

# Analiza czynników wpływających na identyfikację stanu wyężenia z wykorzystaniem szumu Barkhausena na przykładzie stali S235JR

Analysis of factors influencing identification of stress-strain state using Barkhausen noise on the example of S235JR steel

## Streszczenie

Wykorzystanie szumu Barkhausena do oceny wyężenia stali ferrytycznych jest tematem wielu badań i publikacji. W niniejszym artykule podjęto temat wpływu grubości próbek i historii ich obciążania na korelacje diagnostyczne pomiędzy wielkościami ilościowo opisującymi szum Barkhausena a stanem wyężenia. Badania przeprowadzono na próbkach ze stali S235JR, która jest powszechnie wykorzystywaną stali konstrukcyjną.

Stwierdzono wpływ zarówno grubości, jak i historii obciążania na analizowane wielkości. W zależnościach korelacyjnych wpływ historii obciążenia można pominąć do wartości napężenia równej 60% granicy plastyczności badanej stali, a wpływ grubości do wartości napężenia zbliżonych do granicy plastyczności.

**Słowa kluczowe:** szum Barkhausena; wyężenie; korelacja diagnostyczna

## Abstract

Application of Barkhausen noise to evaluate stress-strain state of ferrite steels is a subject of many studies and publications. In this paper impact of sample thickness and load history on diagnostic correlations between quantities describing Barkhausen noise quantitatively and strain state was analyzed. The research was conducted on plate samples of S235JR steel, which is commonly used structural steel.

The influence of both thicknesses and load history on the analyzed quantities was found. The correlation dependencies show that, the influence of the load history can be omitted to a stress value equal to 60% of the yield point of the tested steel, and the effect of the thickness to the stress value close to the yield point.

**Keywords:** Barkhausen noise; stress-strain state; diagnostic correlation

## Wprowadzenie

Polowy (klasyczny) efekt Barkhausena związany jest z oddziaływaniem pola magnetycznego na strukturę domenową ferromagnetyka i objawia się fluktuacyjnymi zmianami strumienia magnetycznego w pobliżu jego powierzchni [1,2]. Przesuwanie ścian domenowych blokowane jest przez niejednorodności struktury krystalograficznej ferromagnetyków. Obok mikrostruktury występuje drugi czynnik mający wpływ na proces magnesowania – odkształcenia sieci krystalograficznej związanej z napężeniami własnymi i zewnętrznymi obciążeniami badanego materiału. Istotną rolę w procesie magnesowania ferromagnetyków oprócz energii wymiany i energii magnetostatycznej odgrywa energia magnetosprężysta, określona także rozkładem napężeń wewnętrznych w próbce ferromagnetyka [2,3]. Najważniejszym źródłem napężeń wewnętrznych są dyslokacje. Zewnętrzne napężenia mechaniczne, poprzez sprężenie magnetosprężyste, powodują w materiałach ferromagnetycznych przeobrażenie

struktury domenowej i prowadzą w efekcie do zmiany kształtu oraz nachylenia krzywej magnesowania. Modyfikacja struktury magnetycznej pod wpływem napężeń odbywa się głównie drogą przesuwania ścian Blocha. Wpływ napężeń na położenie granicy domenowej zależy od typu granicy. Napężenie zewnętrzne nie zmienia położenia granic typu 180°, a jedynie powodują zmianę ich szerokości. W przypadku ścianek domenowych typu „nie-180°” napężenia zewnętrzne powodują ich ruch mający charakter odwracalny, a następnie przy dużych napężeniach nieodwracalny. Przemieszczanie ścian Blocha napotyka na lokalne bariery w postaci zaburzeń sieci krystalicznej i odbywa się w sposób skokowy od przeszkody do przeszkody [2,3].

Wielkości ilościowo opisujące szum Barkhausena [4] są wykorzystywane do identyfikacji prostych i złożonych stanów napężeń w elementach ferromagnetycznych [5÷7]. W ramach niniejszych badań podjęto temat wpływu grubości

**Dr hab. inż. Maciej Roskosz, prof. AGH** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza; **mgr inż. Krzysztof Fryczowski, mgr inż. Michalina Kocur** – Politechnika Śląska w Gliwicach.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: [mroskosz@agh.edu.pl](mailto:mroskosz@agh.edu.pl)

próbek i historii ich obciążania na korelacje diagnostyczne pomiędzy wielkościami ilościowo opisującymi szum Barkhausena a stanem wyężenia.

