

Czułość detekcji zmian struktury w stali NDT SHM w transporcie

Zbigniew Hilary Żurek, Zbigniew Stokłosa, Bartosz Chmiela, Paweł Idziak, Krzysztof Kowalski

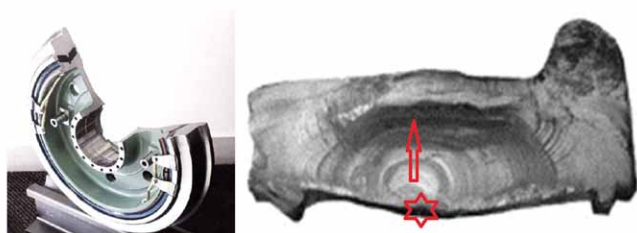
1. Wprowadzenie

Intensywny rozwój technik defektoskopii kolejowych zestawów kołowych nastąpił po wprowadzeniu systemu diagnostycznego AURA (2002–2004). W tym czasie zanotowano także znaczny wzrost średnich i maksymalnych prędkości pociągów. Wraz ze zwiększeniem prędkości nastąpił wzrost dynamiki oddziaływania koło – szyna, pojawiła się zatem konieczność penetracji materiału i detekcji coraz mniejszych defektów, takich jak wtrącenia niemetaliczne czy rozwój pęknięć tych wtrąceń w gniazdach. Istotną jest nie tylko powierzchnia kontaktowa, ale nawet niewielkie wtrącenia niemetaliczne (200 nm), czego dowiodły wyniki badań struktur po testach wytrzymałościowo-zmęczeniowych (1–4, 6, 7, 10) Na rys. 1 pokazano przykład rozwoju pęknięcia dla jednego z rozwiązań konstrukcyjnych koła zestawu (rys 1).

Zagadnienia te były tematyką grantu własnego [2], w którym istotne znaczenie miały badania metalograficzne [3] zmęczeniowe, a także pomiarowe [1, 2, 4]. Modyfikacja metodyki badań znanej z defektoskopii, opisanej w publikacji [5, 10–14], zapewniła możliwość rejestracji z wysoką czułością zmian parametrów magnetycznych i elektrycznych skorelowanych ze zmianami struktur i ich defektami. Głównym obiektem badań minionego okresu były próbki stali typu P54T. Próbkę poddano cyklicznym zmiennym obciążeniom zmęczeniowym na maszynie wytrzymałościowej.

Materiałem dedykowanym do produkcji obręczy wagonów towarowych i osobowych o dużej intensywności eksploatacji jest stal. Jej skład procentowy podstawowych składników stopowych jest następujący: 0,50–0,58% C; 0,15–0,40% Si; 0,6–0,9% Mn. Stal ta stosowana jest w stanie ulepszonym cieplnie po hartowaniu w temperaturze 820–850°C i następnie odpuszczaniu w temperaturze 480–630°C.

W opisywanych badaniach po raz pierwszy poddano jednocześnie porównaniu magneto-indukcyjnemu materiał dwóch próbek (nowej oraz odkształconej przez naprężenia kontaktowe



Rys. 1. Konstrukcja koła i przykład rozwoju pęknięcia [6]

Streszczenie: Metody defektoskopowe dedykowane szczególnie do diagnozowania deformacji i degradacji elementów stalowych wymagają szczegółowych badań parametrów magnetycznych i elektrycznych. W opracowaniu zamieszczono wybrane wyniki badań dotyczących możliwości wykrywania zmian strukturalnych za pomocą metod indukcyjnych. Z grupy metod indukcyjnych opisano badania polegające na rozdzieleniu i szczególnej interpretacji przebiegu składowych impedancji w funkcji pulsacji pola magnetycznego w układzie współrzędnych kartezjańskich, unormowanych według zależności F. Förstera. W wybranych zakresach częstotliwości możliwa jest diagnostyka zarówno stanu powierzchni, jak i głębszych warstw materiału. Zainteresowanie badaniami nieniszczącymi, analizą rozwoju defektu oraz skutecznym i wczesnym wykrywaniem nastąpiło po katastrofie kolejowej w Eschede.

Słowa kluczowe: NDT, SHM, transport, bezpieczeństwo

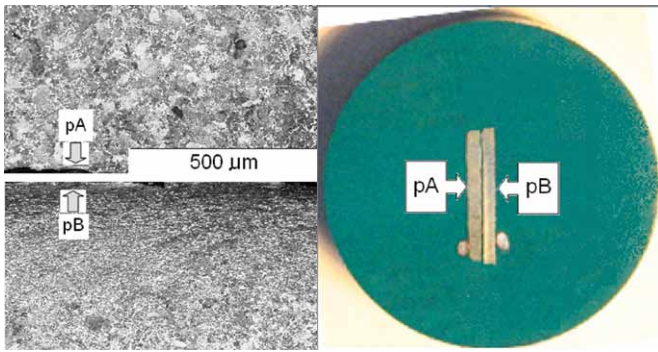
🇬🇧 SENSITIVITY OF THE DETECTION OF STRUCTURAL CHANGES IN STEEL NDT SHM IN TRANSPORT

Abstract: Flaw detection are especially dedicated to diagnosing structures of their deformation and degradation require detailed tests of parameters magnetic and electric. The study includes selected results research related to the possibility of detecting structural changes with the help of induction methods. Inductive methods have been described in research involving chapter and special interpretation of the course of impedance components in function magnetic field pulsation in the Cartesian coordinate system according to F. Förster. In selected frequency ranges, it is possible to identify surfaces and deeper layers of material up to 8 mm. The sensitivity of defect detection using these dependencies is discussed. Effective detection of defects in transport took place several years after (Eschede).

