

Porównanie szumu Barkhausena i własnego magnetycznego pola rozproszenia w odkształconych plastycznie próbkach ze stali S235 i P265GH

A comparison of Barkhausen noise and the residual magnetic field in plastically deformed samples made of S235 and P265GH steel

Streszczenie

Zmiany stanu wyężenia, struktury i temperatury tworzywa ferromagnetycznego wpływają na zmiany stanu równowagi energetycznej na poziomie atomowym, skutkując zmianami makroskopowych właściwości magnetycznych i elektrycznych. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów szumu Barkhausena i własnego magnetycznego pola rozproszenia WMPR w próbkach odkształconych plastycznie. Porównano rozkłady wielkości ilościowo opisujących szum Barkhausena i WMPR. Stwierdzono, że zróżnicowanie stopnia deformacji plastycznej dobrze oddają energia szumu Barkhausena EBN, liczba zliczeń NBN oraz gradienty składowych WMPR. Czulość tych sygnałów diagnostycznych jest zbliżona. Możliwe jest opracowanie ilościowych relacji diagnostycznych służących do oceny stopnia deformacji na podstawie ww. wielkości. Opracowanie rzetelnych relacji diagnostycznych wymaga rozwiązania szeregu problemów metrologicznych. Są one związane z wpływem kształtu i wielkości elementu, stanem warstwy wierzchniej, struktury oraz ogólnego stanu namagnesowania.

Abstract

Changes in the stress state, structure and temperature of a ferromagnetic material result in changes in the balance of energy at the atomic level, causing variations in macroscopic magnetic and electrical properties. The paper presents the results of measurements of Barkhausen noise and of the residual magnetic field (RMF) in plastically deformed samples. A comparison is made of the distributions of values which describe Barkhausen noise and the RMF quantitatively. It is found that the differences in the degree of plastic deformation are well reflected by the energy of Barkhausen noise EBN, the number of counts NBN and the gradients of the RMF components. The sensitivity of these diagnostic signals is similar. It is possible to develop quantitative diagnostic relations that could be used to assess the degree of plastic deformation based on the values mentioned above. The development of reliable diagnostic relationships requires a solution to a series of metrological problems which are related to the impact of the shape and size of the component, to the state of the surface layer, the structure and to the overall state of magnetisation.

Wprowadzenie i cel badań

Zmiany stanu wyężenia, struktury i temperatury tworzywa ferromagnetycznego wpływają na zmiany stanu równowagi energetycznej na poziomie atomowym,

Dr inż. Maciej Roskosz, inż. Krzysztof Fryczowski
– Politechnika Śląska, Gliwice.

powoduje zmiany makroskopowe właściwości magnetycznych i elektrycznych [1÷5]. Wykorzystanie efektu Barkhausena oraz własnego magnetycznego pola rozproszenia WMPR jako sygnałów diagnostycznych znajduje coraz szersze zastosowanie w szeroko pojętej ocenie stanu [6÷11]. Z powodu braku ogólnie przyjętych standardów (norm), nieuznawania metod wykorzystujących te sygnały przez jednostki notyfikowane, muszą być one traktowane jako dodatkowe (uzupełniające) metody badań.

Prowadzone w wielu ośrodkach badania mają na celu wykazanie możliwości i ograniczeń wykorzystania efektu Barkhausena i WMPR w diagnostyce [6÷11]. Celem prezentowanych badań było porównanie rozkładów wielkości ilościowo opisujących szum Barkhausena i WMPR w próbkach odkształconych plastycznie z zauważalnym lokalnym przewężeniem – szyjką. Przeanalizowano również możliwość identyfikacji obszarów odkształconych plastycznie oraz oceny stopnia trwałej deformacji.