## Szczegóły badań

Badania przeprowadzono na próbkach ze stali S235JR wg PN-EN 10025-2:2007, która jest powszechnie wykorzystywaną stalą konstrukcyjną. Skład chemiczny i właściwości wytrzymałościowe stali przedstawiono w tabelcy I.

W ramach badań wykorzystano próbki płytowe z przewężeniem o grubościach odpowiednio 3, 4 i 5 mm.

**Tablica I.** Skład chemiczny i właściwości wytrzymałościowe stali S235JR

**Table I.** Chemical composition and mechanical properties of S235JR steel

Udziały masowe maksymalne [%]						R <sub>e</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]
C	Mn	P	S	N	Cu		
0,21	1,4	0,035	0,035	0,012	0,55	235	410

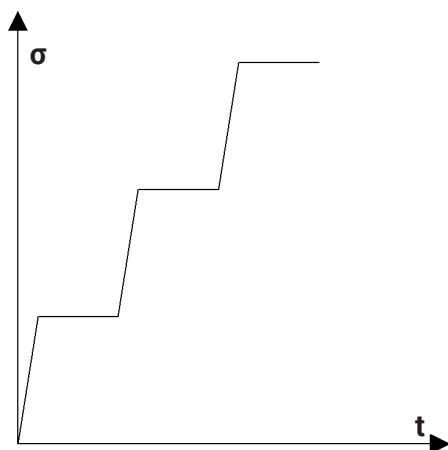
Przyjęto dwa schematy obciążania próbek. Pierwszy z nich polegał na obciążeniu próbki do zadanej wartości naprężenia, wykonaniu pomiarów i obciążeniu do kolejnej wyższej wartości naprężenia (rys. 1). Drugi z kolei to schemat obciążania, w którym po osiągnięciu zadanej wartości naprężenia i wykonaniu pomiaru próbki odciążano. W każdym kolejnym kroku zwiększano wartość naprężenia (rys. 2).

W ramach schematu obciążania SO1 badano próbki o grubościach 3, 4 i 5. W ramach schematu obciążania SO2 przebadano jedynie próbki o grubości 5 mm.

Pomiary szumu Barkhausena wykonywano przy użyciu systemu pomiaru, analizy i rejestracji impulsów napięciowych natężenia Barkhausena MEB-4C firmy Mag-Lab s.c. a konfiguracja ustawień była następująca:

- częstotliwość próbkowania: 800 kHz,
- wzmocnienie sygnału: 35 dB,
- amplituda prądu magnesującego: 200 mA,
- częstotliwość prądu magnesującego: 2,04 Hz.

Pomiary szumu Barkhausena wykonywano w dwóch kierunkach – równoległym i prostopadłym do kierunku zadawanego obciążenia.



**Rys. 1.** Schemat obciążania próbek SO1  
**Fig. 1.** SO1 sample loading procedure

## Analiza wyników

Analizowano takie wielkości opisujące szum Barkhausena jak:

- energia EBN,
- wartość skuteczna URMS,
- charakterystyczne punkty obwiedni.

Opis tych wielkości i sposoby ich uzyskiwania przedstawiono w [4].

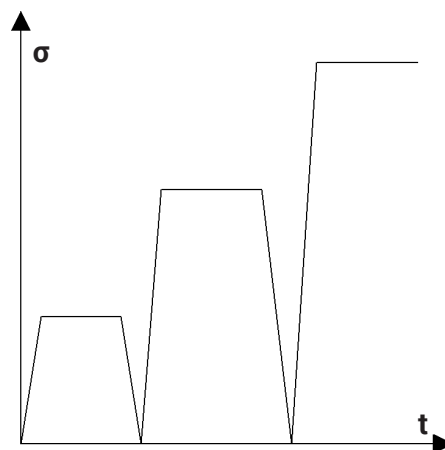
### Analiza wpływu grubości próbek

Analizę wpływu grubości próbek przeprowadzono dla schematu obciążania SO1. Obciążenia próbek o różnych grubościach dobrano tak, by wartości naprężenia uzyskiwanego w najmniejszych wartościach próbek były jednakowe dla każdego z kroków obciążania. Wpływ czynnych naprężeń rozciągających na energię szumu Barkhausena przedstawiono na rysunkach 3 i 4, a na wartość skuteczną U<sub>RMS</sub> na rysunkach 5 i 6, odpowiednio dla równoległego i prostopadłego kierunku pomiaru.