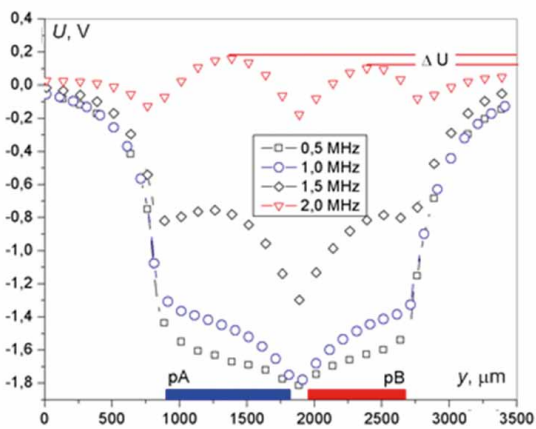
Key words: NDT SHM, railway transport, safety

toczne), wykorzystując przy tym mikroskop BEMI w Saarbrücken. Zgład oraz strukturę wycinka powierzchni tocznej obręczy pokazano na rys. 2. Wyniki pomiarów przedstawia rys. 3.

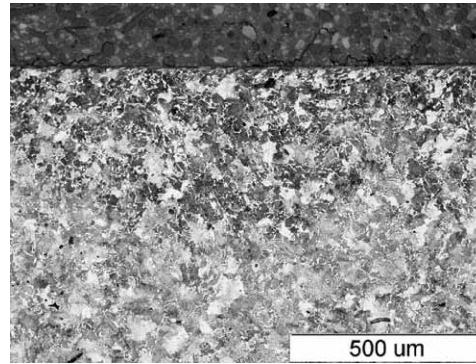
Zgodnie z teorią F. Förstera, badania właściwości elektromagnetycznych materiałów przewodzących, na podstawie



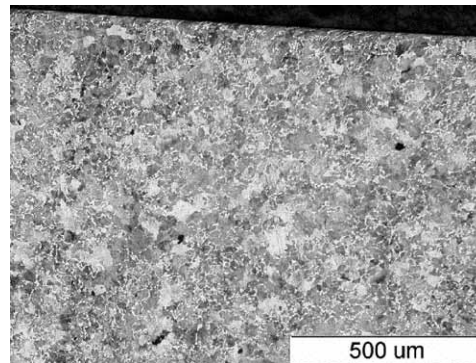
Rys. 2. Zgląd próbek i struktura materiału [10]



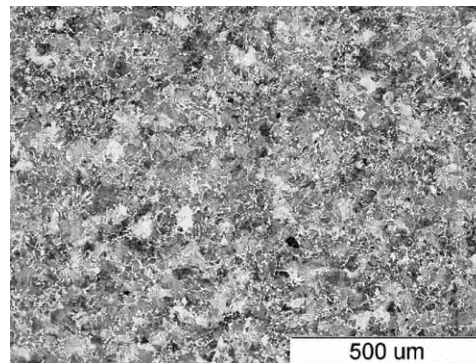
Rys. 3. Wartości napięć zarejestrowane przez sondę pomiarową dla struktury z rysunku 2 [10]



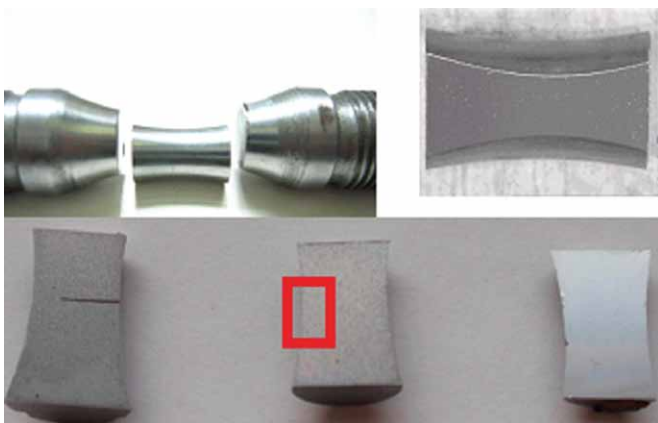
Próbka wzorcowa zmeżczeniowo 78% (120/150 tys. cykli)



Próbka wzorcowa zmeżczeniowo 52% (80/150 tys. cykli)



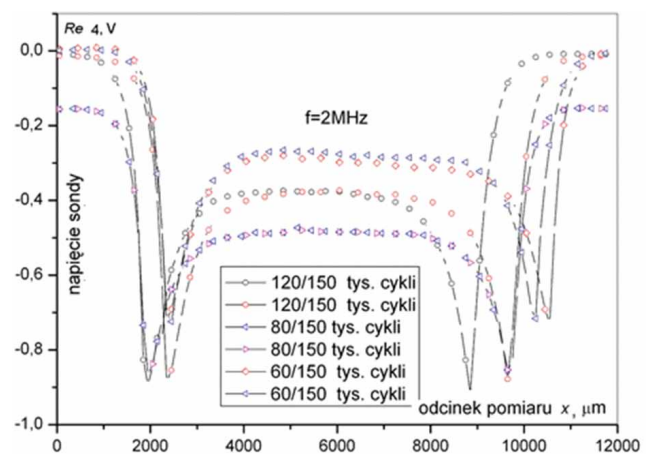
Próbka wzorcowa zmeżczeniowo 39% (60/150 tys. cykli)



Rys. 4. Proces przygotowania próbek do badań za pomocą mikroskopu BEMI [10]; obramowaniem czerwonym kolorem zaznaczono skanowany obszar

szczególnej interpretacji przebiegu składowych ich impedancji w funkcji pulsacji pola magnetycznego w unormowanym układzie współrzędnych kartezjańskich można określać stan materiału. Unormowania tego można dokonać, korzystając z układu równań Förstera:

Rys. 5. Wzorce stanu degradacji [10]



Rys. 6. Wgląd na skuteczność rozróżniania degradacji materiału w zakresie częstotliwości testowania powyżej 2 MHz [10]

$$\frac{\operatorname{Re} \underline{\varepsilon}}{\varepsilon_0} = \frac{R}{\omega L_0} = -\operatorname{Im} \underline{\mu}_{sk} \quad (1)$$

$$\frac{\operatorname{Im} \underline{\varepsilon}}{\varepsilon_0} = \frac{\omega L}{\omega L_0} = \operatorname{Re} \underline{\mu}_{sk} \quad (2)$$

$$\eta = \left(\frac{D_p}{D_s} \right)^2 \quad (3)$$

$$f_g = \frac{2}{\pi D_p^2 \gamma \mu_r \mu_0} \quad (4)$$

Równanie (4) koreluje zależność przenikalności skutecznej jedynie od stosunku f/f_g . Wynika z tego, że w próbkach cylindrycznych rozkład natężenia pola i prądów wirowych oraz przenikalność skuteczna dla jednakowych wartości stosunku f/f_g są identyczne. Jest to tzw. prawo podobieństwa, sformułowane przez F. Förstera i jego współpracowników.

