

Wykorzystanie szumu Barkhausena w ocenie twardości warstw nawęglanych oraz hartowanych indukcyjnie na stali AMS 6414

Using of Barkhausen noise in hardness evaluation of carburized and inductively tempered layers on AMS 6414 steel

Streszczenie

Analizowano możliwości określenia zmian twardości warstw nawęglanych i hartowanych indukcyjnie na podstawie wielkości ilościowo opisujących szum Barkhausena. Badania przeprowadzono na zestawie trzech próbek o stałej grubości warstwy nawęglanej (1,2 mm) o różnych wartościach twardości. Pomiary przeprowadzono dla trzech konfiguracji aparatury MEB-4C Mag-Lab s.c. różniących się częstotliwością prądu magnesującego. Analizowano obwiednię szumu Barkhausena i jej punkty charakterystyczne, energię, RMS, periodogramy FFT oraz rozkłady liczby zdarzeń. Uzyskano interesujące korelacje diagnostyczne mogące posłużyć w rozwiązywaniu zagadnień odwrotnych badań nieniszczących.

Słowa kluczowe: twardość; szum Barkhausena; zagadnienie odwrotne

Abstract

The possibility of hardness changes determination of carburized and induction hardened layers using quantities describing Barkhausen noise quantitatively was analyzed. The studies were carried out on three samples of constant thickness of carburized layer (1.2 mm) with different hardness values. Measurements were made for three configurations of MEB4-C device provided by Mag-Lab s.c. that differed in magnetization frequency. The Barkhausen noise envelope and its characteristic parameters, energy, RMS, FFT periodograms and event distributions were analyzed. Interesting diagnostic correlations have been obtained which can be used to solve the non-destructive testing inverse problems.

Keywords: hardness; Barkhausen noise; inverse problems

Wprowadzenie

W trakcie tradycyjnego pomiaru twardości wgłębnik twardościomierza odkształca plastycznie fragment powierzchni, na której dokonywany jest pomiar. W przypadkach niektórych elementów takie uszkodzenie powierzchni jest niedopuszczalne. W innych przypadkach odkształcenie plastyczne powierzchni nie stanowi problemu eksploatacyjnego, natomiast uniemożliwia przeprowadzanie pomiaru twardości dokładnie w tym samym miejscu, co stanowi problem diagnostyczny. Rozwiązanie tych problemów jest możliwe przez zastosowanie tzw. zagadnień odwrotnych badań nieniszczących, w których właściwości mechaniczne określane są na podstawie innych wielkości fizycznych. Celem badań zaprezentowanych w artykule była analiza możliwości opracowania zależności diagnostycznych pomiędzy wielkościami ilościowo opisującymi szum Barkhausena a twardością Vickersa HV0,5 zmierzoną na powierzchni zestawu

trzech próbek, ze stali AMS 6414 o różnej twardości. Badania dotyczące wykorzystania szumu Barkhausena w ocenie twardości prowadzone są obecnie w ośrodkach badawczych i obejmują analizy rozkładu twardości w funkcji odległości od powierzchni próbki [1,2], rozkładu twardości w spoinie i w strefie wpływu ciepła [3] oraz wpływu odkształcenia plastycznego oraz wpływu eksploatacji na zmiany twardości [4].

Szczegóły badań

Badania przeprowadzono na zestawie trzech próbek, ze stali AMS 6414, poddanych procesowi nawęglania, w atmosferze o różnym stężeniu węgla, a następnie hartowaniu. W wyniku tych procesów otrzymano próbki o różnej twardości i stałej grubości warstwy nawęglanej równej 1,2 mm.

Mgr inż. Krzysztof Fryczowski – Politechnika Śląska; **dr hab. inż. Maciej Roskosz, prof. AGH** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza; **dr inż. Dominik Kukła** – Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN; **dr inż. Maciej Szwed** – Politechnika Warszawska.

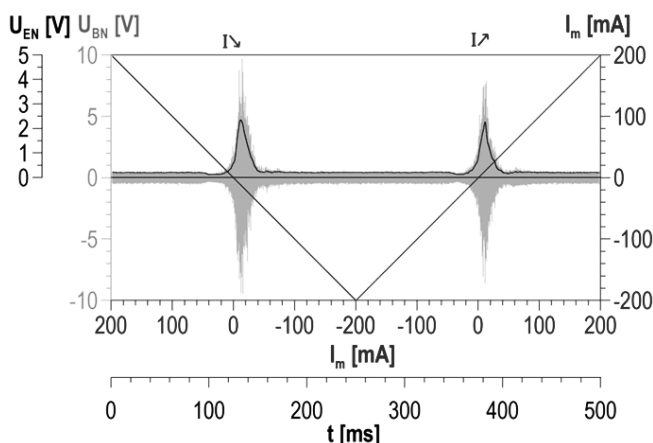
Autor korespondencyjny/Corresponding author: krzysztof.fryczowski@polsl.pl

Powierzchnia próbek została przygotowana do badań poprzez szlifowanie [5].

