

## ANALIZA DOŚWIADCZALNA WPŁYWU CZYNNIKÓW GEOMETRYCZNYCH W BADANIACH METODĄ BARKHAUSENA

Tomasz GARSTKA<sup>1</sup>, Kazimierz JAGIEŁA<sup>2</sup>

1. Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, SEP Częstochowa  
tel.: +48 34 3250767 e-mail: garstka.tomasz@wip.pcz.pl
2. Akademia Techniczno – Humanistyczna w Bielsku Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, SEP Częstochowa  
tel.: +48 33 8279323 e-mail: kazimierz.jagiela@gmail.com

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki doświadczalnej analizy pośredniego wpływu czynników geometrycznych na warunki magnesowania podczas badań za pomocą metody Barkhausena. Badano wpływ tzw. efektu brzegowego związanego z położeniem głowicy pomiarowej względem krawędzi przedmiotu badań oraz szerokości samej próbki kalibracyjnej. Jako metodę badawczą zastosowano modelowanie fizyczne zmiany wymiarów geometrycznych i położenia głowicy pomiarowej przy zachowaniu niezmienności innych parametrów mogących wpływać na pomiar. Badania z wykorzystaniem opracowanej aparatury pomiarowej przeprowadzono dla dwóch konstrukcji głowic. Uzyskane rezultaty badań pozwoliły stwierdzić, iż brak kompensacji wpływu analizowanych czynników geometrycznych podczas badań za pomocą metody Barkhausena może prowadzić do powstawania bardzo dużych błędów pomiarowych.

**Słowa kluczowe:** Szum Barkhausena, próbka kalibracyjna.

### 1. WPROWADZENIE

Źródłem powstawania znaczących błędów pomiarowych przy badaniach nieniszczących jest nieuwzględnianie szeregu czynników mających pośredni lub bezpośredni wpływ na wynik pomiaru. Sytuacja taka ma także miejsce przy badaniach właściwości mechanicznych materiałów ferromagnetycznych za pomocą metody Barkhausena [1]. Metoda ta polega na lokalnym przemagnesowywaniu badanego materiału i pomiarze za pomocą cewki zbliżonej do jego powierzchni, fluktuacji w strumieniu indukcji, mających źródło w skokowym ruchu ścian domenowych. Indukowany w cewce sygnał elektryczny (o amplitudzie rzędu  $\mu\text{V}$ ) po odfiltrowaniu posiada charakterystyczny kształt i nosi nazwę magnetycznego szumu Barkhausena (w skrócie MSB). Bezpośredni wpływ na przebieg procesu magnesowania w skali mikroskopowej, a tym samym na MSB, ma szereg czynników, takich jak budowa mikrostrukturalna czy stan naprężeń własnych [2]. Natomiast ściśle i silne uzależnienie dynamiki przebiegu samego zjawiska skokowego ruchu ścian domenowych od amplitudy i szybkości zmian pola magnetycznego  $H_m$ , powoduje, iż każda zmiana warunków magnesowania w czasie badań zakłóca wyniki pomiarów. Ogólnie zależność parametrów sygnału MSB np. wartości skutecznej  $MSB_{RMS}$  w funkcji  $H_m$  jest zbliżona kształtem do krzywej pierwotnego magnesowania, z wyraźnym obszarem nasycenia [3].

W przypadku badań nieniszczących metodami elektromagnetycznymi, np. defektoskopii wiroprądowej czy pomiarze grubości powłok, znane są ogólne zalecenia, co do wymaganej grubości podłoża lub oznaczenia minimalnej odległości głowicy pomiarowej od brzegu próbki [4]. Wytyczne te nie mogą być jednak przeniesione na metodę Barkhausena, dla której brak jest takich wskazówek, ze względu na inny zakres częstotliwości magnesowania rzędu kilkunastu Hz oraz odmienną konstrukcję głowicy pomiarowej. Wobec powyższego, zasadnym wydaje się prowadzenie prac badawczych w tym obszarze.