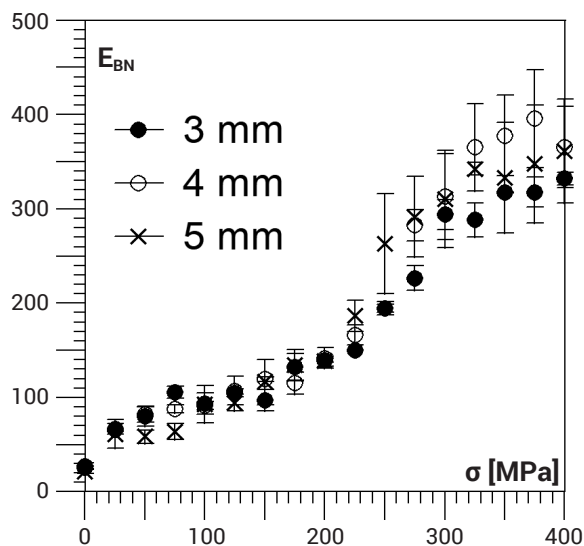
Zarówno dla energii, jak i wartości skutecznej w zakresie naprężeń do ok. 200 MPa dla pomiarów w kierunku równoległym do działania obciążenia wpływ grubości jest niewielki, a różnice mieszczą się w odchyleniu standardowym wartości średniej dla poszczególnych pomiarów. Powyżej 200 MPa wraz ze wzrostem naprężenia rosną zarówno odchylenia standardowe, jak i wartości wielkości średnich dla różnych grubości. Dla pomiarów w kierunku prostopadłym w całym zakresie zmienności naprężeń wartości odchylenia standardowych dla poszczególnych grubości są niewielkie, natomiast różnice dla wartości średnich dla poszczególnych grubości są zauważalne.

Analizowano również wpływ czynnych naprężeń rozciągających na punkty charakterystyczne obwiedni takie jak wartość maksymalna obwiedni PEAK<sub>VAL</sub> i jej położenie PEAK<sub>POS</sub> [4]. Nie stwierdzono wyraźnego wpływu naprężenia na wartości PEAK<sub>POS</sub>. Na rysunkach 7 i 8 pokazano wpływ naprężeń na wartość maksymalną obwiedni PEAK<sub>VAL</sub>, odpowiednio dla równoległego i prostopadłego kierunku pomiaru. Wnioski sformułowane dla energii i wartości skutecznej są słuszne również dla zależności otrzymanych dla PEAK<sub>VAL</sub>.

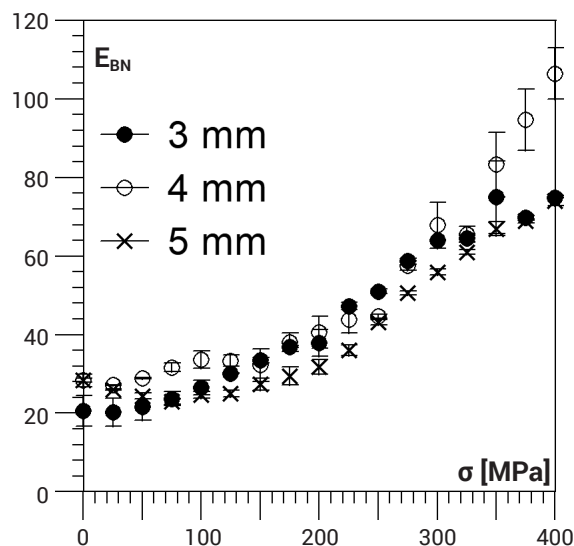
Można stwierdzić, że w zakresie odkształceń sprężystych możliwe jest opracowanie korelacji diagnostycznych, w których wpływ grubości próbek można pominąć.