Przemieszczenie punktu dla zadanej częstotliwości f lub stosunku f/f_g na wykresie unormowanych składowych impedancji precyzuje aktualny stan mechaniczny materiału i przynależnych parametrów fizycznych (elektrycznych i magnetycznych). Przedstawia to rysunek 7.

Badania metalograficzne przeprowadzono na wydziale IMM Politechniki Śląskiej [2, 3] przy użyciu mikroskopu świetlnego Olympus GX71 w polu jasnym przy powiększeniach do 1000 razy oraz mikroskopu skaningowego Hitachi S-4200 sprzężonego z systemem EDS do mikroanalizy rentgenowskiej. Obserwacje wizualne każdej z próbek prowadzono na całej powierzchni zglądu. Charakterystyczne elementy struktury wykryte na każdej z próbek rejestrowano w formie obrazów cyfrowych. Dodatkowo dokonano analizy składu chemicznego ujawnionych wtrąceń przy użyciu mikroanalizy rentgenowskiej [2, 3].

2. Stan wyjściowy

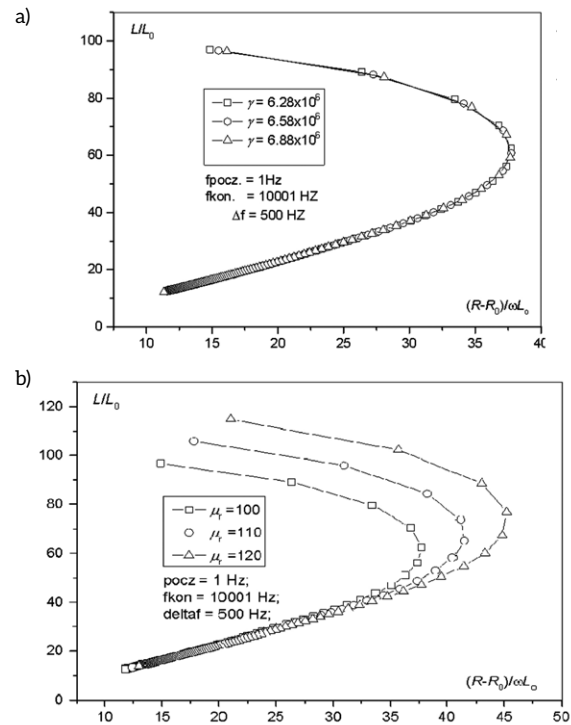
Próbki stali P54T w stanie wyjściowym, tj. niepoddawane obciążeniom zmęczeniowym, wykazują strukturę ferrytyczno-perlityczną [2, 3]. Ferryt występuje na granicach pierwotnych ziaren austenitu (rys. 8). Ponadto w badanej strukturze ujawniono wtrącenia niemetaliczne, głównie tlenki aluminium Al_2O_3 i siarczki manganu MnS. Analizę składu chemicznego ujawnionych wtrąceń przeprowadzono przy użyciu mikroanalizy rentgenowskiej i jej wyniki przedstawiono na rysunkach 8 i 9. Na rysunku 10 pokazano przykład wtrąceń niemetalicznych w badanej strukturze.

Pęknięcia ujawniono już na poziomie gniazda ziarna (rys. 10), co miało zasadnicze znaczenie w opisie rozwoju defektu. Przypadek ujawniony w pracy [2] był przytaczany przez wiele lat i przez wielu autorów, jednak bez cytowania źródłowego [2].

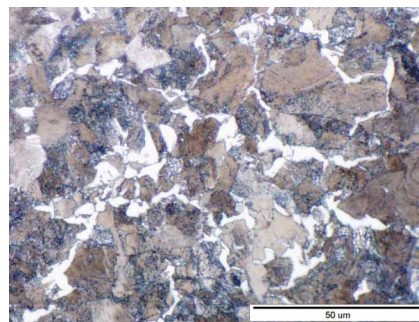
2.1. Struktura poddana obciążeniu

W odniesieniu do stanu wyjściowego struktura obciążana mechanicznie w sposób cykliczny charakteryzuje się:

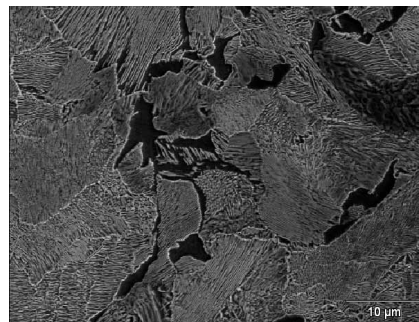
- większym rozdrobnieniem perlitu;
- utratą ciągłości materiału (rys. 12, 13) na niektórych wtrąceniach niemetalicznych (rys. 14, 15) i dość silnym zdefektowaniem w warstwie przypowierzchniowej (rys. 16).