Zagadnienia związane z wpływem czynników geometrycznych takich jak wymiary próbki czy umiejscowienie na niej głowicy pomiarowej, nie mają większego znaczenia w przypadku laboratoryjnych badań prowadzonych na próbkach o jednakowych wymiarach. Problem ten staje się natomiast istotny w przypadku badań w warunkach rzeczywistych. Rozkład natężenia pola magnetycznego w warstwie przypowierzchniowej badanego materiału może zmieniać się wtedy wraz ze zmianą położenia głowicy lub być odmienny niż podczas kalibracji prowadzonej na wąskich próbkach poddawanych odkształceniom. Tym samym, wyznaczanie naprężeń na podstawie funkcji kalibracyjnej  $MSB_{RMS} = f(\sigma)$  będzie obarczone błędem.

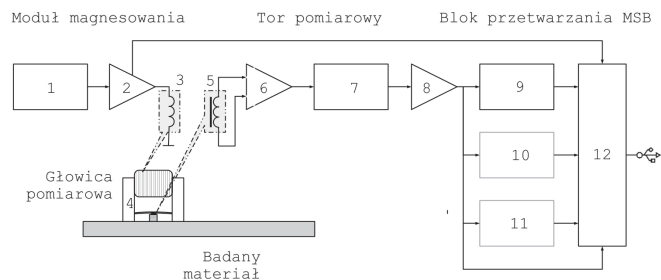
Szczegółową analizę jednowymiarowego przypadku, gdy zmianie ulega tylko grubość badanego elementu przedstawiono w [5]. Natomiast w niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań dotyczące zależności wyników pomiarów z wykorzystaniem zjawiska Barkhausena, od szerokości przedmiotu badań oraz położenia głowicy pomiarowej względem jego krawędzi. Analizowane zagadnienie jest szczególnie ważne w przypadku badania naprężeń własnych w blachach, z których wycina się podłużne próbki kalibracyjne.

### 2. EKSPERYMENT

#### 2.1. Aparatura pomiarowa

Badania przeprowadzone zostały z wykorzystaniem opracowanej i wykonanej specjalnej aparatury pomiarowej w postaci przenośnego urządzenia pomiarowego współpracującego z komputerem [6]. Składa się ona z trzech głównych modułów: magnesowania, pomiarowego i

przetwarzania MSB, a jej schemat blokowy przedstawiono na rysunku 1.



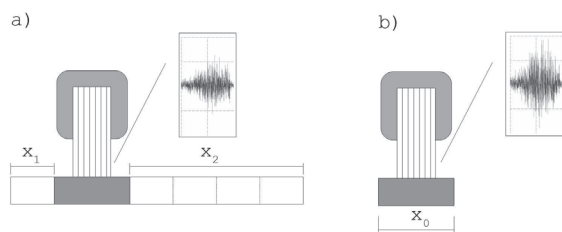
Rys. 1. Schemat blokowy aparatury pomiarowej

Układ przemagnesowywania zawiera generator napięcia piłkkształtnego 1 oraz wzmacniacz prądowy mocy 2, który zasila uzwojenie 3 nawinięte na jarzmie magnesującym 4 głowicy pomiarowej.

Tor pomiarowy, którego zadaniem jest kondycjonowanie szumu Barkhausena detekcjonowanego przez cewkę pomiarową 5, zbudowany jest z dwóch stopni wzmacniających rozdzielonych układem filtra górnoprzepustowego. Pierwszy stopień 6 jest szerokopasmowym wzmacniaczem pomiarowym, charakteryzującym się dużym, wzmocnieniem (regulowanym do 80 dB) i wysokim współczynnikiem tłumienia sygnału współbieżnego *CMRR*. Jego zadaniem jest eliminacja zakłóceń synfazowych oraz wzmocnienie MSB do użytecznego poziomu. Rolą filtra 7 jest natomiast usunięcie dominującej składowej podstawowej prądu magnesującego i jej harmonicznych. Drugi stopień wzmacniający 8 służy w zasadzie tylko do standaryzacji amplitudy MSB podawanego do bloku jego przetwarzania. W bloku tym, wyznaczana jest wartość skuteczna  $MSB_{RMS}$  za pomocą przetwornika *True RMS* 9; kształtowany jest sygnał obwiedni za pomocą układu detektora szczytowego 10 oraz formowane są znormalizowane impulsy odpowiadające skokom Barkhausena powyżej przyjętej granicznej wartości amplitudy 11. Sam sygnał MSB oraz sygnały niosące informację o jego parametrach a także dotyczące parametrów magnesowania, są akwizycjonowane przez kartę pomiarową 12 i przekazywane do komputera w celu ich wizualizacji, dalszego przetwarzania oraz rejestracji.