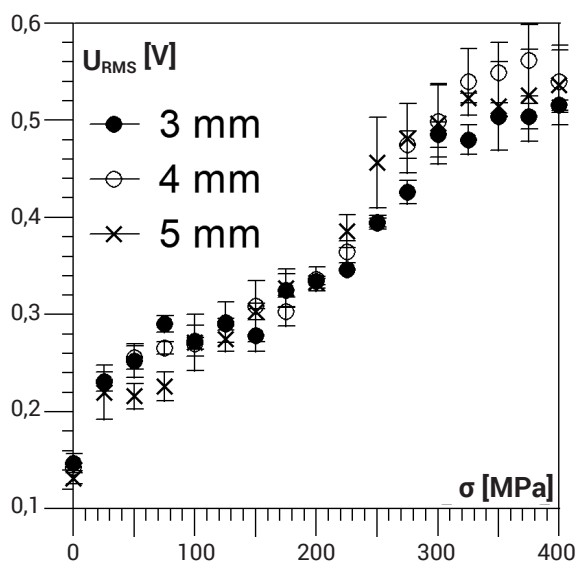
**Rys. 2.** Schemat obciążania próbek SO2  
**Fig. 2.** SO2 sample loading procedure



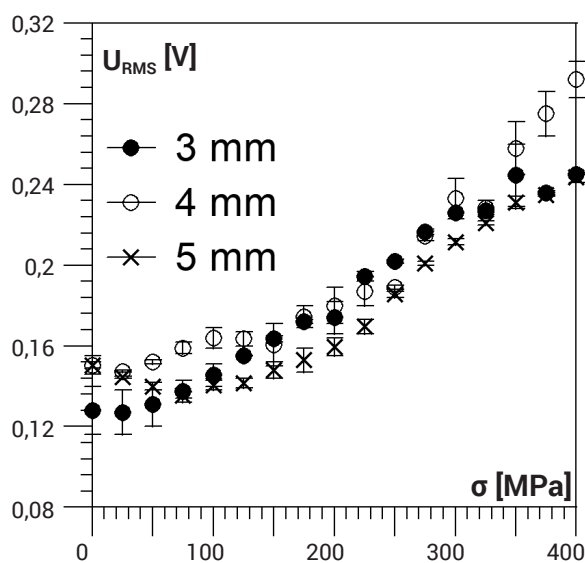
**Rys. 3.** Zależność między średnią energią  $E_{BN}$  i naprężeniem  $\sigma$  dla próbek o grubości 3, 4 i 5 mm – kierunek równoległy  
**Fig. 3.** The relationship between average energy  $E_{BN}$  and stress  $\sigma$  for 3, 4 and 5 mm samples – parallel direction



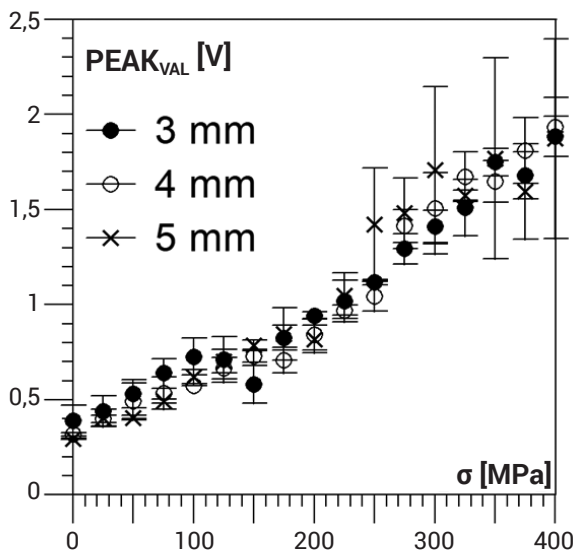
**Rys. 4.** Zależność między średnią energią  $E_{BN}$  i naprężeniem  $\sigma$  dla próbek o grubości 3, 4 i 5 mm – kierunek prostopadły  
**Fig. 4.** The relationship between average energy  $E_{BN}$  and stress  $\sigma$  for 3, 4 and 5 mm samples – perpendicular direction