Rdzeń próbek ma strukturę martenzytyczną. W przypadku warstw widoczne jest coraz większe rozdrobnienie martenzytu wraz ze wzrostem twardości. Wynika to z faktu zwiększenia ilości miejsc zarodkowania martenzytu podczas hartowania wraz ze wzrostem zawartości węgla w warstwie nawęglonej, co w konsekwencji prowadzi do ograniczenia jego rozrostu. Dodatkowo w najtwardszej warstwie można odnotować obecność wydzielań cementytu [5].

Pomiary szumu Barkhausena wykonywano przy użyciu systemu pomiaru, analizy i rejestracji impulsów napięciowych natężenia Barkhausena MEB-4C firmy Mag-Lab s.c. Pomiary przeprowadzono dla kierunku magnesowania równoległego i prostopadłego do kierunku śladów szlifowania dla trzech konfiguracji ustawień urządzenia pomiarowego – szczegółowe informacje zawarto w tabelicy I.

Wynikiem pomiaru jest czasowy rozkład napięcia szumu Barkhausena U_{BN} . Na rysunku 1 przedstawiono jeden pełny cykl przemagnesowania. Linia niebieska to przebieg prądu magnesującego, kolorem szarym zaznaczono nieprzetworzony, zarejestrowany w urządzeniu pomiarowym szum Barkhausena, linia koloru czarnego to wyznaczona obwiednia szumu Barkhausena. Zmiany natężenia prądu magnesującego mają przebieg trójkątny symetryczny. W pełnym cyklu zmian można wyróżnić połowę cyklu, w którym wartość natężenia prądu maleje (oznaczenie I_{\searrow}) i połowę cyklu, w którym natężenie prądu rośnie (oznaczenie I_{\nearrow}).



Rys. 1. Szczegółowy opis pojedynczego cyklu przemagnesowania
Fig. 1. A detailed description of a single magnetization cycle

Tablica I. Szczegóły konfiguracji pomiarowej

Table I. Details of the measurement configurations

| oznaczenie konfiguracji | Konfiguracja C1 | Konfiguracja C2 | Konfiguracja C3 |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| częstotliwość próbkowania f_p [kHz] | 800 | 800 | 800 |
| amplituda prądu magnesującego [mA] | 200 | 200 | 200 |
| częstotliwość prądu magnesującego [Hz] | 2,02 | 5,31 | 10,4 |
| wzmocnienie sygnału | 50 dB | 50 dB | 25 dB |
| liczba cykli przemagnesowania | 5 | 15 | 25 |

Tablica II. Wyniki pomiarów twardości HV0.5

Table II. Results of HV0.5 hardness measurements

| Oznaczenie próbki | Wyniki pomiarów HV0,5 | | | | | | | | | | Wartość średnia HV0,5 | Odchylenie standardowe |
|-------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------------------|------------------------|
| | 757 | 749 | 746 | 768 | 748 | 757 | 740 | 757 | 757 | 753 | | |
| 1 | 757 | 749 | 746 | 768 | 748 | 757 | 740 | 757 | 757 | 753 | 753,2 | 7,40 |
| 2 | 815 | 800 | 809 | 789 | 801 | 809 | 803 | 814 | 815 | 803 | 805,8 | 7,82 |
| 3 | 834 | 827 | 827 | 821 | 851 | 846 | 821 | 853 | 846 | 836 | 836,2 | 11,53 |

Badania mikrotwardości na powierzchni warstw nawęglanych próbek wykonano przy pomocy mikrotwardościomierza Zwick Roel a wyniki pomiarów pokazano w tabelicy II.

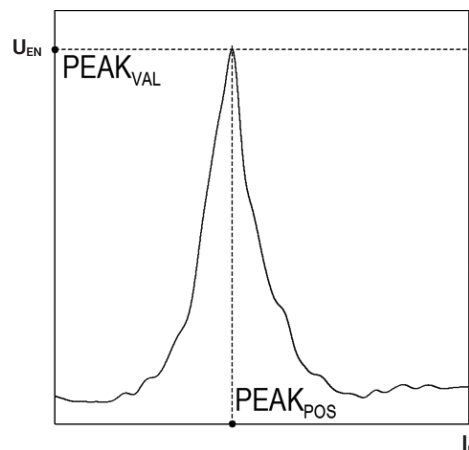
Analiza wyników

Analiza obwiedni przebiegu czasowego MBN

Obwiednię otrzymano w wyniku operacji uśredniania wygładzającego na wartościach bezwzględnych impulsów napięciowych U_{BN} . Wykorzystano do tego celu operację wielokrotnego filtrowania wygładzającego przy wykorzystaniu filtra Savitzkiego-Golaya.

