawów kołowych (a) hartowanie powierzchni tocznej (b), stan po hartowaniu (c)



Rys. 42 Sygnał pomiarowy sondy dla koła nowego (a), oraz po hartowaniu miejscowym (b)



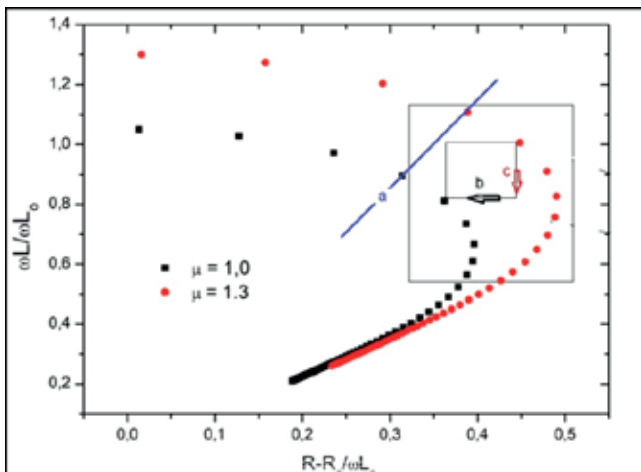
$$f_g = \frac{2}{\pi D_p^2 \gamma \mu_r \mu_o}$$

$$\frac{\text{Re } \underline{\varepsilon}}{\varepsilon_0} = \frac{R}{\omega L_0} = -\text{Im } \underline{\mu}_{sk}$$

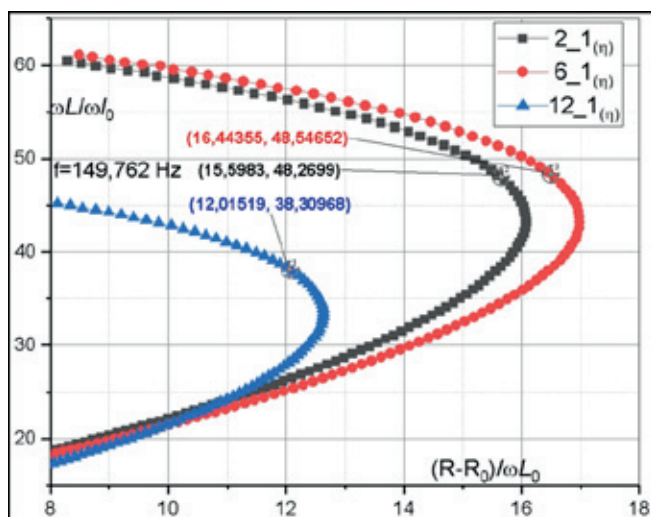
$$\frac{\text{Im } \underline{\varepsilon}}{\varepsilon_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} = \text{Re } \underline{\mu}_{sk}$$

$$\underline{\mu}_{sk} = \text{Re } \underline{\mu}_{sk} + i \text{Im } \underline{\mu}_{sk}$$

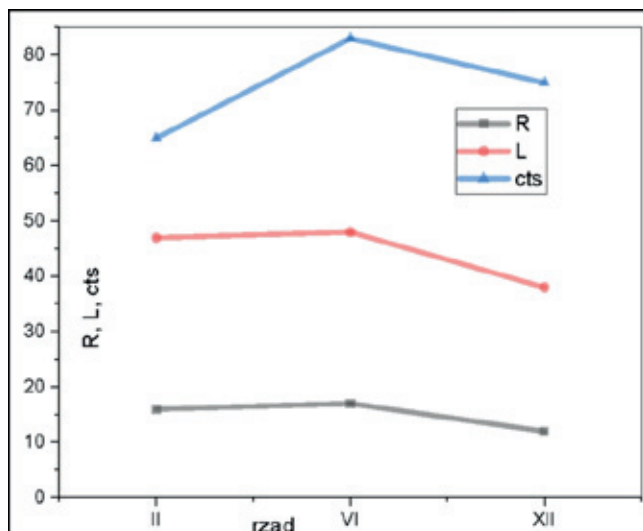
Rys. 43. Analizowany model uzwojenia



Rys. 44. Rysunek przedstawia przebiegi składowych impedancji dla austenitów różniących się przenikalnością magnetyczną