## 2.2. Charakterystyka eksperymentu

Badania wpływu wybranych czynników geometrycznych przeprowadzono w oparciu o modelowanie fizyczne. Polegało ono na jednoczesnym symulowaniu, za pomocą prostokątnych stalowych próbek (belek) składanych w pakiety różnych szerokości badanego płaskiego elementu a zarazem pozwalało na zmienianie położenia głowicy względem jego brzegów, określonych odległościami  $x_1$  i  $x_2$  (rys.2a)



Rys. 2. Sposób modelowania fizycznego wpływu czynników geometrycznych

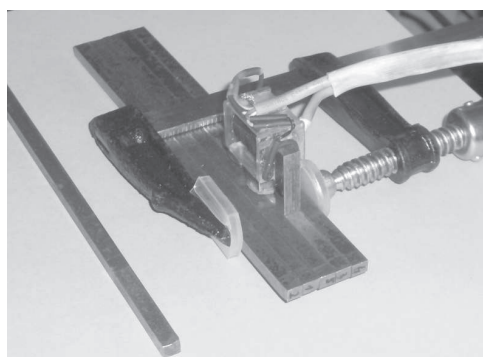
Aby niezależnie pomiary od mogących się zmieniać właściwości mechanicznych, lokalnego stanu naprężeń czy stanu powierzchni w poszczególnych próbkach, głowica pomiarowa została przyklejona na stałe do jednej z belek.

Analizę wpływu czynników geometrycznych, czyli wartości wymiarów  $x_1$  i  $x_2$  na sygnał MSB, przeprowadzono w oparciu o obserwację względnych zmian wartości skutecznej szumu Barkhausena (1). Jako sygnał odniesienia przyjęto wartość skuteczną MSB mierzoną w pojedynczej, wyselekcjonowanej próbce (rys. 2b), do której została przytwierdzona głowica pomiarowa.

$$MSB_r = \frac{MSB_{RMS}(x_1, x_2)}{MSB_{RMS0}} \quad (1)$$

gdzie:  $MSB_r$  – stosunek wartości skutecznych MSB,  $MSB_{RMS}$  – wartość skuteczna MSB dla danej konfiguracji odległości  $x_1$  i  $x_2$ ,  $MSB_{RMS0}$  – wartość skuteczna MSB w próbce odniesienia

Widok układu eksperymentalnego, przedstawiono na rysunku 3. Po wyżarzaniu odprężającym, powierzchnie boczne próbek ze stali S235JGR2 zostały obrobione za pomocą obrabiarki sterowanej numerycznie. Następnie były dokładnie szlifowane, tak, aby po złożeniu w pakiet, uzyskać ich jak najściślejsze przyleganie.



Rys. 3. Widok układu eksperymentalnego

Badania przeprowadzono dla dwóch rodzajów głowicy różniących się szerokością poprzeczną jarzma oraz belek, z których były składane pakiety. W pierwszym przypadku szerokość poprzeczna jarzma magnesującego głowicy pomiarowej nr 1 wynosiła 6 mm, długość 35 mm, natomiast liczba zwojów uzwojenia magnesującego wynosiła 300. Pojedyncze próbki miały wymiary 5×6×150 mm. W drugim przypadku wykorzystano inną konstrukcję głowicy pomiarowej, o szerokości jarzma 13 mm i długości 40 mm oraz liczbie 400 zwojów uzwojenia magnesującego, którą zamocowano na typowej próbce kalibracyjnej odniesienia o szerokości  $x_0 = 20$  mm i grubości również 5 mm.