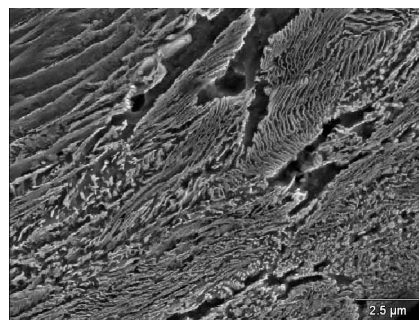
Rys. 7. Teoretyczne przebiegi składowych impedancji w zależności od przewodności elektrycznej właściwej (a) i zmian przenikalności (b)



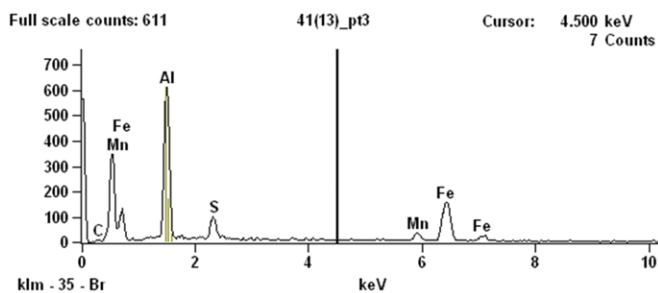
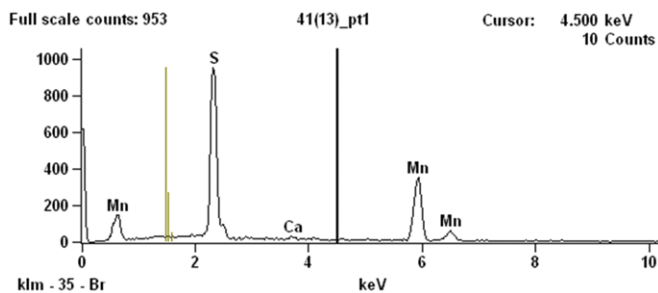
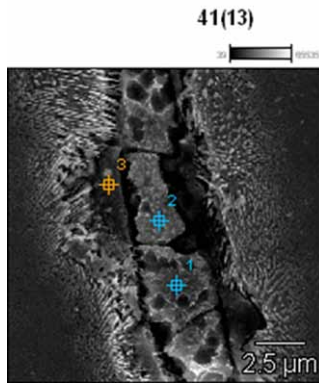
Rys. 8. Stan wyjściowy, środek próbki klepsydrycznej, mikroskop świetlny, pow. 1000x



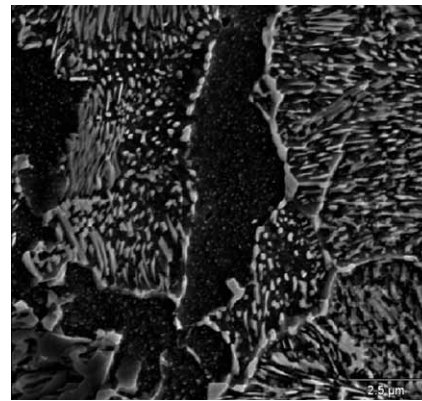
Rys. 9. Płytkowa budowa perlitu, stan wyjściowy, środek próbki klepsydrycznej, mikroskop skaningowy, pow. 6000x



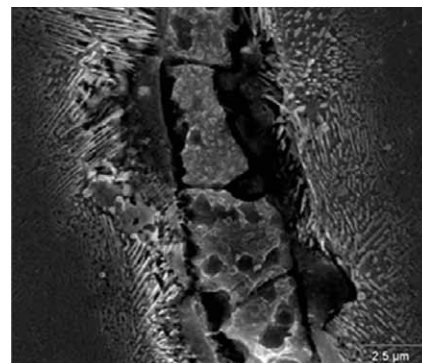
Rys. 10. Płytkowa budowa perlitu, stan wyjściowy, 3 mm od środka próbki klepsydrycznej, mikroskop skaningowy, pow. 3000x



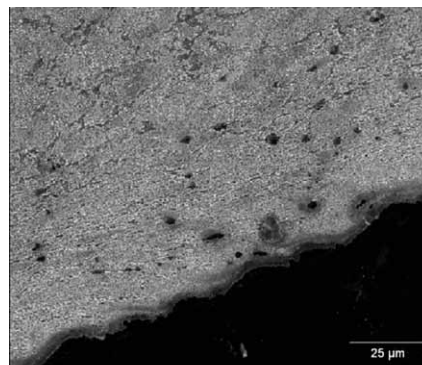
Rys. 11. Przykładowe wyniki detekcji wtrąceń niemetalicznych; mikroanaliza rentgenowska wykazała głównie tlenki aluminium Al_2O_3 i siarczki manganu MnS



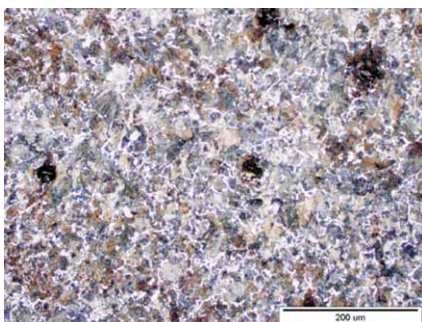
Rys. 14. Środek próbki klepsydrycznej, mikroskop skaningowy, pow. 2000x



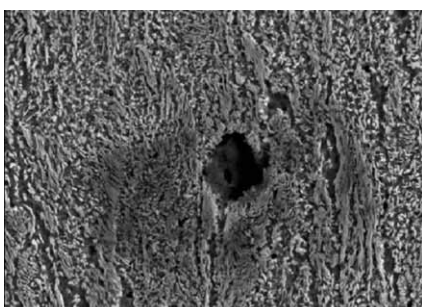
Rys. 15. Stan 4, środek próbki klepsydrycznej, mikroskop skaningowy, pow. 2000x



Rys. 16. Stan 4, 3 mm od środka próbki klepsydrycznej, mikroskop skaningowy, pow. 5000x



Rys. 12. Stan 1, środek próbki klepsydrycznej, mikroskop świetlny, pow. 200x



Rys. 13. Stan 1, 3 mm od środka próbki klepsydrycznej, mikroskop skaningowy, pow. 2000x

Fotografie struktur [12–15], będące wynikiem współpracy kilku Wydziałów Uczelni dla Grantu [2, 3], nie zostały nigdy opisane źródłowo przez cytujących je autorów pomimo dostępności monografii autorskiej w Internecie.