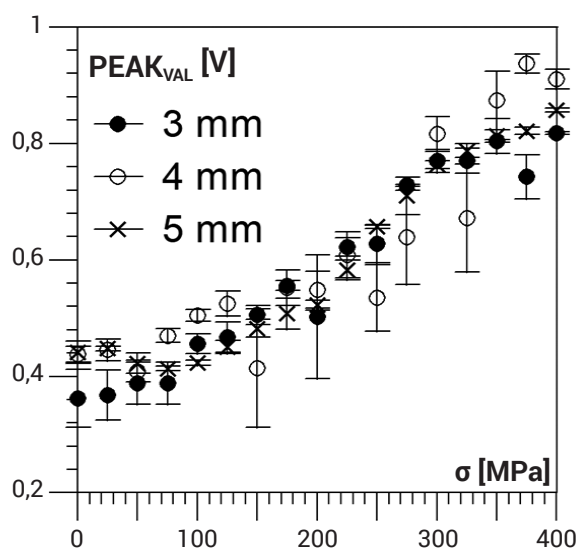
**Rys. 5.** Zależność między średnią wartością skuteczną  $U_{RMS}$  i naprężeniem  $\sigma$  dla próbek o grubości 3, 4 i 5 mm – kierunek równoległy  
**Fig. 5.** The relationship between average RMS value and stress  $\sigma$  for 3, 4 and 5 mm samples – parallel direction



**Rys. 6.** Zależność między średnią wartością skuteczną  $U_{RMS}$  i naprężeniem  $\sigma$  dla próbek o grubości 3, 4 i 5 mm – kierunek prostopadły  
**Fig. 6.** The relationship between average RMS value and stress  $\sigma$  for 3, 4 and 5 mm samples – perpendicular direction



**Rys. 7.** Zależność między średnią wartością  $PEAK_{VAL}$  i naprężeniem  $\sigma$  dla próbek o grubości 3, 4 i 5 mm – kierunek równoległy  
**Fig. 7.** The relationship between average  $PEAK_{VAL}$  value and stress  $\sigma$  for 3, 4 and 5 mm samples – parallel direction

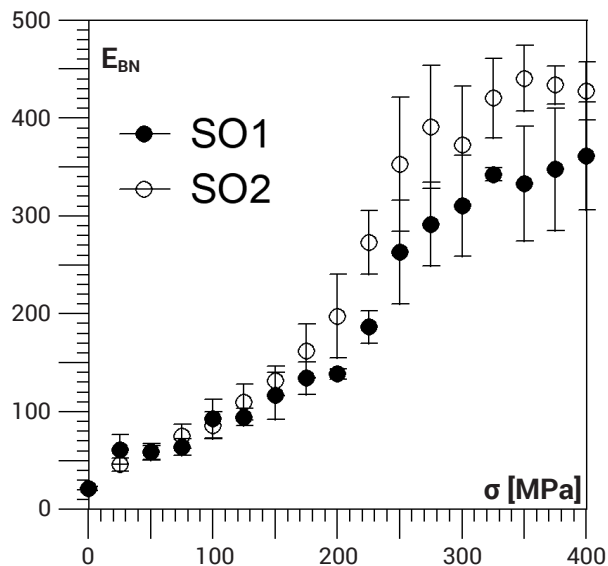


**Rys. 8.** Zależność między średnią wartością  $PEAK_{VAL}$  i naprężeniem  $\sigma$  dla próbek o grubości 3, 4 i 5 mm – kierunek prostopadły  
**Fig. 8.** The relationship between average  $PEAK_{VAL}$  value and stress  $\sigma$  for 3, 4 and 5 mm samples – perpendicular direction