Metodyka badań

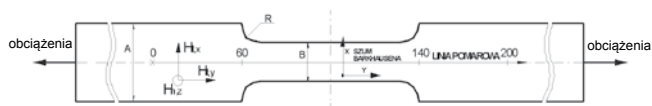
Badano próbki płytowe wykonane ze stali S235 i P265GH. Geometrię próbek nieodkształconych plastycznie pokazano schematycznie na rysunku 1. Początkowe struktury metalograficzne pokazano na rysunku 2 dla stali S235 oraz na rysunku 3 dla stali P265GH. W tabelicy I zestawiono składy chemiczne badanych stali. Próbki poddano procesowi rozciągania, który przerywano w momencie pojawienia się lokalnego przewężenia – szyjki. Do pomiarów WMPR wykorzystywano magnetometr TSC-1M-4 z głowicą pomiarową TSC-2M dostarczony przez Energodiagnostika Co. Ltd Moscow. Aparatura pomiarowa została wykalibrowana w polu magnetycznym Ziemi do założonej wartości 40 A/m. Pomiary natężenia pola magnetycznego wykonywano wzdłuż linii pomiarowej, której początkowa długość wynosiła 200 mm (rys. 1).

Mierzono trzy składowe WMPR na powierzchni próbki (rys. 1):

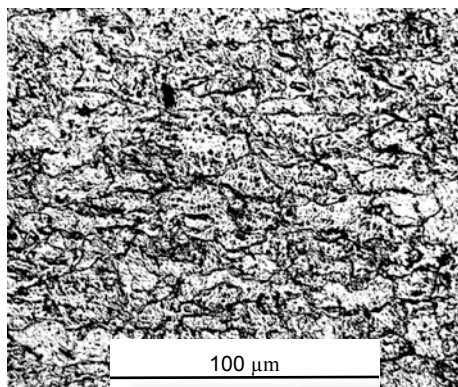
- $H_{T,X}$ – składowa styczna mierzona w kierunku prostopadłym do kierunku rozciągania,
- $H_{T,Y}$ – składowa styczna mierzona w kierunku równoległym do kierunku rozciągania,
- $H_{N,Z}$ – składowa normalna.

Pomiary szumu Barkhausena prowadzono za pomocą urządzenia MEB4-C dostarczonego przez firmę Mag-Lab z Gdańska z wykorzystaniem sondy stykowej (cewka magnesująca i pomiarowa w jednej obudowie). Pomiary szumu Barkhausena prowadzono w wybranych punktach leżących na linii pomiarowej. W każdym punkcie dokonywano dwóch pomiarów, dla dwóch kierunków magnesowania:

- kierunku X – prostopadłego do osi obciążenia,
- kierunku Y – współosiowego z obciążeniem.

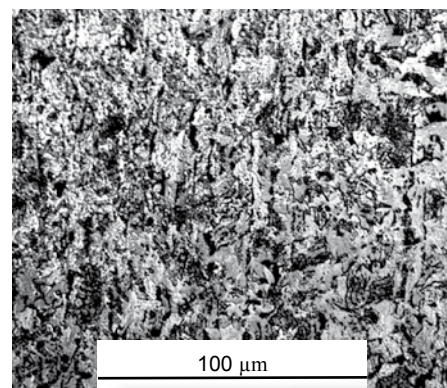


Rys. 1. Próbka do badań
Fig. 1. Sample for tests



Rys. 2. Stal S235 – struktura ferrytu z niewielkimi obszarami drobnego poślizgu i drobnymi skoagulowanymi węglnikami wewnątrz ziaren ferrytu. Ziarna wydłużone w kierunku walcowania. Zgląd metalograficzny trawiony nital. Pow. 1000x

Fig. 2. S235 steel - ferritic structure with small areas of small slip and fine carbides within the grains of ferrite. Grains elongated in the rolling direction, Metallographic cross-section etched by Nital. Magn. 1000x



Rys. 3. Stal P265GH – struktura ferrytu z obszarami perlitu drobno-płytkowego, widoczne nieregularne obszary ferrytu oraz perlitu, lokalnie również obszary ferrytu ze sferycznymi drobnymi węglnikami. Zgląd metalograficzny trawiony nital. Pow. 1000x

Fig. 3. P265GH steel - ferritic structure of fine pearlite areas, visible irregular ferrite and pearlite areas, locally also areas with spherical ferrite fine carbides. Metallographic cross-section etched by Nital. Magn. 1000x

Tablica I. Skład chemiczny badanych stali (w %)