2.2. Hartowanie i przemiany struktury

W wyniku hartowania otrzymano strukturę sorabistyczną. Obraz z mikroskopu skaningowego ujawnił występowanie nielicznych wysp martenzytu z charakterystycznym układem igieł martenzytu (rys. 17, 18). W niektórych miejscach na zglądzie pojawiły się charakterystyczne pęknięcia płytek cementytu (rys. 19).

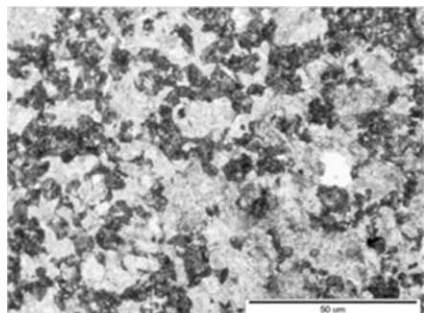
3. Test wykrywania braku jednorodności struktury

Stal martenzytyczna, którą zastosowano w testach (XCrMo-VNb9-1 DIN), jest szczególnie odporna na ciśnienie i temperaturę do około 650°C.

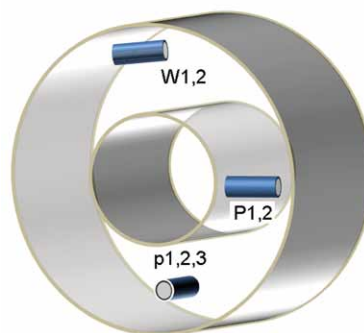
Stal P91 oraz jej poprzedniczka 20H12M1F należą do tej samej grupy stali.

Tabela 1. Skład chemiczny stali XCrMoVNb9-1

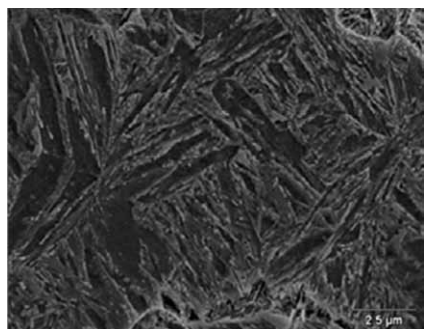
Gatunek stali	Standard	Skład chemiczny										
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb	inne
XCrMoVNb9-1	ASME	0,08	0,3	0,2	0,035	max	8,0	<0,40	0,085	0,18	0,06	0,03



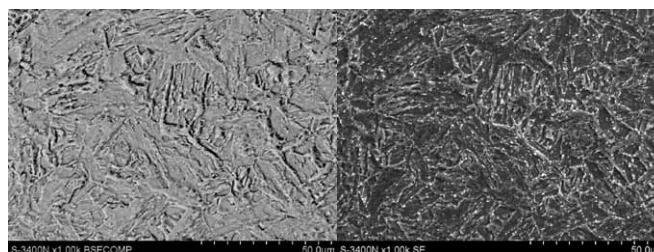
Rys. 17. Środek próbki – struktura sorabistyczna, mikroskop świetlny 1000x



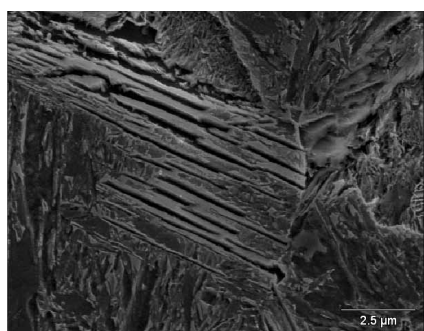
Rys. 20. Orientacja przestrzenna wycinanych z rury próbek



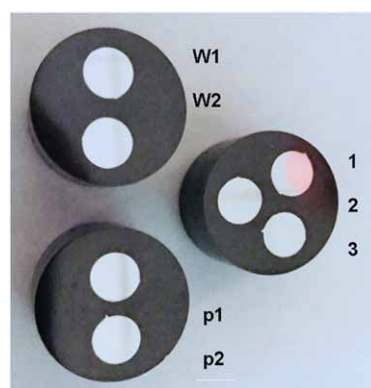
Rys. 18. Stan po hartowaniu, środek próbki klepsydrycznej, mikroskop świetlny, pow. 3500x



Rys. 21. Struktura stali z widocznymi ziarnami austenitu



Rys. 19. Stan po hartowaniu, środek próbki, mikroskop skaningowy, pow. 4000x

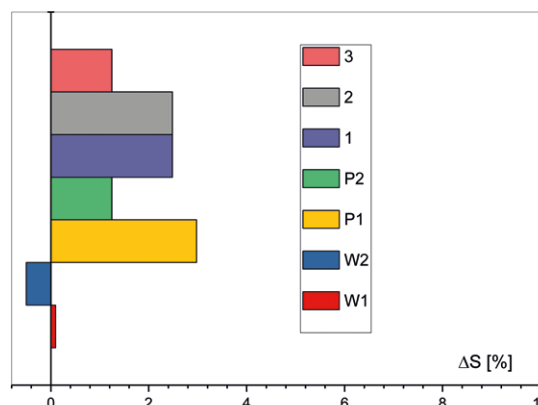


Rys. 22. Zglądy próbek z rysunku 20

3.1. Sposób przygotowania próbek

Badania przeprowadzono dla 7 próbek walcowych o nominalnej średnicy $\varnothing = 8$ mm, długości $l = 80$ mm i przekroju poprzecznym $S_n = 50,264$ mm². Próbki zostały wycięte elektroiskrowo z wycinka rury. Orientację przestrzenną (lokalizację w odniesieniu do próbki materiału) wycinanych próbek przedstawia rys. 19. Próbki p – 1, 2, 3 wycinano elektroiskrowo równoległe do osi wycinka rury, próbki P – 1, 2 wycinano promieniowo, a próbki W – 1, 2 wycinano obwodowo [16].