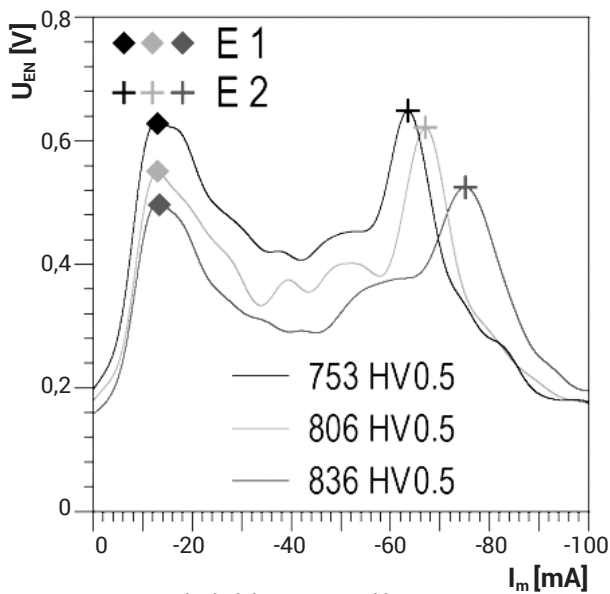
Przeprowadzono 10 iteracji wygładzania wielomianem 3-go stopnia o różnej szerokości okna dla poszczególnych konfiguracji (C1-1500, C2-300 próbek, C3-100 próbek). Następnie uśredniono wartości obwiedni z kilku cykli przemagnesowania (szczegóły w tabl. I) odpowiadające tym samym wartościom prądu magnesującego.

Do analizy wybrano fragmenty obwiedni odpowiadające połowie cyklu przemagnesowania, w którym wartość natężenia prądu maleje I_{\searrow} . Można w nich wyróżnić lokalne ekstrema, które można scharakteryzować poprzez ich wartości odpowiadające napięciu obwiedni $PEAK_{VAL}$ i miejsca ich występowania odpowiadającą natężeniu prądu magnesującego $PEAK_{POS}$ co graficznie zostało przedstawione na rysunku 2.



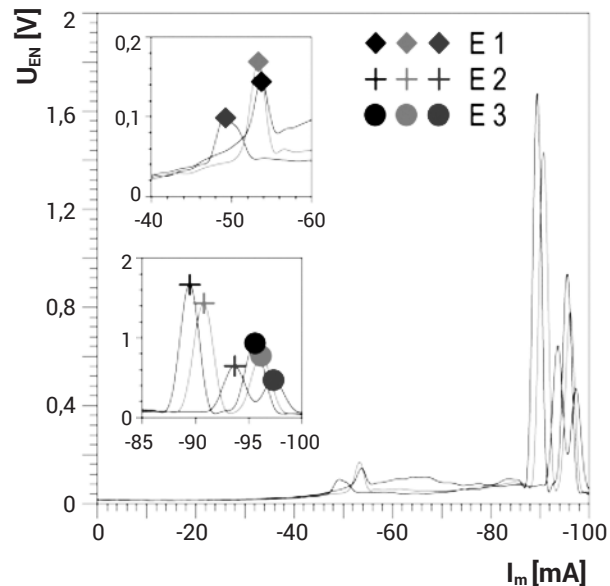
Rys. 2. Sposób wyznaczania wielkości charakterystycznych obwiedni szumu Barkhausena

Fig. 2. Method of determination of BN envelopes characteristic parameters



Rys. 3. Fragmenty obwiedni szumu Barkhausena reprezentatywne dla konfiguracji C1 i C2

Fig. 3. Fragments of BN envelopes representative for C1 and C2 configuration



Rys. 4. Fragmenty obwiedni szumu Barkhausena reprezentatywne dla konfiguracji C3

Fig. 4. Fragments of BN envelopes representative for C3 configuration

W przypadku konfiguracji C1 i C2, obwiednie charakteryzują się występowaniem dwóch lokalnych ekstremów, natomiast dla konfiguracji C3 trzech. Miejsca ich występowania przykładowo dla konfiguracji C1 pokazano na rysunku 3, a dla konfiguracji C3 na rysunku 4.

W przypadku konfiguracji C1 i C2 zmiany $PEAK_{POS}$ dla ekstremum E1 i E2 nie umożliwiają opracowania korelacji diagnostycznej. Dla konfiguracji C3 w przypadku ekstremum 1 (rys. 5) wzrostowi twardości towarzyszy przesuwanie się wartości maksymalnej $PEAK_{VAL}$ w kierunku niższych wartości natężenia prądu magnesującego, natomiast dla ekstremum E2 występuje zależność odwrotna (rys. 6). Ekstremum E3 zostało zaobserwowane tylko dla konfiguracji C3. Wyższym wartościom twardości odpowiada większa wartość bezwzględna natężenia prądu magnesującego $PEAK_{POS}$ (rys. 7).

W przypadku analizy wartości maksymalnej obwiedni $PEAK_{VAL}$ dla ekstremum E1 dla konfiguracji C1 i C2 większym wartościom twardości odpowiadają mniejsze wartości maksymalne obwiedni szumu Barkhausena $PEAK_{VAL}$, natomiast dla konfiguracji C3 brak jednolitego trendu zmian. Przykładową zależność pomiędzy twardością a $PEAK_{VAL}$ pokazano na rysunku 8. Wartość $PEAK_{VAL}$ dla ekstremum E2 umożliwia opracowanie korelacji jedynie dla konfiguracji C3 – przykład na rysunku 9. Na rysunku 10 pokazano zależność pomiędzy twardością i $PEAK_{VAL}$ dla ekstremum E3 obwiedni szumu Barkhausena. Większym wartościom twardości odpowiadają niższe wartości $PEAK_{VAL}$.