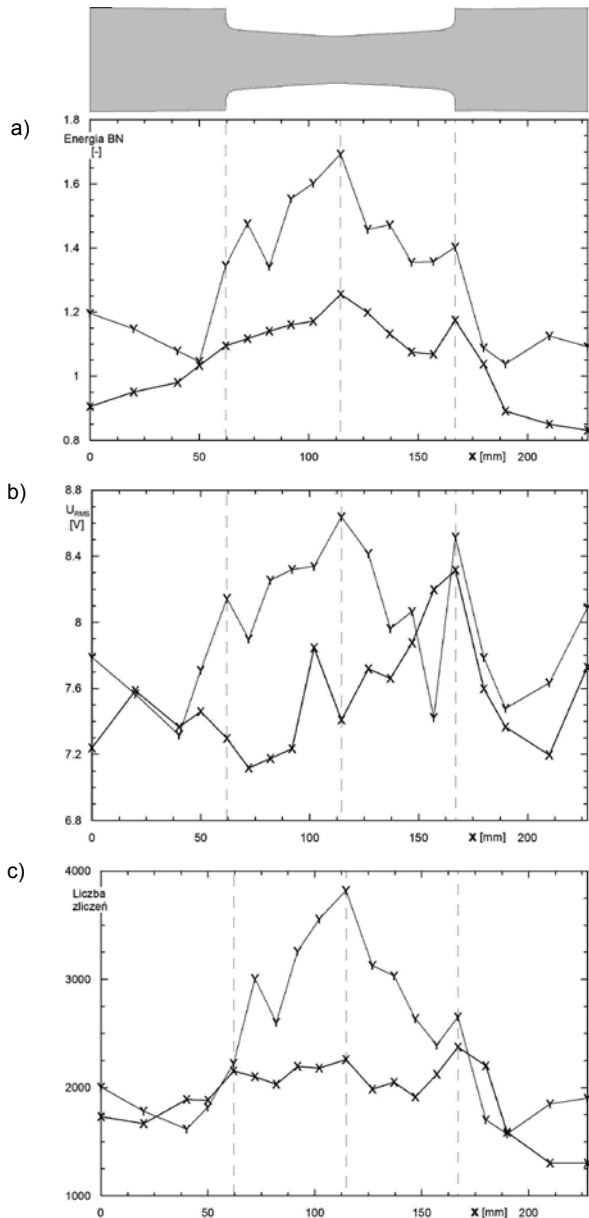
Table I. Chemical composition of tested steels (in %)

Stal	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Ti	V	Nb	N	Ni	Cu
P265GH	≤ 0,20	≤ 0,40	0,80 do 1,40	max 0,025	max 0,015	≤ 0,30	≤ 0,08	max 0,020	max. 0,03	≤ 0,2	≤ 0,020	≤ 0,012	≤ 0,30	≤ 0,30
S235	max 0,17	-	max 1,40	max 0,045	max 0,045	-	-	-	-	-	-	max 0,009	-	-

Wyniki badań i ich analiza

Analizowano podstawowe wielkości opisujące ilościowo szum Barkhausena, takie jak wartość skuteczna napięcia $U_{RMS,BN}$, energia E_{BN} oraz liczba zliczeń N_{BN} .

Skokowe zmiany struktury domenowej przy przemagnesowywaniu powodują lokalne zaburzenia indukcji magnetycznej. Zaburzenia te są rejestrowane w cewce pomiarowej jako napięciowy szum Barkhausena. Liczba zliczeń N_{BN} jest sumą wszystkich impulsowych zmian indukcji magnetycznej, zarejestrowanych w cewce pomiarowej jako impulsy o określonym poziomie napięcia.



