

Zintegrowana głowica pomiarowa do badań metodą Barkhausena

Streszczenie. W artykule przedstawiono założenia i wybrane zagadnienia dotyczące budowy opracowanej głowicy pomiarowej do badań metodą Barkhausena. Wyposażono ją w dodatkowy układ interfejsu kontrolno-sterującego użytkownika, usprawniający prowadzenie nieniszczących badań diagnostycznych na obiektach oddalonych od głównej jednostki pomiarowej. Część elektroniczną głowicy pomiarowej zbudowano stosując popularne platformy sprzętowe z mikrokontrolerami ATmega. Natomiast obudowę prototypowej głowicy wykonano z zastosowaniem druku 3D.

Abstract. The article presents the assumptions and selected issues of the construction of the developed measuring head for testing with the Barkhausen method. It is equipped with additional control and measurement system of the user interface, facilitating the conduct of non-destructive diagnostic tests on objects distant from the main measuring unit. The electronic part was built with the use of popular hardware platforms based on the ATmega microcontrollers. The housing of the prototype head was manufactured using 3D printing (*Integrated measuring head for Barkhausen testing*).

Słowa kluczowe: Szum Barkhausena, badania nieniszczące, głowica pomiarowa, druk 3D

Keywords: Barkhausen noise, non-destructive testing, measuring head, 3D printing

Wstęp

Coraz szersze znaczenie w badaniach nieniszczących oraz diagnostyce technicznej materiałów ferromagnetycznych i wyrobów z nich wykonanych, zajmuje tzw. metoda Barkhausena [1-5]. Pod względem głębokości pomiarowej z jakiej jest pozyskiwana informacja diagnostyczna, np. o stanie naprężeń wewnętrznych, plasuje się ona pomiędzy stricte powierzchniową metodą rentgenowską a objętościową metodą ultradźwiękową [6,7]. Do jej zalet należy także szybkość dokonywania pomiaru, ponieważ wynik uzyskiwany jest praktycznie w czasie rzeczywistym.

Podstawą omawianej metody jest wpływ czynników związanych z budową mikrostrukturalną oraz stanem naprężeń wewnętrznych w ferromagnetyku na skokowy proces ruchu ścian domenowych podczas jego przemagnesowywania [8, 9]. Lokalne fluktuacje strumienia magnetycznego indukują w uzwojeniu detekcyjnym, zbliżonym do powierzchni badanego elementu, charakterystyczny szum napięciowy, nazywany magnetycznym szumem Barkhausena (MSB) [10]. Po niezbędnym kondycjonowaniu MSB [11], polegającym na znacznym wzmocnieniu (rzędu kilkudziesięciu dB) oraz odfiltrowaniu składowych prądu magnesującego, wybrane parametry tego sygnału mogą być powiązane z określonymi właściwościami materiału w procesie kalibracji (naprężenia) lub poprzez porównanie z etalonami (struktura, twardość).

Dwa główne podukłady funkcjonalne głowic pomiarowych stosowanych w tej dziedzinie badawczej [12,13], stanowią uzwojenie z jarzmem magnesującym badany materiał oraz cewka detekcyjna szumu Barkhausena. Standardowo, są one umieszczane wewnątrz obudów o kształcie prostopadłościanu lub walca [14,15]. Z punktu widzenia ergonomii, przy wykonywaniu długotrwałych pomiarów, obejmujących np. kilkadziesiąt punktów pomiarowych operowanie głowicami o takim kształcie powoduje znaczny dyskomfort w obrębie dłoni u osoby prowadzącej badania.