## 3. WYNIKI I ANALIZA BADAŃ

Podczas pierwszego etapu badań z wykorzystaniem głowicy nr 1, wartość prądu magnesującego  $I_m$  wynosiła 190 mA a jego częstotliwość  $f_m$  była równa 12 Hz. Pomiary przeprowadzono dwukrotnie, dla konfiguracji przedstawionych w tabeli 1 oraz dla ich odbić lustrzanych. Ciemnym kolorem zaznaczono aktualną pozycję próbki, do której zamocowano głowicę pomiarową. W tabeli 1

przedstawiono również wyznaczone z zależności (1), wartości współczynnika  $MSB_r$ .

Analizując wyniki uzyskane dla konfiguracji pomiarowych 1 ÷ 6 ( $x_1 = 0$ ), wartość  $MSB_r$  w funkcji zwiększającego się wymiaru  $x_2$ , zmniejsza się wykładniczo, i może być opisana równaniem (2).

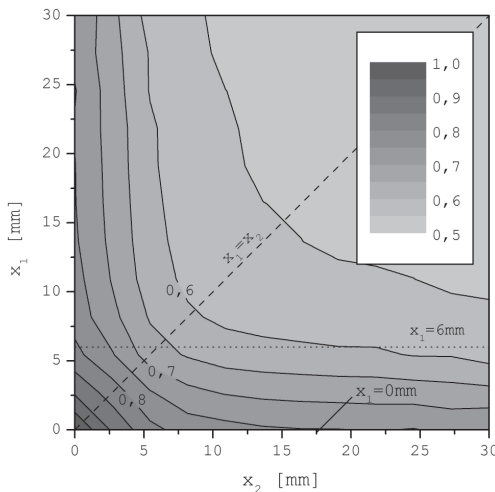
$$MSB_r = 0,74 + 0,258e^{-x_2/4,57} \quad (2)$$

Spadek intensywności przebiegu zjawiska Barkhausena wynika oczywiście ze zwiększania się efektywnego pola przekroju wewnątrz badanego materiału, przez który przenika strumień magnetyczny wytworzony przez jarzmo magnesujące. Powoduje to w konsekwencji zmniejszenie się natężenia pola magnetycznego w obrębie głowicy pomiarowej i samej cewki detekcyjnej.

Tabela 1. Zestawienie badanych konfiguracji pomiarowych nr 1

Lp	Konfiguracja	$MSB_r$	Lp	Konfiguracja	$MSB_r$
1		1,000	7		0,641
2		0,797	8		0,602
3		0,775	9		0,573
4		0,760	10		0,568
5		0,747	11		0,553
6		0,740	12		

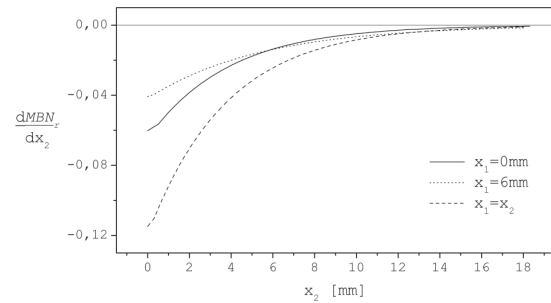
Analogiczną postać funkcji (2), można zastosować do opisu zmian (1) dla innych stałych wartości odległości  $x_1$ . W postaci graficznej zależność obrazującą wartość  $MSB_r$  w funkcji obu zmiennych geometrycznych  $x_1$  i  $x_2$ , pokazano na rysunku 4.



Rys. 4. Zależność  $MSB_r$  w funkcji wymiarów  $x_1$  i  $x_2$ . Pomiar głowicą nr 1

W celu wyznaczenia zasięgu oddziaływania krawędzi wyrobu na stan namagnesowania w obrębie głowicy pomiarowej, obliczono pochodną  $dMSB_r/dx_2$  dla różnych wartości odległości  $x_1$  (Rys. 4). Zaobserwowano, że dla wartości  $x_2$  powyżej 18 mm, wartość pochodnej we

wszystkich przypadkach dąży asymptotycznie do zera (rys.5). Oznacza to, że wpływ oddziaływania tzw. efektu brzegowego można zaniedbać, jeśli odległość użytej w badaniu głowicy pomiarowej od krawędzi wynosi ponad trzy szerokości jej jarzma magnesującego.