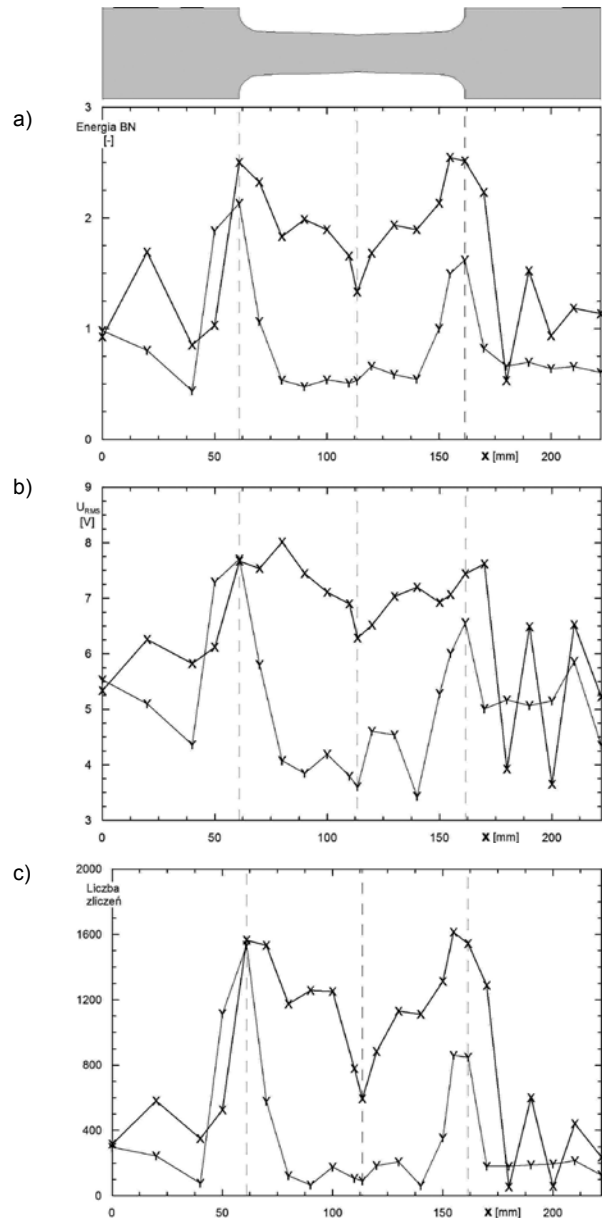
Rys. 4. Wyniki pomiarów szumu Barkhausena dla stali S235: a) rozkłady energii szumu Barkhausena E_{BN} , b) rozkłady maksymalnego napięcia skutecznego szumu Barkhausena $U_{RMS,BN}$, c) rozkłady liczby zliczeń impulsów szumu Barkhausena N_{BN}

Fig. 4. Barkhausen noise measurement results for the S235 a) Barkhausen noise energy distributions E_{BN} b) the distribution of the maximum of Barkhausen noise $U_{RMS,BN}$ c) distributions of pulse counts of Barkhausen noise N_{BN}

Energia szumu Barkhausena E_{BN} zwana również jego intensywnością, jest zdefiniowana jako całka po czasie kwadratu napięcia impulsów U_i . Jest parametrem opisującym jedną wartością rozkład i napięcie impulsów w czasie trwania jednego cyklu przemagnesowywania T [12].

$$E_{BN} = \int_T U_i^2 dt \quad (1)$$

Rozkłady energii E_{BN} , maksymalnych wartości skutecznych napięcia $U_{RMS,BN}$ oraz liczby zliczeń N_{BN} przedstawiono dla stali S235 na rysunkach 4a÷4c, a dla stali P265GH na rysunkach 5a÷5c.



Rys. 5. Wyniki pomiarów szumu Barkhausena dla stali P265GH, a) rozkłady energii szumu Barkhausena E_{BN} , b) rozkłady maksymalnego napięcia skutecznego szumu Barkhausena $U_{RMS,BN}$, c) rozkłady liczby zliczeń impulsów szumu Barkhausena N_{BN}