Analiza zmian energii szumu Barkhausena

Energia szumu Barkhausena zwana również jego intensywnością definiowana jest jako suma iloczynów kwadratu kolejnych impulsów napięciowych U_{BNi} i kroku czasowego, wynikającego z częstotliwości próbkowania f_{pr} , wyrażoną w postaci (1):

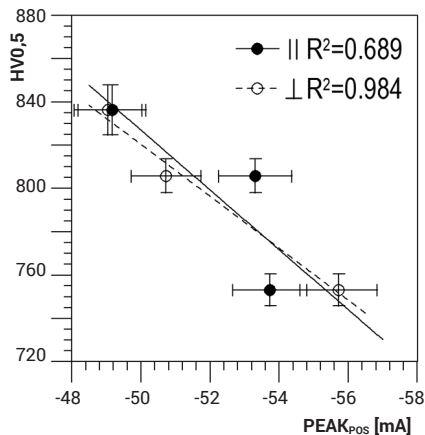
$$E_{BN} = \sum_{i=1}^N [(U_{BNi})^2 \cdot \Delta t], \quad \Delta t = 1/f_{pr} \quad (1)$$

gdzie:

N – liczba próbek sygnału szumu Barkhausena zarejestrowanego dla jednego cyklu przemagnesowania.

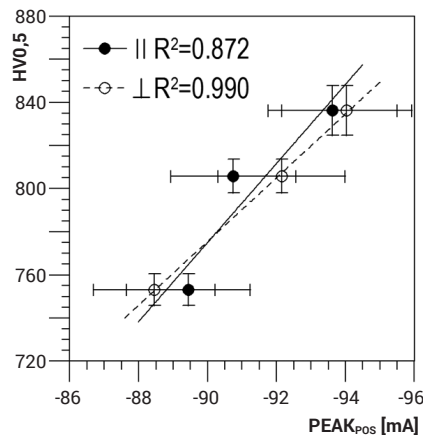
Na rysunkach od 11 do 13 pokazano zależności pomiędzy twardością i energią E_{BN} obwiedni szumu Barkhausena.

Dla wszystkich kierunków magnesowania i wszystkich konfiguracji występuje jednakowy trend zmian – wyższym wartościom twardości odpowiadają niższe wartości energii E_{BN} . Otrzymane współczynniki determinacji korelacji liniowej R^2 pomiędzy twardością i wartościami średnimi energii E_{BN} mieszczą się w przedziale od 0,898 do 0,999. Podobne, pozytywne wyniki otrzymano przy analizie wartości skutecznej U_{RMS} .



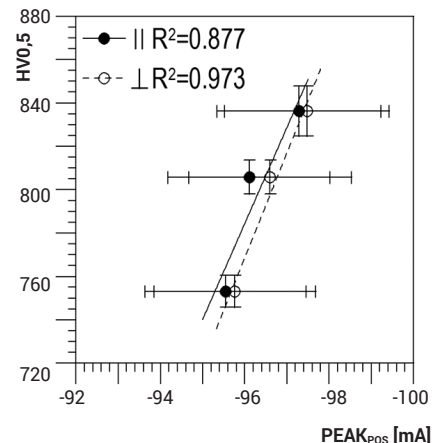
Rys. 5. Zależność pomiędzy twardością i $PEAK_{POS}$ dla ekstremum E1 – konf. C3

Fig. 5. Dependence between hardness and $PEAK_{POS}$ values for extremum E1 – conf. C1



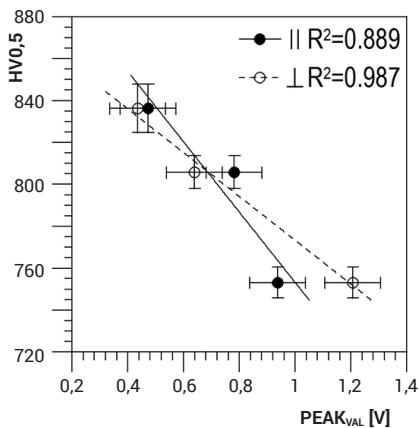
Rys. 6. Zależność pomiędzy twardością i $PEAK_{POS}$ dla ekstremum E2 – konf. C3

Fig. 6. Dependence between hardness and $PEAK_{POS}$ values for extremum E2 – conf. C3