W trakcie prowadzenia badań, odczyt bądź zapis wyników pomiarów przez operatora następuje na właściwej jednostce głównej aparatury pomiarowej zawierającej układ magnesowania, pomiaru i przetwarzania szumu Barkhausena, do której podłączona jest głowica [14]. Rozwiązanie takie stosowane jest powszechnie nie tylko przez jednostki naukowe ale także przez firmy oferujące

komercyjne urządzenia dla tego typu badań. Podstawowym problemem rozwiązań tego typu jest niedogodność wynikająca z konieczności ciągłego przekierowywania uwagi osoby wykonującej badanie z miejsca pomiaru na pole odczytowe aparatury pomiarowej. Ponadto, zapis wyniku pomiaru wymaga ręcznego naciśnięcia przycisku inicjującego umieszczonego w obudowie aparatury lub aplikacji pomiarowej, co stwarza duże problemy dla jednej osoby ją obsługującej. W przypadku stosowania głowic dwukierunkowych z krzyżowym układem obwodów magnesujących [16], służących do szybkiej oceny anizotropii właściwości materiału, zmiana kierunku badania również wymusza ręczne naciśnięcie przełącznika w aparaturze pomiarowej. Uciążliwość ta dotyczy zwłaszcza prowadzenia badań w warunkach przemysłowych lub trudno dostępnych miejscach jak rurociągi czy turbiny [17].

W ramach prac badawczych prowadzonych w Katedrze Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej z wykorzystaniem autorskich rozwiązań aparatury pomiarowej do badań metodą Barkhausena, opracowano nową konstrukcję dwukierunkowej głowicy pomiarowej, zintegrowanej z dodatkowym interfejsem kontrolno-sterującym. W jego skład wchodzi: miniaturowy wyświetlacz prezentujący na bieżąco wyniki pomiaru, przyciski funkcyjne zapisu pomiaru oraz zmiany kierunku magnesowania, a także świetlne elementy sygnalizacyjne. Wyposażenie głowicy w te niespotykane w innych dotychczasowych konstrukcjach funkcjonalności, eliminuje wymienione powyżej niedogodności i znacznie podnosi komfort prowadzenia pomiarów.

Przy prototypowaniu obudowy głowicy zastosowano technologię druku przyrostowego 3D, a w obszarze interfejsu operatora wprowadzono uniwersalne rozwiązania oparte o mikrokontrolery jednocukładowe z rodziny ATmega

Charakterystyka budowy głowicy

Ogólny widok opracowanej prototypowej głowicy pomiarowej przedstawiono na rysunku 1. Zasadniczo przeznaczona jest ona do badań stanu naprężeń własnych w tzw. wyrobach walcowanych płaskich, tj. stalowych blachach grubych i cienkich oraz wykonanych z nich elementach [18].

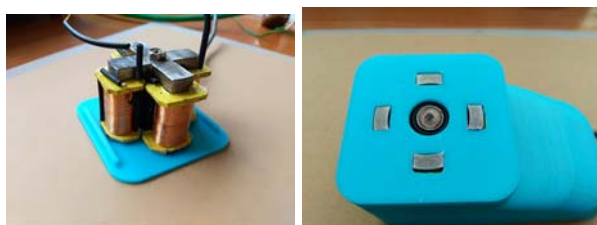
W budowie prototypu wykorzystano, używany we wcześniejszych badaniach blach kotłowych [19], zespół uzwojeń magnesujących umieszczonych na

czteropalczastym rdzeniu wraz z cewką detekcyjną ulokowaną pomiędzy jego nabiegownikami (rys. 2).

Schemat funkcjonalny głowicy, w połączeniu z istniejącą jednostką główną aparatury pomiarowej, przedstawiono na rysunku 3, gdzie czerwoną linią obramowano przynależne do jej konstrukcji podzespoły.