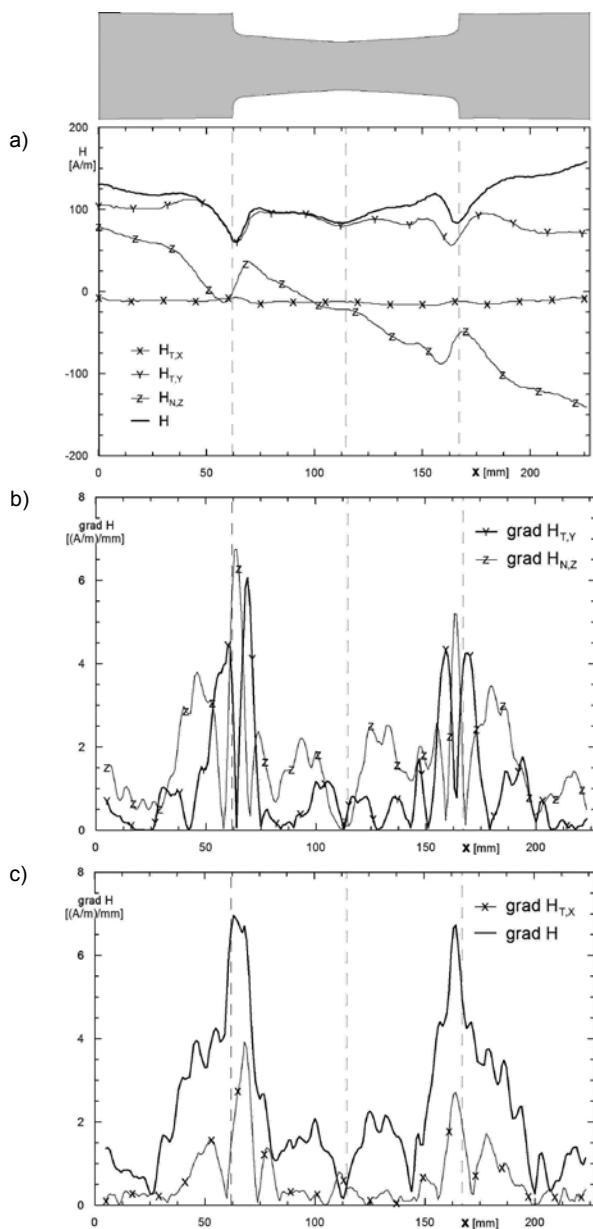
Fig. 5. Barkhausen noise measurement results for steel P265GH a) Barkhausen noise energy distributions E_{BN} b) the distribution of the maximum of Barkhausen noise $U_{RMS,BN}$ c) distributions of pulse counts Barkhausen noise N_{BN}

Analiza pomiarów WMPR obejmowała analizę rozkładów składowych WMPR oraz ich gradientów. Gradienty zmian składowych WMPR wyznaczono poprzez aproksymację odcinkową wyników pomiarów funkcjami sklejanymi 3-go stopnia. Wyniki dla stali S235 pokazano na rysunkach 6÷6c, dla stali P265GH na rysunkach 7a÷7c.

W tabelicy II zestawiono wyniki analizy podanych wyżej wielkości w charakterystycznych strefach próbek, takich jak okolice zmiany przekroju oraz strefa szyjki. Stwierdzono, że dla obydwu badanych stali w strefach zmiany przekroju występują maksima (globalne lub lokalne) większości (z wyłączeniem niektórych składowych WMPR) analizowanych wielkości. Szyjka, czyli

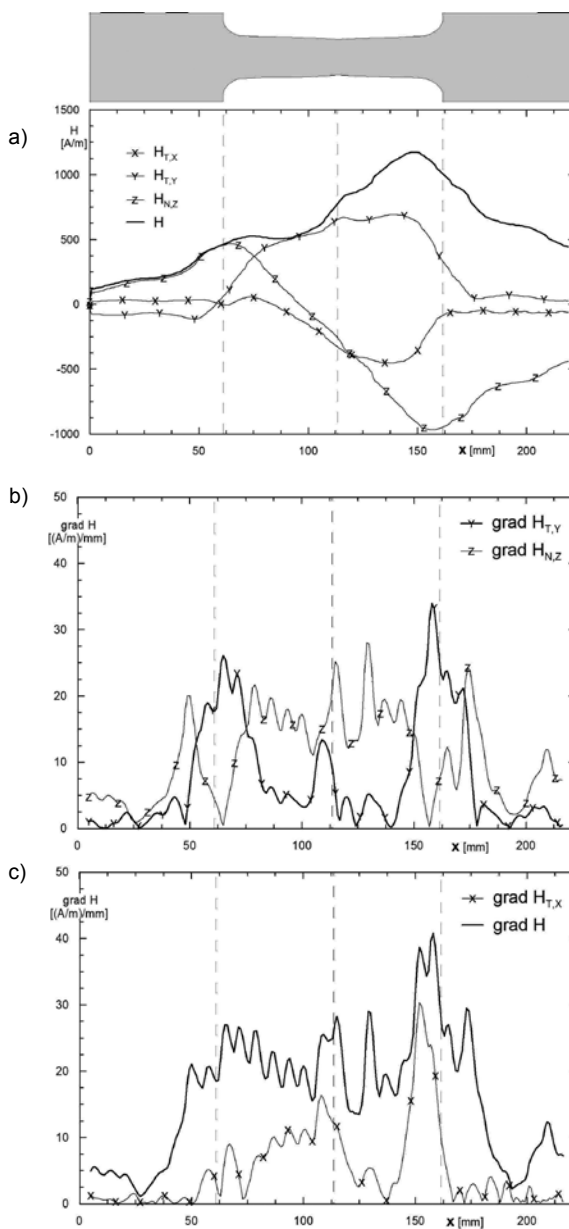
obszar lokalnego przewężenia, w którym nastąpiłoby zerwanie próbki, również wyróżnia się występowaniem globalnych lub lokalnych ekstremów rozkładów wielkości opisujących szum Barkhausena. Dla stali S235 są to maksima, natomiast dla stali P265GH minima wartości.