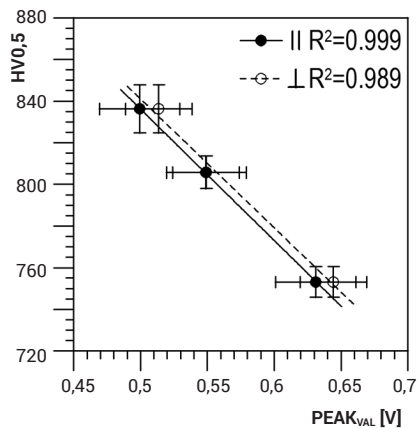


Rys. 7. Zależność pomiędzy twardością i $PEAK_{POS}$ dla ekstremum E3 – konf. C3

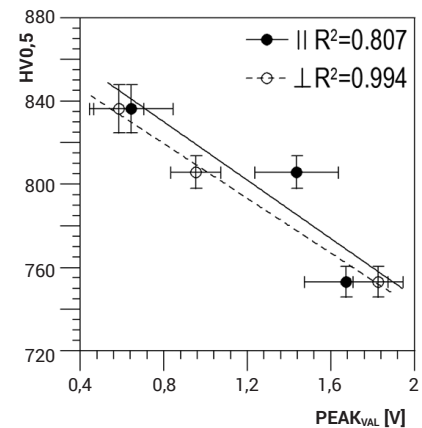
Fig. 7. Dependence between hardness and $PEAK_{POS}$ values for extremum E3 – conf. C1



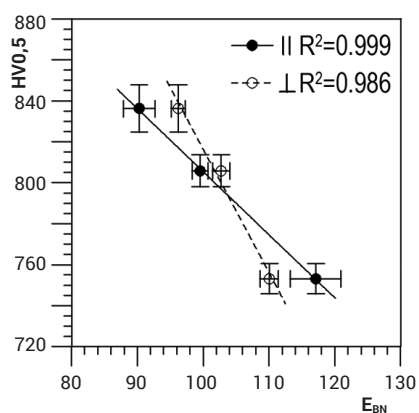
Rys. 8. Przykładowa zależność pomiędzy twardością i PEAK_{VAL} dla ekstremum E1
Fig. 8. Exemplary dependence between hardness and PEAK_{VAL} values for extremum E1



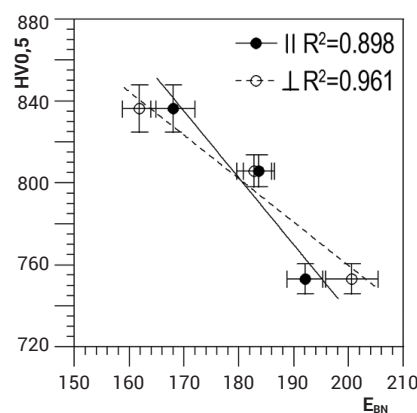
Rys. 9. Zależność pomiędzy twardością i PEAK_{VAL} dla ekstremum E2 – konf. C3
Fig. 9. Dependence between hardness and PEAK_{VAL} values for extremum E2 – conf. C3



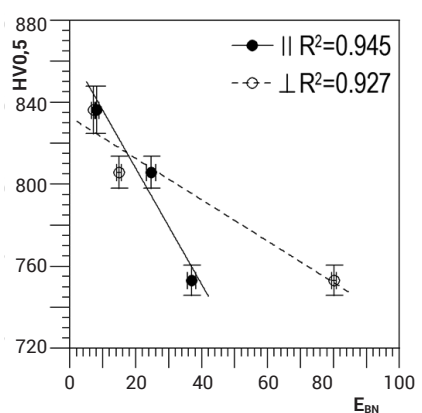
Rys. 10. Zależność pomiędzy twardością i PEAK_{VAL} dla ekstremum E3 – konf. C3
Fig. 10. Dependence between hardness and PEAK_{VAL} values for extremum E3 – conf. C3



Rys. 11. Zależność pomiędzy twardością i E_{BN} – konf. C1
Fig. 11. Dependence between hardness and E_{BN} values – conf. C1



Rys. 12. Zależność pomiędzy twardością i E_{BN} – konf. C2
Fig. 12. Dependence between hardness and E_{BN} values – conf. C2



Rys. 13. Zależność pomiędzy twardością i E_{BN} – konf. C3
Fig. 13. Dependence between hardness and E_{BN} values – conf. C3

Analiza częstotliwościowa szumu Barkhausena z wykorzystaniem FFT

Zadaniem analizy częstotliwościowej jest badanie parametrów i właściwości sygnału poprzez analizę jego struktury częstotliwościowej, umożliwiającą dzięki zastosowaniu transformacji Fouriera, w wyniku której otrzymujemy tzw. widmo częstotliwościowe sygnału, prezentujące miarę korelacji (podobieństwa) sygnału analizowanego do poszczególnych zespolonych funkcji harmonicznyc.

Uśrednione periodogramy FFT otrzymano dla trzech konfiguracji, a w każdej z nich dla dwóch kierunków magnesowania. Dla poszczególnych twardości można wyróżnić obszary, w których amplitudy składowych częstotliwościowych różnią się między sobą. Opracowano algorytm wyznaczania współczynnika determinacji liniowej R² pomiędzy wartościami amplitudy dla poszczególnych składowych częstotliwościowych periodogramów odpowiadających trzem wartościom twardości a twardością. W wyniku tego otrzymano rozkład wartości R² w funkcji częstotliwości. Umożliwia to wybór częstotliwości bądź zakresu częstotliwości, w których korelacja liniowa pomiędzy wartościami amplitudy widma a twardością jest najlepsza – przykład na rysunku 14.