Analizowano błąd przekroju poprzecznego wykonanych próbek. Błąd ten dla kolejnych próbek przedstawia wykres zmian ΔS [%] w stosunku do przekroju nominalnego S_n (rys. 23).



Rys. 23. Błędy wykonania (błąd przekroju poprzecznego) dla testowanych próbek

Zmiana przekroju ma istotny wpływ na wartość indukcji szeregowej L_s i pośrednio rezystancji szeregowej R_s cewki pomiarowej. Skrajne wartości błędu wykonania zaobserwowano w próbkach P1 i W1.

4. Obwód pomiarowy i urządzenia pomiarowe

W badaniach stosowano dwa typy urządzeń [9] (rys. 24) i jedną wspólną cewkę pomiarową z otwartym obwodem magnetycznym. Zastosowano urządzenia pomiarowe znacznie różniące się klasą dokładności pomiarów. Pierwsze to Agilent 4294 (a), precyzyjny mostek pomiarowy RLC o błędzie pomiaru nieprzekraczającym 0,1%. Drugi to zwyczajny mostek RLC UNIT. Częstotliwość detekcji zmian parametrów magnetycznych i elektrycznych materiału została określona zakresem pomiarowym urządzeń. Dla mostka RLC UT603 przyjęto konstrukcyjne przedziały częstotliwości 100 Hz, 120 Hz, 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz. Dla precyzyjnego mostka AGILENT 4294 przyjęto zakres częstotliwości od 40 Hz do 2 MHz. Tak duży zakres przedziału częstotliwości podyktowany jest koniecznością oceny zarówno powierzchni próbek, jak i struktur podpowierzchniowych w zakresie penetracji prądów wirowych.

5. Zastosowana metodyka pomiaru

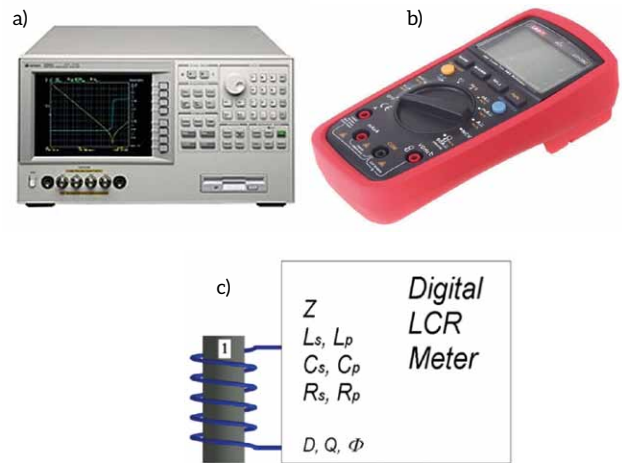
Pomiary wykonano w obwodzie otwartym cewki o długości 50 mm i średnicy otworu 10 mm. Udział powietrza pomiędzy wewnętrzną powierzchnią uzwojenia próbki a powierzchnią próbki wyznaczano kolejno z zależności określającej wypełnienie przekroju poprzecznego η próbki.

Współczynnik η służy do korekcji pomierzonych wartości indukcyjności L_{s0} oraz rezystancji R_{s0} . Przy pomocy przyrządu AGILENT 4294A pomierzono składowe impedancje w zakresie do 2 MHz, natomiast przyrządem UNIT w zakresie dostępnych częstotliwości. Na podstawie wyników wyznaczono unormowane składowe impedancje (Förster Plot) stosowane powszechnie w teorii urządzeń wiroprądowych dla NDT (*Non Destructive Test*) [5, 10]. Tę samą procedurę zastosowano do ograniczonego zakresu częstotliwości, dostępnego w mierniku UT603. Napięcie na uzwojeniu cewki, przed włożeniem próbki, wynosi ϵ_0 , a po włożeniu próbki ϵ i zmienia się proporcjonalnie do zmian impedancji łącznej cewki i materiału, a tym samym proporcjonalnie do zmian parametrów materiału, takich jak przenikalność magnetyczna i przewodność elektryczna. Unormowane składowe impedancje są opisane wzorami Förstera, przytoczonymi w pracy [10].

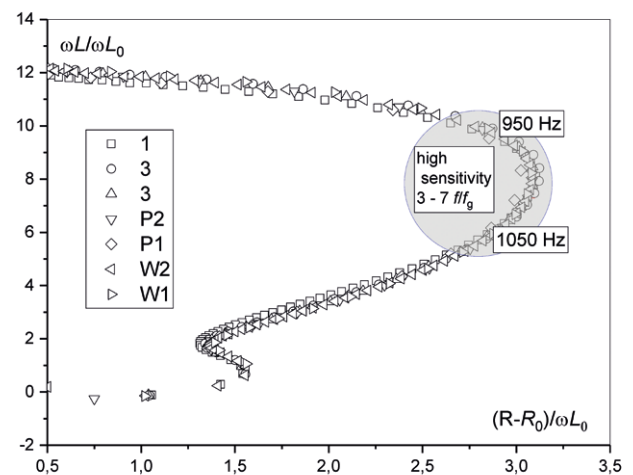
5.1. Obrazowanie pomiaru - Förster plot

Optymalną częstotliwość pomiarową dla wykresu Förster Plot uzyskuje się dla częstotliwości pomiarowej będącej wielokrotnością częstotliwości granicznej f_g . Częstotliwość graniczna jest definiowana podobnie jak częstotliwość wnikania dla prądów wirowych.