## Analiza wpływu historii obciążenia

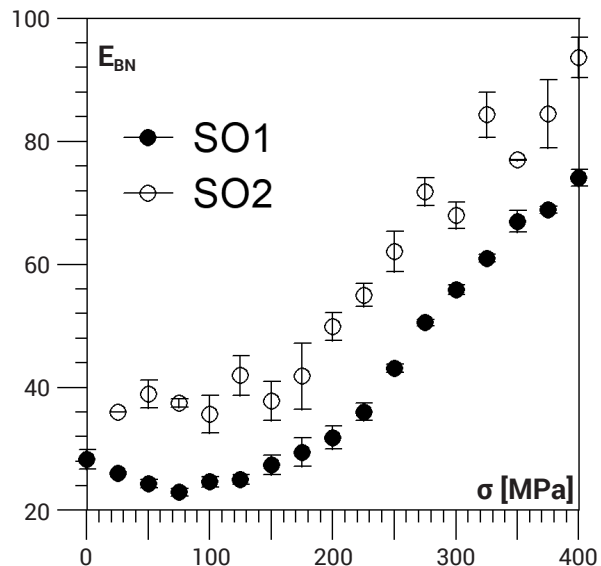
Analizę wpływu historii obciążenia przeprowadzono dla próbek o grubości 5 mm, których część była obciążana wg schematu obciążania SO1 a część wg schematu obciążania SO2. Zależności między energią szumu Barkhausena i wartością skuteczną a naprężeniami czynnymi pokazano na rysunkach od 9 do 12. Dla pomiarów w kierunku równoległym do naprężenia ok. 200 MPa wpływ historii obciążania

jest niewielki. Dalszy wzrost naprężenia powoduje wzrost rozrzutu wartości średnich jak i wzrost odchylenia standardowego. Może to świadczyć o wpływie historii obciążania. Dla pomiarów w kierunku prostym różnice pomiędzy wartościami otrzymanymi do poszczególnych schematów obciążania są wyraźne i w miarę jednakowe w całym zakresie zmienności naprężeń.



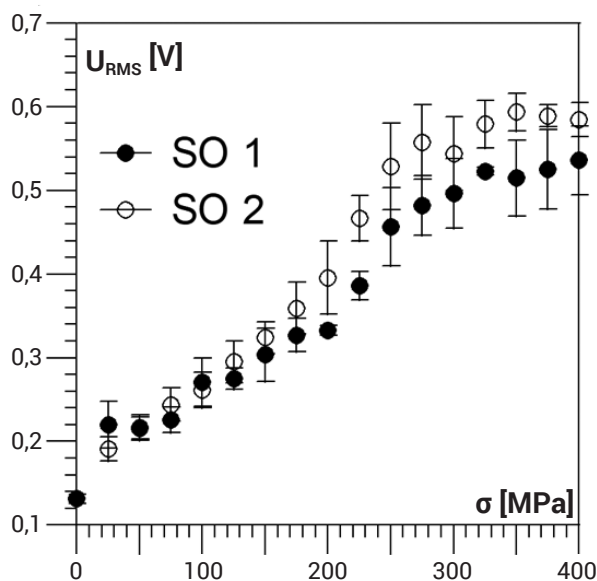
Rys. 9. Zależność między średnią energią  $E_{BN}$  i naprężeniem  $\sigma$  dla próbek o grubości 5 mm – kierunek równoległy

Fig. 9. Relationship between average energy  $E_{BN}$  and stress  $\sigma$  for 5 mm samples – parallel direction



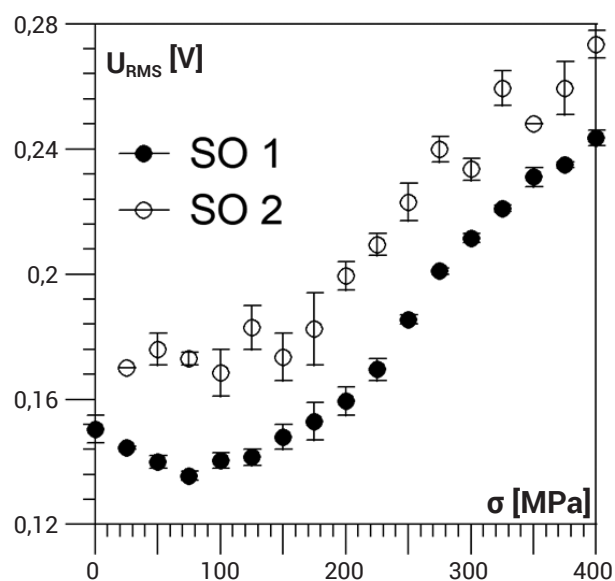
Rys. 10. Zależność między średnią energią  $E_{BN}$  i naprężeniem  $\sigma$  dla próbek o grubości 5 mm – kierunek prostopadły