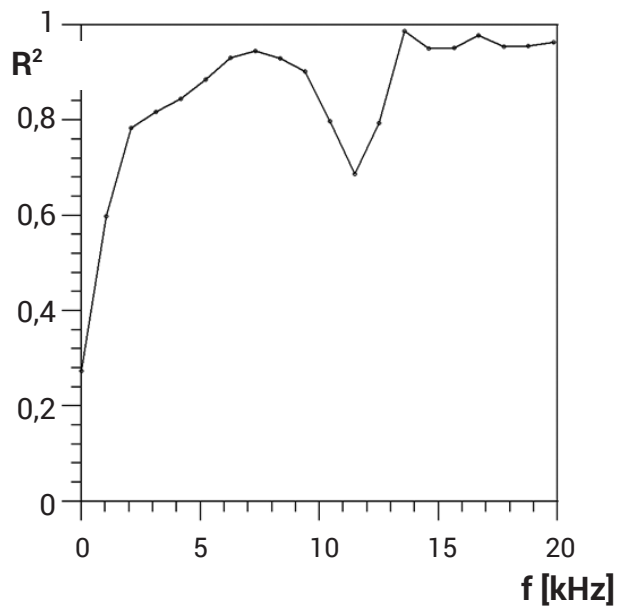
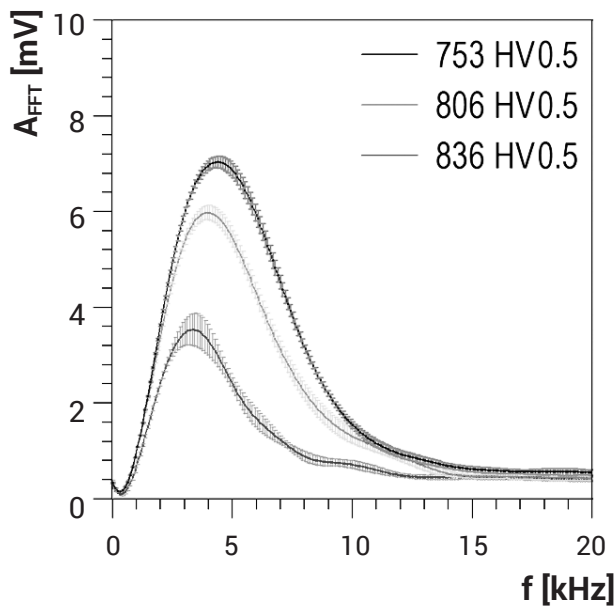
Dla każdej konfiguracji wybrano jedną częstotliwość, dla której wartości R² dla obu kierunków magnesowania świadczą o dobrej korelacji z twardością HV. Zależności te przedstawiono na rysunkach od 15 do 17.

Analiza liczby zdarzeń szumu Barkhausena

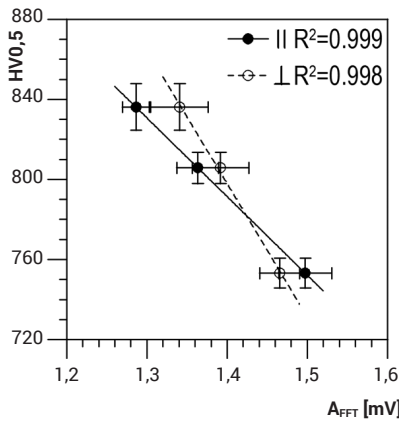
Zmierzony sygnał szumu Barkhausena stanowi zbiór impulsów napięciowych, wśród których możemy wyróżnić tzw. zdarzenia. Dla ustalonego progu napięciowego, wystąpienie zdarzenia określane jest na podstawie 3 kolejnych próbek sygnału, których wartości są wyższe od tego progu i w którym próbka środkowa ma wartość wyższą od próbek skrajnych.

Uśrednione rozkłady liczby zdarzeń w funkcji napięcia dyskryminacji U_g opracowano dla trzech konfiguracji, a w każdej z nich dla dwóch kierunków magnesowania. Dla poszczególnych twardości można wyróżnić obszary, w których liczba zdarzeń różni się między sobą. Podobnie jak dla analizy częstotliwościowej analizowano rozkład współczynnika R² korelacji liniowej pomiędzy liczbą zdarzeń i twardością w funkcji napięcia dyskryminacji U_g – przykład na rysunku 18.

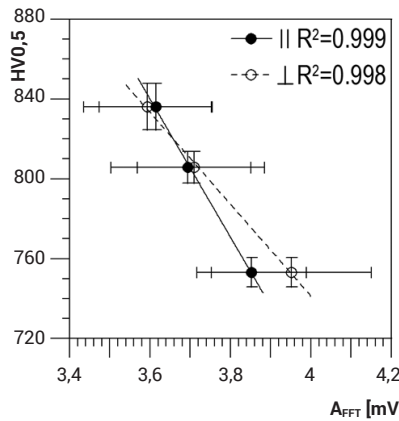
Dla każdej konfiguracji wybrano napięcie dyskryminacji dla którego wartości R² dla obu kierunków magnesowania świadczą o dobrej korelacji z twardością HV. Zależności te przedstawiono na rysunkach od 19 do 21.