Rys.1. Ogólny widok opracowanej głowicy pomiarowej podłączonej do jednostki głównej aparatury pomiarowej

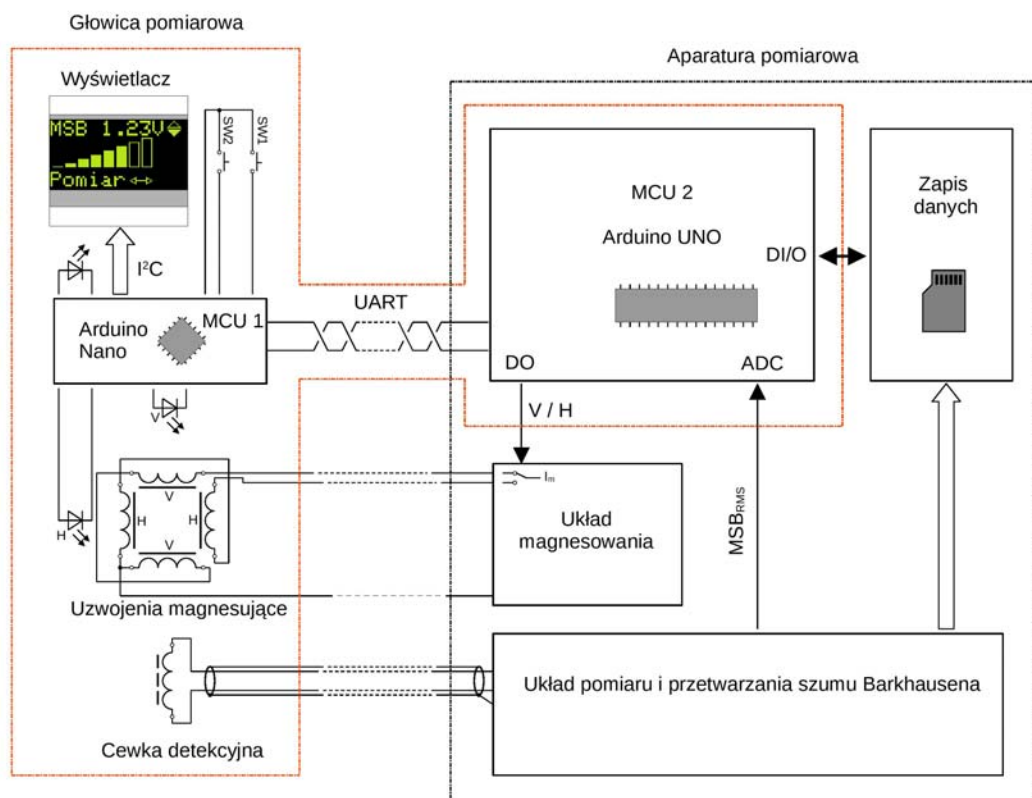


Rys.2. Widok układu uzwojeń magnesujących i cewki detekcyjnej

Umieszczone wewnątrz głowicy cewki magnesujące są zasilane prądem o przebiegu trójkątnym i częstotliwości kilkunastu Hz z układu magnesowania. Zawiera on w swojej strukturze generator, wzmacniacz mocy o cechach źródła prądowego oraz układ kluczujący przesyłaniem prądu do odpowiednich par uzwojeń. Sterowanie przełączaniem kierunku magnesowania odbywa się za pomocą przycisku SW1, znajdującego się na obudowie głowicy pomiarowej. Przycisk ten, podłączony jest do znajdującego się wewnątrz głowicy pomiarowej modułu mikrokontrolera MCU1 typu Arduino Nano.

Mikrokontroler ten wymienia dwukierunkowo, z wykorzystaniem transmisji szeregowej, dane z modułem mikrokontrolera MCU 2 typu Arduino Uno, który wbudowano do jednostki głównej aparatury pomiarowej. Jedno z wyjść cyfrowych tego modułu steruje bezpośrednio kluczem załączającym poszczególne pary uzwojeń magnesujących V lub H. Działanie przycisku SW1 jest zaprogramowane w mikrokontrolerze MCU1 jako bistabilne, z jednoczesnym aktywowaniem odpowiednich par diod świecących trójkątnych markerów sygnalizujących kierunek magnesowania (rys.4). Umieszczono je na obwodzie kołnierza otaczającego jarzmo magnesujące, co pozwala na precyzyjne pozycjonowanie głowicy w danym położeniu