Fig. 10. The relationship between average energy  $E_{BN}$  and stress  $\sigma$  for 5 mm samples – perpendicular direction



Rys. 11. Zależność między średnią wartością skuteczną  $U_{RMS}$  i naprężeniem  $\sigma$  dla próbek o grubości 5 mm – kierunek równoległy

Fig. 11. Relationship between average RMS value and stress  $\sigma$  for 5 mm samples – parallel direction

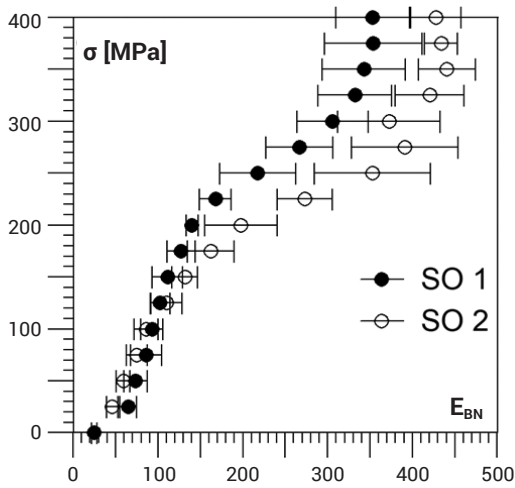


Rys. 12. Zależność między średnią wartością skuteczną  $U_{RMS}$  i naprężeniem  $\sigma$  dla próbek o grubości 5 mm – kierunek prostopadły

Fig. 12. Relationship between average RMS value and stress  $\sigma$  for 5 mm samples – perpendicular direction

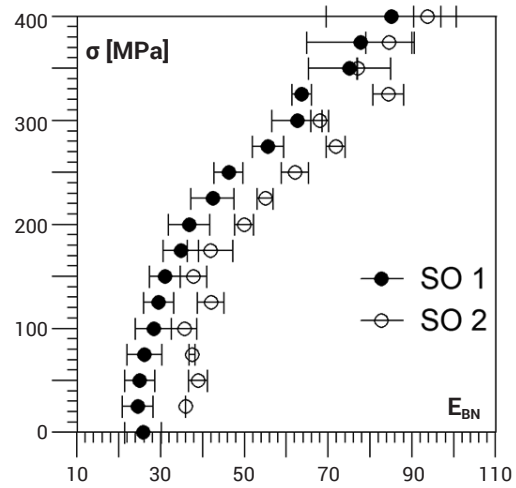
## Podsumowanie

Na rysunkach od 13 do 16 pokazano przykładowe zależności korelacyjne wykorzystujące energię i wartość skuteczną szumu Barkhausena. Na każdym z rysunków pokazano uśrednione wartości z wszystkich badanych próbek w ramach poszczególnych schematów obciążania.



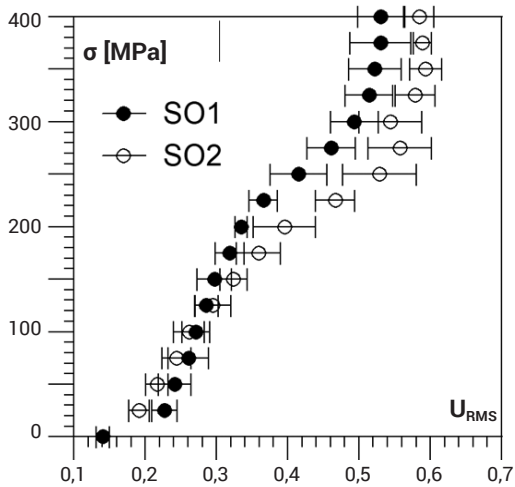
Rys. 13. Zależność korelacyjna pomiędzy naprężeniem  $\sigma$  i energią  $E_{BN}$  – kierunek równoległy

Fig. 13. Correlation between stress  $\sigma$  and energy  $E_{BN}$  – parallel direction