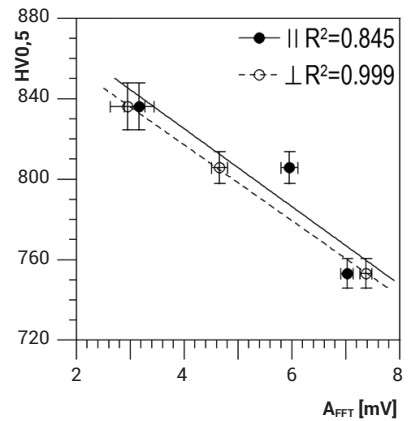
Rys. 14. Wyniki analizy częstotliwościowej: a) uśrednione periodogramy FFT dla poszczególnych twardości, b) rozkład współczynnika R^2
Fig. 14. Exemplary results of frequency analysis: a) averaged FFT periodograms for individual hardness values, b) R^2 coefficient distribution



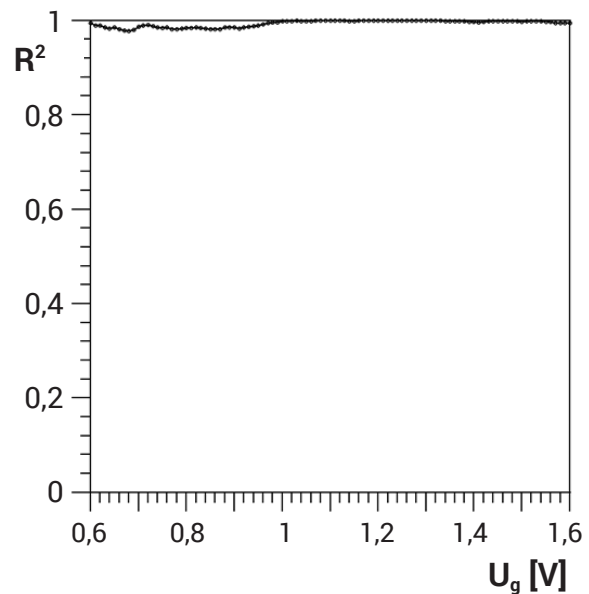
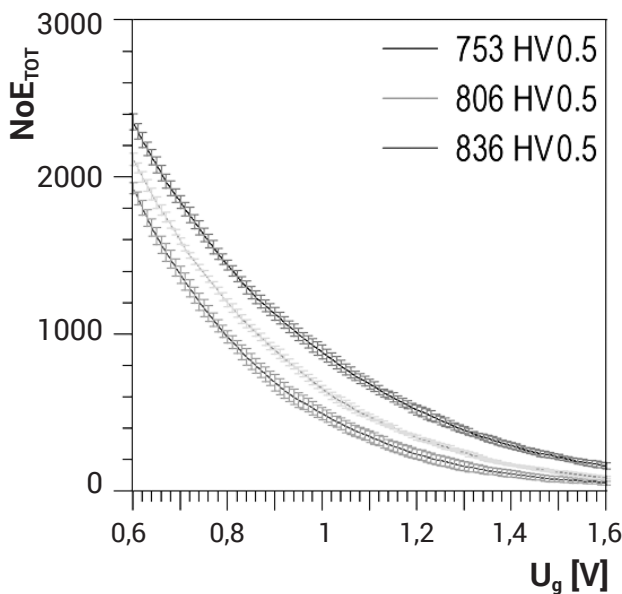
Rys. 15. Zależność pomiędzy twardością i amplitudą składowej 33,1 kHz – konf. C1
Fig. 15. Dependence between hardness and amplitude of 33.1 kHz frequency component – conf. C1



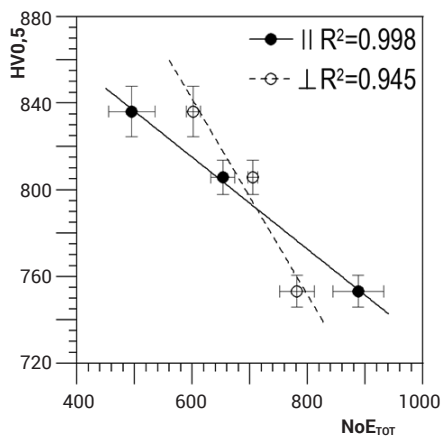
Rys. 16. Zależność pomiędzy twardością i amplitudą składowej 20,4 kHz – konf. C2
Fig. 16. Dependence between hardness and amplitude of 20.4 kHz frequency component – conf. C2



Rys. 17. Zależność pomiędzy twardością i amplitudą składowej 4,2 kHz – konf. C3
Fig. 17. Dependence between hardness and amplitude of 4.2 kHz frequency component – conf. C3