Na podstawie rysunków 4÷6 można wnioskować, że zróżnicowanie stopnia deformacji plastycznej najlepiej oddają energia szumu Barkhausena E_{BN} , liczba zliczeń N_{BN} oraz gradienty składowych WMPR. Czułość tych sygnałów diagnostycznych, zarówno wynikających z opisu ilościowego szumu Barkhausena, jak i opartych na pomiarach WMPR jest zbliżona. Wcześniejsze badania wykazały że naprężenia czynne



Rys. 6. Wyniki pomiarów WMPR dla próbki ze stali S235: a) rozkłady składowych WMPR, b) rozkłady gradientów $H_{T,Y}$ oraz $H_{N,Z}$, c) rozkłady gradientów $H_{T,X}$ oraz H

Fig. 6. The WMPR measurement results for samples of S235 steel: a) the WMPR component distributions b) the distribution of gradients $H_{T,Y}$ and $H_{N,Z}$, c) distribution of gradients $H_{T,X}$ and H



Rys. 7. Wyniki pomiarów WMPR dla próbki ze stali P265GH: a) rozkłady składowych WMPR, b) rozkłady gradientów $H_{T,Y}$ oraz $H_{N,Z}$, c) rozkłady gradientów $H_{T,X}$ oraz H

Fig. 7. The WMPR measurement results for the sample of P265GH steel: a) the WMPR component distributions b) the distribution of gradients $H_{T,Y}$ and $H_{N,Z}$, c) distribution of gradients $H_{T,X}$ and H

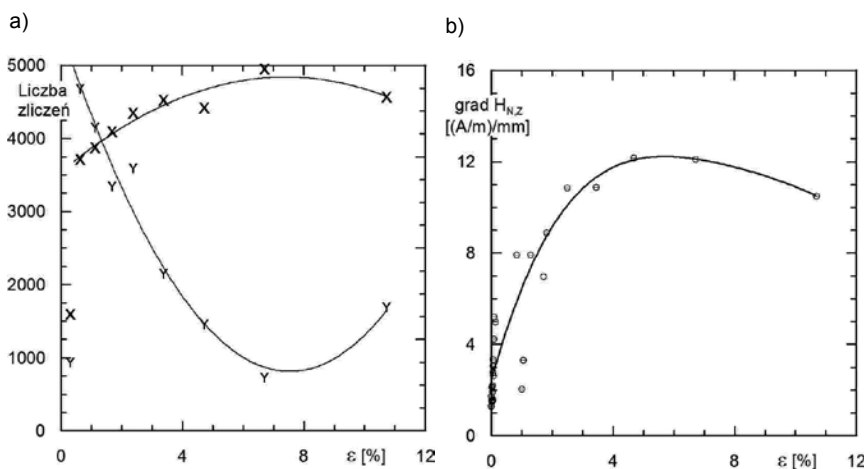
lepiej korelują z liczbą zliczeń dla wyższych wartości napięcia progowego [13]. Natomiast relacja pomiędzy stopniem trwałej deformacji a liczbą impulsów jest zdecydowanie lepsza i występuje dla większego zakresu odkształceń oraz dla niższych napięć progowych. Możliwe jest opracowanie relacji diagnostycznych służących do oceny stopnia deformacji na podstawie wielkości. Na rysunku 8 pokazano przykładowe, opracowane w ramach badań przedstawionych w [13], zależności dla stali P265GH pomiędzy odkształceniem

trwałym a liczbą zliczeń – rys. 8a oraz gradientem składowej normalnej – rys. 8b.