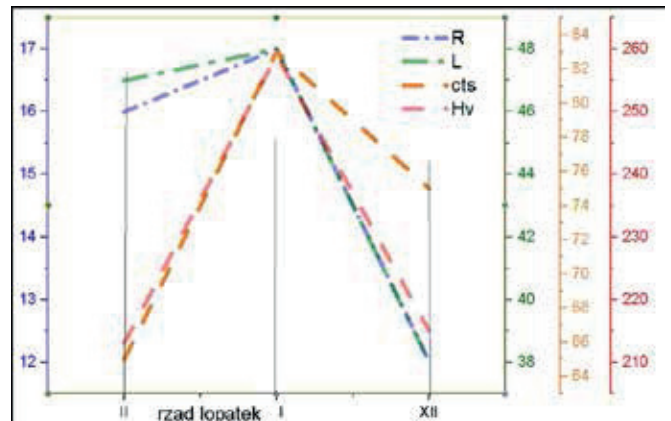
Rys. 45 Porównanie materiału łopatek eksploatowanych z rzędu 2, 6, 12



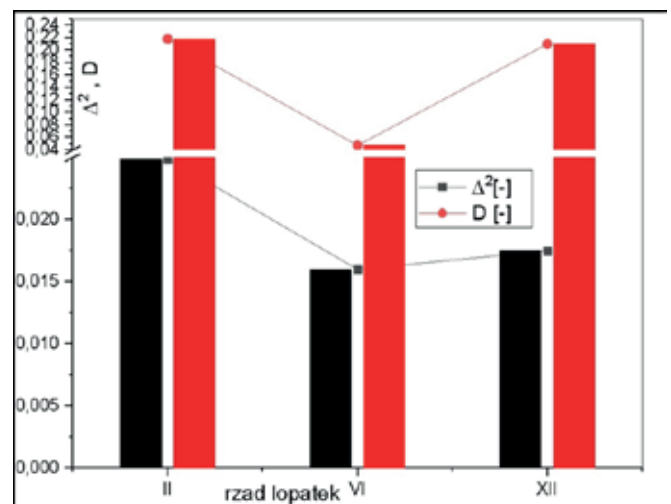
Rys. 46. Porównanie wyniku wybranego do analizy z wynikami refleksów rentgenowskich

Dla próbek magmatycznych (niemagnetycznych $\mu = 1$) całkowicie wypełniających cewkę ($\eta = 1$), otrzymamy następujące na poniższych wzorach.

Jak poniżej przedstawiono rozkład składowych dla zależności f/f_s . Pokazany materiał austenityczny wykazuje różne wartości i kierunki zmian składowych impedancji (rys. 44, 45).



Rys. 47. Porównanie wyników na tle pomierzonej mikrotwardości z kwadratem szerokości linii dyfrakcyjnych cts



Rys. 48. Porównanie parametru D2 z parametrem D uszkodzenia zmęczeniowego

Przeprowadzona korelacja Pearsona (dla aproksymowanych przebiegów liniowych) i badanie współczynnika podobieństwa zmierza do sformułowania poniższych wniosków.

Na poniższych rysunkach przedstawiono wyniki badań turbiny 200 MW. Podanie badanych gatunku stali i typu remonowanej turbiny są uwarunkowane prawami zakładu. Badania objęte są terminem poufności. Dotarcie do materiałów jedynie przez autora doktoratów [10, 11].