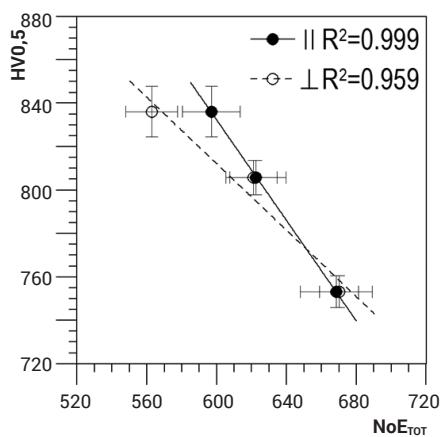


Rys. 18. Przykładowe wyniki analizy liczby zdarzeń: a) uśrednione rozkłady całkowitej liczby zdarzeń dla poszczególnych twardości, b) rozkład współczynnika R^2
Fig. 18. Exemplary results of number of events analysis: a) averaged number of total events distributions for individual hardness values, b) R^2 coefficient distribution



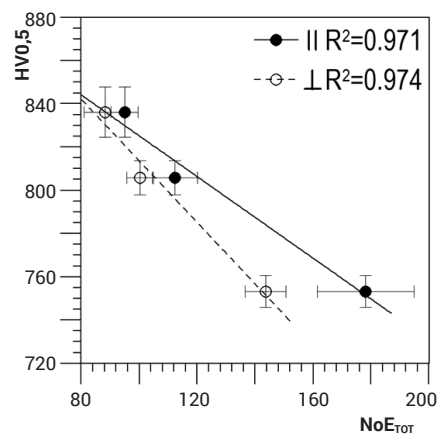
Rys. 19. Zależność pomiędzy twardością i całkowitą liczbą zdarzeń powyżej progu dyskryminacji $U_0=1\text{ V}$ – konf. C1

Fig. 19. Dependence between hardness and total number of events – threshold voltage $U_0=1\text{V}$ – conf. C1



Rys. 20. Zależność pomiędzy twardością i całkowitą liczbą zdarzeń powyżej progu dyskryminacji $U_0=0,97\text{ V}$ – konf. C2

Fig. 20. Dependence between hardness and total number of events – threshold voltage $U_0=0.97\text{V}$ – conf. C2



Rys. 21. Zależność pomiędzy twardością i całkowitą liczbą zdarzeń powyżej progu dyskryminacji $U_0=0,2\text{ V}$ – konf. C3

Fig. 21. Dependence between hardness and total number of events – threshold voltage $U_0=0.2\text{V}$ – conf. C3

Podsumowanie

W celu opracowania korelacji umożliwiających wyznaczenie twardości na podstawie pomiarów szumu Barkhausena analizowano obwiednię szumu Barkhausena i jej punkty charakterystyczne, energię, RMS, periodogramy FFT oraz rozkłady liczby zdarzeń. Uzyskano interesujące korelacje diagnostyczne mogące posłużyć w rozwiązywaniu zagadnień odwrotnych badań nieniszczących. Dobre i bardzo dobre korelacje uzyskano dla energii i wartości skutecznej szumu Barkhausena, całkowitej liczby zdarzeń dla wybranych wartości napięcia dyskryminacji. Umożliwia to wielowariantową analizę sygnału diagnostycznego a przez to zwiększa pewność wyznaczania twardości na podstawie pomiarów szumu Barkhausena. W potencjalnych aplikacjach tych korelacji należy pamiętać o uwzględnieniu czynników wpływających na sygnał diagnostyczny, np. chropowatość i kształt powierzchni, wpływ krawędzi elementu.

Przedstawione w artykule wyniki zostały uzyskane w badaniach finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki w ramach umowy UMO-2014/15/B/ST8/00203 oraz w ramach projektu OPUS o numerze rej. 2014/15/B/ST8/0436.

Literatura

- [1] Moorthy V., Shaw B.A., Evans J.T.: Evaluation of tempering induced changes in the hardness profile of case-carburised EN36 steel using magnetic Barkhausen noise analysis, *NDT&E International*, 36(1), pp. 43-49, 2003.
- [2] Stupakov O., Perevertov O., Tomas I., Skrbek B.: Evaluation of surface decarburization depth by magnetic Barkhausen noise technique, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 323(12), pp. 1692-1697, 2011.
- [3] Vourna P., Ktena A., Tsakiridis P. E., Hristoforou E.: A novel approach of accurately evaluating residual stress and microstructure of welded electrical steels, *NDT&E Int.*, Vol. 71, pp. 33-42, 2015.
- [4] Roskosz M., Fryczowski K.: Wykorzystanie szumu Barkhausena jako metody pomiaru twardości materiału ferromagnetycznego, *Przegląd Spawalnictwa*, Vol. 88, No 10, 2016, s. 143-145.
- [5] Kukła D., Piotrowski L., Szwed M.: Ocena twardości warstw nawęglanych i hartowanych indukcyjnie na stali AMS 6414 z zastosowaniem magnetycznych technik nieniszczących, *Przegląd Spawalnictwa*, Vol. 88, No 10, 2016, s. 46-50.