W szumie Barkhausena obszar deformacji plastycznej charakteryzuje się wyraźną anizotropią wszystkich analizowanych wielkości. Możliwa jest również identyfikacja obszaru odkształconego plastycznie na podstawie WMPR. Najlepszym parametrem jest w tym przypadku gradient składowej normalnej, który w obszarach odkształconych plastycznie przyjmuje wyraźnie wyższe wartości.

Tablica II. Analiza symptomów diagnostycznych w charakterystycznych miejscach próbek
Table II. Analysis of diagnostic symptoms in specific locations of samples

Sygnał	Miejsce występowania w stali			
	S235		P265GH	
	szyjka	zmiana przekroju	szyjka	zmiana przekroju
Energia BN	X – maksimum Y – maksimum	X – lokalne maksimum Y – lokalne maksimum	X – lokalne minimum Y – brak	X – maksimum Y – maksimum
$U_{RMS,BN}$	X – lokalne minimum Y – maksimum	X – lokalne maksimum Y – lokalne maksimum	X – lokalne minimum Y – lokalne minimum	X – maksimum Y – maksimum
Liczba zliczeń	X – lokalne maksimum (małe) Y – maksimum	X – maksimum Y – lokalne maksimum	X – lokalne minimum Y – lokalne minimum (niewielkie)	X – maksimum Y – maksimum
H	zauważalna zmiana trendu składowych $H_{T,Y}$ i $H_{N,Z}$	wyraźne lokalne zaburzenie – ekstrema wartości	zauważalna zmiana trendu składowych $H_{T,Y}$ i $H_{N,Z}$	wyraźne lokalne zaburzenie – ekstrema wartości
Grad H	grad $H_{T,X}$ – lokalne maksimum grad $H_{T,Y}$ oraz grad $H_{N,Z}$ – wartości zbliżone do zera	maksimum wszystkich gradientów	lokalne maksima wszystkich gradientów	grad $H_{T,X}$, grad $H_{N,Z}$ – lokalne maksimum grad $H_{T,Y}$ – maksimum



Rys. 8. Przykładowe zależności pomiędzy odkształceniem trwałym a parametrami magnetycznymi: a) zależność pomiędzy odkształceniem trwałym ϵ a liczbą zliczeń N_{BN} , b) zależność pomiędzy odkształceniem trwałym ϵ a gradientem składowej normalnej WMPR

Fig. 8. Example of the relationship between the permanent set and magnetic parameters: a) relationship between permanent strain ϵ and the number of counts N_{BN} , b) the relationship between permanent strain ϵ a normal component of the WMPR gradient

Podsumowanie

Przedstawiono wyniki pomiarów szumu Barkhausena i własnego magnetycznego pola rozproszenia WMPR w próbkach odkształconych plastycznie. Porównano rozkłady wielkości ilościowo opisujących szum Barkhausena i WMPR. Stwierdzono, że zróżnicowanie stopnia deformacji plastycznej dobrze oddają: energia szumu Barkhausena E_{BN} , liczba zliczeń N_{BN} oraz gradienty składowych WMPR. Czułość tych

sygnałów diagnostycznych jest zbliżona. Możliwe jest opracowanie ilościowych relacji diagnostycznych służących do oceny stopnia deformacji na podstawie ww. wielkości. Opracowanie rzetelnych relacji diagnostycznych wymaga rozwiązania wielu problemów metrologicznych. Są one związane z kształtem i wielkością elementu, stanem warstwy wierzchniej, strukturą oraz ogólnym stanem namagnesowania [13, 14].