Rys. 5. Przebieg zmian pochodnej  $dMBN_r/dx_2$

W drugim etapie badań z wykorzystaniem drugiego typu głowicy, mając na uwadze silnie nieliniową zależność intensywności  $MSB$  w funkcji natężenia przemagnesowującego pola magnetycznego  $H_m$ , pomiary przeprowadzono dla dwóch wartości prądu magnesującego  $I_m$ : 130 mA i 210 mA i  $f_m = 12$  Hz. Zapewniło to wartości natężenia pola magnetycznego odpowiednio na zboczu i w obszarze nasycenia charakterystyki  $MSB_{RMS} = f(H_m)$  dla badanego materiału. Widok badanych konfiguracji jak i wyniki obliczonych wartości  $MSB_r$  zestawiono w tabeli 2.

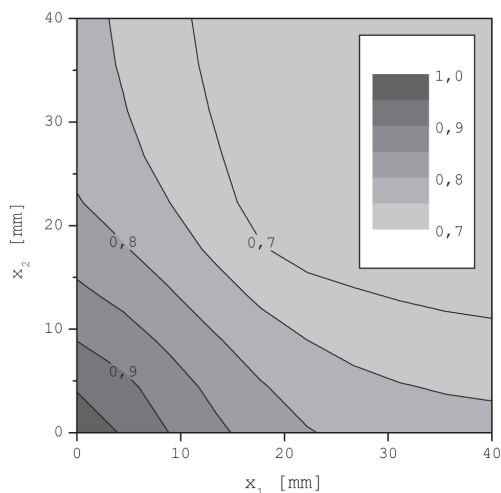
Na podstawie analizy uzyskanych wyników można zauważyć, iż zmiany odległości  $x_1$  i  $x_2$  pomiędzy konfiguracjami 1 i 6 przy  $I_m = 130$  mA mogą powodować zmianę wartości skutecznej  $MSB$  aż o 37%. Zgodnie z przewidywaniami, w przypadku, gdy czynniki geometryczne modyfikowały namagnesowanie w obszarze nasycenia charakterystyki  $MSB_{RMS} = f(H_m)$  obserwowane zmiany  $MSB_r$  były mniejsze i wynosiły maksymalnie 25%.

Tabela 2. Zestawienie badanych konfiguracji pomiarowych nr 2

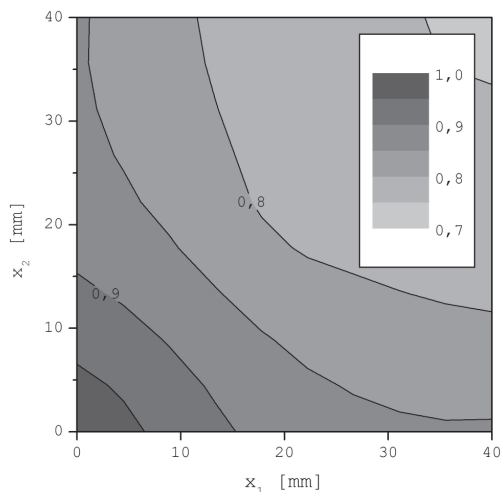
Lp	Konfiguracja	$MSB_r$ [-]	
		$I_m = 130$ mA	$I_m = 210$ mA
1		1,000	1,000
2		0,812	0,877
3		0,770	0,856
4		0,664	0,786
5		0,644	0,759
6		0,630	0,746

Graficzne przedstawienie wartości  $MSB_r$  w funkcji obu zmiennych geometrycznych  $x_1$  i  $x_2$ , zobrazowano odpowiednio na rysunku 6 dla  $I_m = 130$  mA oraz na rysunku 7 dla  $I_m = 210$  mA. Podobnie jak w poprzednim przypadku, dla jednego ze stałych wymiarów  $x_1$  lub  $x_2$ , zmiany  $MSB_r$  w funkcji drugiego z wymiarów, mogą być opisane za pomocą funkcji wykładniczej. Analiza przebiegu wartości jej pochodnej wykazała, iż dla głowicy nr 2 zasięg oddziaływania brzegów wynosi w przybliżeniu 45 mm, czyli również trzykrotność szerokości jarzma magnesującego.