Tabela 7. Korelacja Pearsona dla wybranych parametrów degradacji materiału

	cts	Δ^2	R	L	Fe-Cr [A]	Cr ₂₃ C ₆ [A]	HV0,1
cts	1	-0,98213	-0,04426	-0,20229	-0,99155	-0,56442	0,65906
Δ^2	-0,98213	1	0,231151	0,38301	0,99825	0,70971	-0,50571
R	-0,04426	0,23151	1	0,98732	0,1735	0,84966	0,72219
L	-0,20229	0,38301	0,98732	1	0,32765	0,9226	0,60322
Fe-Cr	-0,99155	0,99825	0,1735	0,32765	1	0,66675	-0,55591
Cr ₂₃ C ₆	-0,56442	0,70971	0,84966	0,9226	0,66675	1	0,24886
HV0,1	0,65906	-0,50571	0,72219	0,60322	-0,55591	0,24886	1

Wykazano: wysoki stopień podobieństwa przebiegu unormowanej składowej rzeczywistej **Re** oraz urojonej **Im** impedancji **Z** (badania nieniszczące) z wyznaczonymi parametrami sieciowymi dla węgla chromu **Cr₂₃C₆**

(badania niszczące). Dodatkowo istotny związek twardości HV0,1 ze składową urojoną **Im** impedancji **Z**. Bardzo silny związek ilości zaliczeń refleksów – Height [cts] z kwadratem szerokości linii dyfrakcyjnej Δ^2 oraz z parametrem

sieciowym Fe-Cr [A] dla badanej stali łopatek, (powszechnie pomijany w metodach dyfrakcyjrentgenowskiej jako nieistotny).

Literatura

- [1] KOCAŃDA S.: *Zmęczeniowe niszczenie metali*, WNT 1978, Warszawa, 1978.
- [2] ŻUREK Z.H.: *Badania stanu ferromagnetycznych elementów maszyn w polu magnetycznym*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, ELEKTRYKA z. 196, MONOGRAFIA, str. 1–150, Gliwice 2005.
- [3] ŻUREK Z.H.: *Opracowanie metody magnetycznej do wczesnej detekcji procesów zmęczeniowych w stalach niskostopowych niskowęglowych N N507 0807 3*
- [4] DIETRICH L.: *Procesy rozwoju uszkodzeń struktury materiałów przy obciążeniach eksploatacyjnych*. [w:] *Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji*. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów. Zakopane, 10–13 grudnia 2003.
- [5] DIETRICH L.: *Rozwój uszkodzeń struktury i ocena stopnia degradacji materiałów konstrukcyjnych*. [w:] *Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji*. Seminarium szkoleniowe nt. Monitorowanie uszkodzeń strukturalnych i laserowe obróbki materiałów, Zakopane, 15–17 grudnia 2004.
- [6] DIETRICH L., RUTECKA A., KOWALEWSKI Z.: *Mechanical characterization – Fatigue and Creep of A356+TiB2 based MMC*. IPPT Report 2009 for INASMET w San Sebastian, Hiszpania.
- [7] ŻUREK Z.H.: *Wprowadzenie do elektromagnetycznej diagnostyki degradacji stali*. Wydaw. Politechniki Śląskiej, MONOGRAFIA; nr 423, Gliwice 2012.
- [8] ŻUREK Z.H.: *Obwody RLC w diagnostyce i eksploatacji maszyn*. Wydaw. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [9] SOCHA G.: *Experimental investigation of fatigue cracks nucleation, growth and coalescence in structural steel*. Int. J. Fatigue, 25, 2003, 139–147.
- [10] Doktorat **Rok:** 2016. BARON D., EthosEnergy Poland SA **Tytuł oryginału:** *Badanie stanu technicznego kołpaków generatorów metodą spektroskopii impedancji*, **PROMOTOR:** Zbigniew Żurek.
- [11] DOKTORAT **Rok:** 2021 JASIŃSKI T., EthosEnergy Poland SA. **Tytuł oryginału:** *Diagnostyka stopnia wypracowania łopatek części wysokoprężnej wirnika turbiny 13K225 metodą magneto-indukcyjną*. **PROMOTOR:** Zbigniew Żurek.

⇒ dr hab. Z. H. Żurek profesor

* www.researchgate

www.ndt.net

reklama