Literatura

- [1] Jiles D.C.: Theory of the magnetomechanical effect, J. Phys. D: Appl. Phys., 28 (1995) s. 1537-1546.
- [2] Deputat J.: Podstawy metody magnetycznej pamięci metalu. Dozór Techniczny 5/2002 s. 97-105.
- [3] Dubow A.A.: Principal features of metal magnetic memory method and inspection tools as compared to known magnetic NDT methods. WCNDT 2004, Montreal Canada, <http://www.ndt.net/article/wcndt2004/papers/359.nfm>.
- [4] Roskosz M., Gawrilenko P.: Analysis of changes in residual magnetic field in loaded notched samples, NDT&E International 41 (2008) s. 570-576.
- [5] Roskosz M.: Wpływ naprężeń czynnych i resztkowych na własne pole magnetyczne ferromagnetyków, Przegląd Spawalnictwa 13/2011, s. 46-49.
- [6] Roskosz M., Bieniek M.: Evaluation of residual stress in ferromagnetic steels based on residual magnetic field measurements NDT&E International 45 (2012), s. 55-62.
- [7] Roskosz M.: Feasibility of Stress State Assessment on the Grounds of Measurements of the Residual Magnetic Field Strength of Ferromagnetics, Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIV). Chady T., Gratkowski S., Takagi T., Udpa S., (Eds Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics 35, IOS Press, 2011, s. 339-47.
- [8] Żurek Z.H.: Magnetic contactless detection of stress distribution and assembly defects in constructional steel element, NDT&E International 38 (2005) s. 589-595.
- [9] Mierczak L.L., Jiles D.C., Fantoni G.: A New Method for Evaluation of Mechanical Stress Using the Reciprocal Amplitude of Magnetic Barkhausen Noise IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 47, No. 2, 2011, s. 459-65.
- [10] Piotrowski L., Augustyniak B., Chmielewski M., Tomáš I.: The influence of plastic deformation on the magnetoelastic properties of the CSN12021 grade steel, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 321 (2009) 2331-2335
- [11] Stupakov O., Takagi T., Uchimoto T.: Alternative magnetic parameters for characterization of plastic tension, NDT&E International 43 (2010), s. 671-676.
- [12] White S., Krause T., Clapham L.: Quantitative analysis of surface Barkhausen noise measurements, Review of Quantitative Nondestructive Evaluation. Vol. 27, ed. by D.O. Thompson and D. E. Chiment, 2008 American Institute of Physics.
- [13] Roskosz M., Fryczowski K.: Możliwości wykorzystania zmian właściwości magnetycznych do oceny stanu wyężenia stali kotłowych na przykładzie stali P265GH, 4 Konferencja Naukowo-Techniczna "Diagnostyka Materiałów i Urządzeń Technicznych", Gdańsk 2012.
- [14] Roskosz M., Bieniek M.: Opracowanie i weryfikacja metody oceny naprężeń resztkowych i-rzędu dla próbek ze stali kotłowej 16Mo3, 4 Konferencja Naukowo-Techniczna „Diagnostyka Materiałów i Urządzeń Technicznych”, Gdańsk 2012.

W następnym numerze

Andrzej Oneksiak, Tadeusz Sarnowski, Paweł Cegielski, Andrzej Kolasa, Dariusz Golański

Transfer innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych w przemysłowych urządzeniach do automatyzacji procesów spawalniczych

Jarosław Grześ

Wymiar fraktalny gradientowej warstwy pośredniej Al_2O_3 -Cr

Zbigniew Mirski, Dawid Majewski

Lutowność tytanu w warunkach płomieniowego lutowania twardego pod osłoną topnika

J. Zimmerman, D. Golański, T. Chmielewski, W. Włosiński

Model obliczeniowy do analizy naprężeń własnych w układzie powłoka-podłoże podczas nanoszenia powłok metodami termicznymi

Krzysztof Skrzyniecki, Cegielski Paweł, Andrzej Kolasa, Paweł Kołodziejczak

Charakterystyki statyczne nowoczesnych urządzeń do spawania łukowego

Marcin Winnicki, Aleksandra Małachowska, Andrzej Ambroziak

Badania numeryczne tworzenia metodą LPCS powłoki z cyny na podłożu aluminiowym