Wyniki te są więc zbliżone jakościowo z uzyskanymi dla pierwszej z badanych głowic.



Rys. 6. Zależność  $MSB_r = f(x_1, x_2)$ ;  $I_m = 130$  mA; Głowica nr 2



Rys. 7. Zależność  $MSB_r = f(x_1, x_2)$ ;  $I_m = 210$  mA; Głowica nr 2

#### 4. PODSUMOWANIE

Zaprezentowane w pracy wyniki badań obrazują jak istotnym elementem badań za pomocą metody Barkhausena jest uwzględnianie wpływu na pomiar wymienionych czynników geometrycznych. Na podstawie uzyskanych

rezultatów można sformułować wniosek praktyczny, iż w przypadku badań naprężeń własnych w wyrobach o znacznej szerokości, np. arkuszach blach, korzystniej jest prowadzić kalibrację na jak najszerszych próbkach. Jednakże wykonywanie pomiarów w pobliżu krawędzi wyrobu i tak wymaga kompensacji wzrostu natężenia pola magnetycznego. Rozwiązanie tego problemu oraz sposób kompensacji z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych przedstawiono w [7]. Sieci te estymują z dużą dokładnością prezentowane w pracy zależności, które są trudne do tradycyjnego modelowania matematycznego.

Zaproponowany w niniejszej pracy sposób modelowania fizycznego może zostać wykorzystany także do analizy wpływu na badania metodą Barkhausena geometrii wyrobów o innych, czasem skomplikowanych kształtach przekroju poprzecznego, jak np. szyn.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Augustyniak B.: Zjawiska magnetosprężyste i ich wykorzystanie w nieniszczących badaniach materiałów. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2003
2. Binayaka N.: Material Characterization using Barkhausen Noise Analysis Technique - A Review. Indian Journal of Science and Technology, Vol 10 (14), 2017, s. 1-10
3. Garstka T., Jagieła K.: Kryterium doboru natężenia prądu magnesującego w metodzie Barkhausena pomiaru naprężeń własnych. Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej, Częstochowa 2008, s. 98-101
4. Janiczek R.: Pomiary grubości warstw wierzchnich. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej 2007
5. Garstka T.: The influence of product thickness on the measurements by Barkhausen noise method, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Nr 1, Vol. 27, 2008, s. 47-50
6. Garstka T.: The Complex System for Residual Stress Determination Based on Barkhausen Noise Measurement, 5<sup>th</sup> ICBM Testing. Petten, The Netherlands, 2005, s. 219-226
7. Garstka T., Jagieła K.: Neuroestymacja poziomu naprężeń własnych w wyrobach hutniczych na podstawie parametrów szumu Barkhausena, VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa Nowe technologie i osiągnięcia w metalurgii i inżynierii materiałowej. Częstochowa 2006, s.157-161

### EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE GEOMETRICAL FACTORS IN BARKHAUSEN NOISE INVESTIGATIONS

The paper presents the results of experimental analysis of the indirect influence of geometric factors on the magnetization conditions during material investigations by Barkhausen method. The impact of the so-called boundary effect associated with the position of the measuring head relative to the edge of the test object and the width of the calibration sample have been investigated. As a research method, physical modeling of changes in geometrical dimensions and position of the measuring head was used, while maintaining the invariance of other parameters that could influence the measurement. Investigations using the developed measuring apparatus were performed for two designs of the measuring head. The obtained results showed that the lack of compensation of the influence of the analyzed geometric factors during the Barkhausen method can lead to significant measurement errors.

**Keywords:** Barkhausen noise, calibration sample, geometric factors.