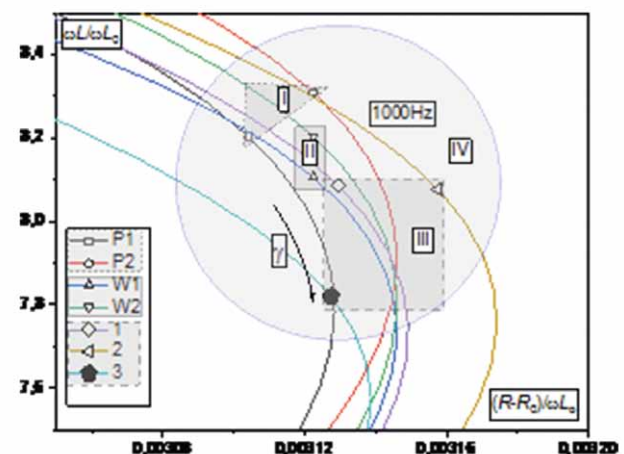
W zakresie częstotliwości diagnostycznej, pomimo znacznej różnicy w klasach dokładności pomiędzy zastosowanymi przyrządami (rys. 25), ujawniają się statystyczne zmiany w próbce 3. Aby doprecyzować poczynione obserwacje w ramach prowadzonych badań, przeprowadzono analizy materiału w zakresie ilości i składu wtrąceń niemetalicznych.



Rys. 24. Urządzenia pomiarowe a) i b), schemat podłączenia cewki pomiarowej c)



Rys. 25. Przebieg zmian unormowanych składowych impedancji [9]



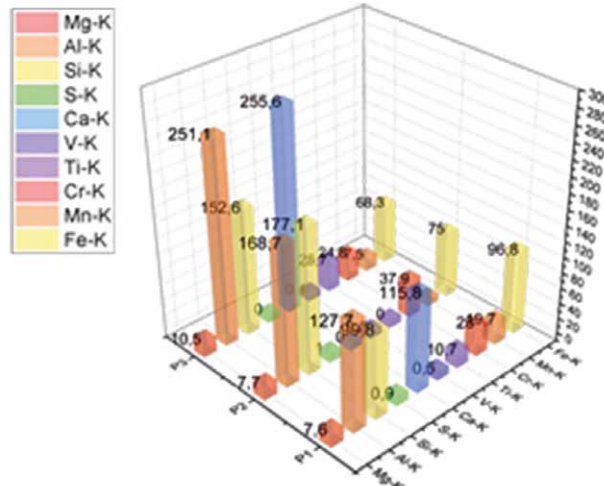
Rys. 26. Zakres częstotliwości diagnostycznych UNIT

Badaniami objęto również próbkę 1.

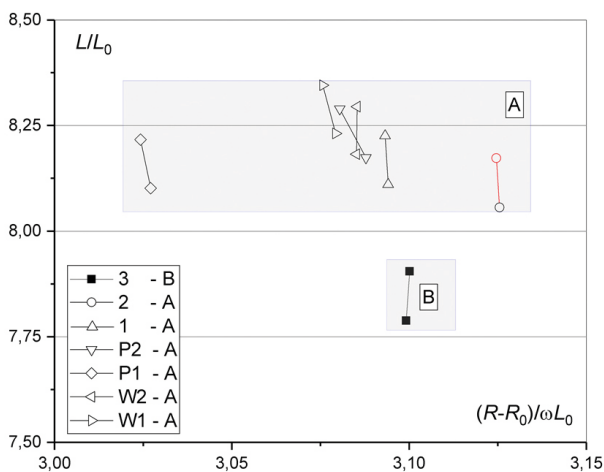
Stwierdzono w składzie wtrącenia niemetaliczne (rys. 30). Prowadzone są dalsze badania mające na celu naukowe wyjaśnienie różnic w materiale próbek uzyskanych z obszarów znajdujących się w bliskiej odległości od siebie.

Podsumowanie

Obrany kierunek badań metodami magnetycznymi konstrukcji eksploatowanych w zagadnieniach transportowych [15, 16] jest kierunkiem przyszłościowym. Należy podkreślić, że główna zaleta stosowania w badaniach metod magnetycznych i elektrycznych nie tkwi wyłącznie w relatywnie ich niewielkich



Rys. 30. Zestawienie podstawowych różnic w składzie zanieczyszczeń stali

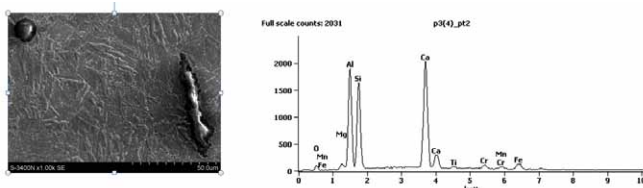


Rys. 27. Zakres częstotliwości diagnostycznych Agilent

kosztach, ale przede wszystkim w ich możliwości prostego aplikowania w badaniach przemysłowych i powszechnego stosowania w początkowej fazie diagnostyki typu NDT.