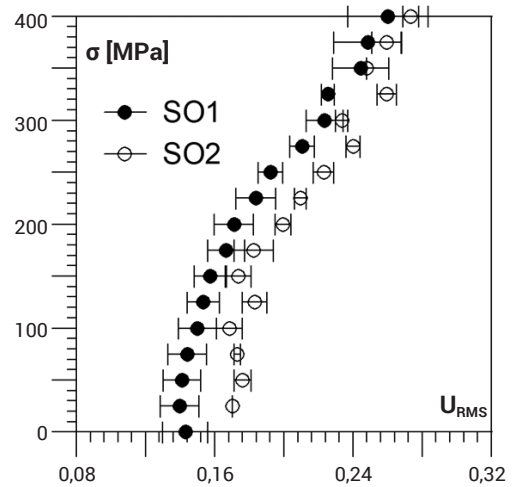
Rys. 14. Zależność korelacyjna pomiędzy naprężeniem  $\sigma$  i energią  $E_{BN}$  – kierunek prostopadły

Fig. 14. Correlation between stress  $\sigma$  and energy  $E_{BN}$  – perpendicular direction



Rys. 15. Zależność korelacyjna pomiędzy naprężeniem  $\sigma$  i wartością skuteczną  $U_{RMS}$  – kierunek równoległy

Fig. 15. Correlation between stress  $\sigma$  and RMS value – parallel direction



Rys. 16. Zależność korelacyjna pomiędzy naprężeniem  $\sigma$  i wartością skuteczną  $U_{RMS}$  – kierunek prostopadły

Fig. 16. Correlation between stress  $\sigma$  and RMS value – perpendicular direction

Wykorzystując pomiary w obydwu kierunkach magnesowania, jednoznaczną korelację diagnostyczną można opracować w zasadzie dla całego zakresu zmienności naprężeń. Jednak stwierdzone wcześniej wpływ grubości jest możliwy do pominięcia tylko w zakresie odkształceń sprężystych. Dodatkowo powyżej granicy plastyczności odchylenia standardowe wartości średniej są znaczące, co ogranicza użyteczny zakres zależności korelacyjnych do zakresu odkształceń sprężystych lub niewiele przekraczających granicę plastyczności.

Wpływ historii obciążenia można pominąć do wartości naprężenia 150 MPa, co w przypadku analizowanej stali stanowi ok. 60% granicy plastyczności. Powyżej tej wartości występują wyraźne różnice w otrzymanych wynikach.

Zakładając, że przy konstruowaniu większości obiektów technicznych jako naprężenie dopuszczalne przyjmuje się granicę plastyczności z odpowiednim współczynnikiem bezpieczeństwa, poziom naprężeń eksploatacyjnych może leżeć poniżej 60% granicy plastyczności. Czyni to możliwym zastosowanie otrzymanych zależności korelacyjnych, które nie musiałyby uwzględniać zarówno wpływu grubości, jak i historii eksploatacji.

## Literatura

- [1] Błachnio J.: Efekt Barkhausena w diagnostyce elementów maszyn, Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, PIB, 2009.
- [2] Augustyniak B.: Zjawiska magnetoelastyczne i ich wykorzystanie w nieniszczących badaniach materiałów, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2003.
- [3] Roskosz M.: Wykorzystanie własnego magnetycznego pola rozproszenia w diagnostyce elementów ferromagnetycznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2014.
- [4] Fryczowski K., Roskosz M.: Metody ilościowej analizy szumu napięciowego Barkhausena, Przegląd Spawalnictwa Vol. 88, No 10, 2016.
- [5] 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, vol. 321, pp. 2331-2335, 2009.
- [6] Roskosz M., Witoś M., Żurek Z.H., Fryczowski K.: Porównanie możliwości diagnostycznych metod magnetycznej pamięci metalu, szumu Barkhausena i niskoczęstotliwościowej impedancji, Przegląd Spawalnictwa, Vol. 88 No 10, 2016.
- [7] Augustyniak B., Chmielewski M., Piotrowski L., Kielczyński W., Prokop K., Kukuła D.: Pomiar naprężeń własnych metodą Barkhausena za pomocą sondy z wirującym polem magnetycznym, Energetyka Listopad, s. 641-643, 2014.