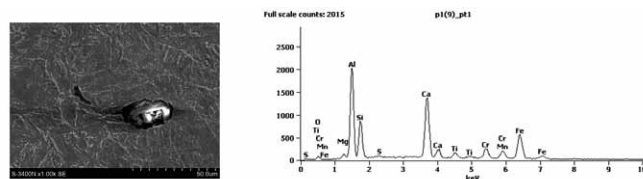
Literatura

- [1] ŻUREK Z.H.: Grant własny NN510 2383 38 „Metoda diagnostyki stanu stalowych (paramagnetycznych i ferromagnetycznych) elementów maszyn elektrycznych na przykładzie bandaży i kołpaków wirników generatorów”. Dyscyplina naukowa, N510 – Elektrotechnika (kierownik, grant własny zakończony i przyjęty).
- [2] ŻUREK Z.H.: Grant własny NN507 0807 33 „Opracowanie metody magnetycznej do wczesnej detekcji procesów zmęczeniowych w stalach niskostopowych niskowęglowych”. Dyscyplina naukowa, N507 – Nauka o Materiałach i Inżynieria Materiałowa (kierownik, grant własny zakończony i przyjęty).
- [3] ROSKOSZ S. – wykonawca: Grant własny NN507 0807 33 „Opracowanie metody magnetycznej do wczesnej detekcji procesów zmęczeniowych w stalach niskostopowych niskowęglowych”. Dyscyplina naukowa, N507 – Nauka o Materiałach i Inżynieria Materiałowa (kierownik, grant własny zakończony i przyjęty).
- [4] ŻUREK Z.H. – wykonawca: NN 502 3453 36, pt. „Zidentyfikowane parametry fizyczne materiału tarczy koła napędowego kolejowego zestawu kołowego jako podstawa projektowania i diagnostyki”.
- [5] ŻUREK Z.H., ŁAZARZ B., WITOS, M., ROCKSTROH B.: *Hochpräzise induktive digital Wandler LDC 1000 zur Erfassung von Ermüdung des Radsatz-Stahles*, Dresden RAD Schiene 2015, 14. Internationale Schienenfahrzeugtagung 23–25 September 2015 mit begleitender Fachausstellung Tagungsband. Strony: 191–194, DOI: 10.13140/RG.2.1.3924.5284.
- [6] SZUDYGA M.: *Diagnozowanie metodą magnetyczną procesów zmęczeniowych stali stosowanej do kół i obręczy kolejowych zestawów kołowych*. Praca doktorska, 22/09/2011, Politechnika Śląska; Wydział Transportu. Uzyskany stopień: doktor nauk technicznych w zakresie budowy i eksploatacji maszyn, promotor Żurek Z.H.



	Mg-K	Al-K	Si-K	Ca-K	Ti-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K
p3(4)_pt1		28.9	13.0	54.2	0.8			3.0
p3(4)_pt2	1.5	24.4	27.6	37.5	1.0	2.1	1.0	4.9
p3(4)_pt3	1.6	37.7	8.7	16.4	12.8	5.4	1.7	15.6
p3(4)_pt4	0.6	21.3	19.2	34.9	4.0	2.6	0.7	16.5

Rys. 28. Wyniki analizy dla próbki 3



	Mg-K	Al-K	Si-K	S-K	Ca-K	Ti-K	Cr-K	Mn-K	Fe-K
p1(9)_pt1	1.6	28.9	14.9	0.3	22.0	2.8	5.7	5.4	18.4
p1(9)_pt2	4.0	37.7	19.5		24.8	3.1	3.7	2.8	4.4

Rys. 29. Wyniki analizy dla próbki 1

- [7] JANECZEK T.R.: *Diagnostyka eksploatacyjna kolejowych zestawów kołowych metodą magnetyczną*. Praca doktorska, 29/05/2009, Politechnika Śląska; Wydział Transportu. Uzyskany stopień: doktor nauk technicznych w zakresie budowy i eksploatacji maszyn, promotor Żurek Z.H.
- [8] ŻUREK Z.H., DOBMANN G., IDZIAK P., KOWALSKI K.: *SHM structural health monitoring and ndt for thin steel sheets under LDC testing with PCB flat asymmetric sonde*, SHM NDT 2018, Saarbrücken.
- [9] ŻUREK Z.H., SOLECKA B., STOKŁOSA Z., WOLNIK P., CHMIELA B.: *Selekcjonowanie mocy strat blach transformatorowych w obwodach magnetycznych zamkniętych i otwartych*. „Napędy i Sterowanie” 5(229)/2018.
- [10] ŻUREK Z.H.: *Wprowadzenie do elektromagnetycznej diagnostyki degradacji stali*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
- [11] ŻUREK Z.H., DUKA P.: *Obwody RLC w diagnostyce i eksploatacji maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014.
- [12] ŻUREK Z.H., DUKA P.: *RLC Circuits For Material Testing And NDT, Monografia*. Institute of Electrical Drivers & Machines KOMEL, 01/2015. Księgozbiór PAN i Biblioteki Uniwersyteckiej w Getyndze: Sygnatura 2015 A 26910, https://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/SET=1/TTL=3/CMD?ACT=SRCHA&IKT=1016&SR-T=LST_aty&TRM=%C5%BBurek%2C+Zbigniew+Hilary&MATCFILTER=N&MATCSET=N&NOSCAN=N&ADI_BIB
- [13] ŻUREK Z.H., JANECZEK T.: *Untersuchung des Ermüdungsprozesses in dem band der Bahn-radsätze*. 9 Internationale Schienenfahrzeugtagung, 27–29 Februar 2008, Dresden Rad Schiene 2008, <http://www.rad-schiene.de/historie/2003/2008-ts1.php>.
- [14] ŻUREK Z.H., BIZOŃ K., WITASZEK K., ROCKSTROCH 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.
- [15] ŻUREK Z.H.: *Magnetic monitoring of fatigue process of the rim material of railway wheel sets*. „NDT&E international” 39/2006.
- [16] ŻUREK Z.H.: *Magnetic Contactless Detection of Stress Distribution and Assembly Defects in Constructional Steel Element*. „NDT&E International” 38/2005.
- [17] KUKLA D. – wykonawca: IPPT PAN, PW, Grant własny (Z.H. Żurek) NN507 0807 33 „Opracowanie metody magnetycznej do wczesnej detekcji procesów zmęczeniowych w stalach niskostopowych niskowęglowych”. Dyscyplina naukowa, N507 – Nauka o Materiałach i Inżynieria Materiałowa (kierownik, grant własny zakończony i przyjęty)

 Zbigniew Hilary Żurek – Politechnika Śląska WT,
e-mail: zbigniew.zurek@polsl.pl;
Zbigniew Stokłosa – Uniwersytet Śląski,
e-mail: zbigniew.stoklosa@us.edu.pl;
Bartosz Chmiela – Politechnika Śląska IMM,
e-mail: bartosz.chmiela@polsl.pl;
Paweł Idziak – Politechnika Poznańska WE,
e-mail: pawel.idziak@put.poznan.pl;
Krzysztof Kowalski – Politechnika Poznańska WE,
e-mail: krzysztof.kowalski@put.poznan.pl

reklama