Wzbudzony przez uzwojenia magnesujące w wybranym kierunku badania i detekcjonowany przez cewkę szum Barkhausena jest przesyłany do znajdującego się w aparaturze pomiarowej układu kondycjonowania i przetwarzania szumu Barkhausena [11]. Tam następuje jego wzmocnienie w specjalizowanym układzie wzmacniacza pomiarowego (k_u ustawiane w zakresie 80 – 120 dB) i filtracja górnoprzepustowa ($f_d = 1\text{kHz}$) oraz wyznaczenie za pomocą przetwornika *TrueRMS* jego parametru energetycznego w postaci wartości skutecznej napięcia.



Rys.3. Schemat funkcjonalny zintegrowanej głowicy pomiarowej



Rys.4. Widok umiejscowienia podświetlanego markera położenia jarzma magnesującego

Informacja o mierzonej wartości skutecznej szumu Barkhausena używanej jako główny nośnik informacji diagnostycznej o wartości np. naprężeń własnych [20] jest przetwarzana do postaci cyfrowej w przetworniku A/C mikrokontrolera MCU 2 i przesyłana zwrótnie do modułu mikrokontrolera MCU 1 w głowicy, gdzie jest przetwarzana do postaci liczbowej i graficznej, a następnie wyświetlana na podłączonym poprzez interfejs I²C ekranie wyświetlacza OLED o przekątnej 0,96". Wyświetlacz ten umieszczono w przodzie wierzchniej części obudowy.

Podstawowy ekran odczytowy wyświetlacza w głowicy zaprojektowano z wykorzystaniem narzędzia online [21]. Na ekranie tym (rys. 3) znajduje się pole wskazujące aktualnie mierzoną wartość skuteczną szumu Barkhausena wraz z wskaźnikiem w postaci dwóch trójkątów informującym czy wartość ta, z odpowiednią histerezą, jest mniejsza czy większa od ostatnio zapisanego pomiaru. Funkcja ta przydatna jest przy poszukiwaniu miejsc koncentracji naprężeń własnych. Poniżej zamieszczono bargraf, ilustrujący graficznie mierzoną wartość MSB oraz dodatkowe pole z informacją o wybranym kierunku magnesowania, czyli pomiaru.

Drugi z przycisków SW2, podłączonych do układu mikrokontrolera w głowicy, odpowiada za zainicjowanie procedury zapisu danych w pamięci aparatury pomiarowej. Informacja o zakończeniu zapisu danych jest przesyłana również zwrótnie do głowicy pomiarowej i sygnalizowana zapaleniem się diody LED umieszczonej na obudowie głowicy obok wyświetlacza, na czas około 2 sekund.

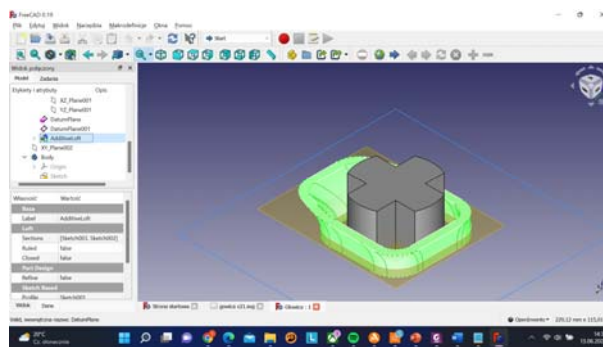
Charakterystyczną cechą opracowanej konstrukcji głowicy pomiarowej jest jej znacznie bardziej ergonomiczny kształt, odbiegający od dotychczas stosowanych prostych brył. Pozwala on na bardziej naturalny i pewniejszy chwyt z jednoczesną możliwością operowania kciukiem i palcem wskazującym dwoma przyciskami funkcyjnymi SW1 i SW2, rozmieszczonymi na przeciwległych ściankach bocznych obudowy (rys.5).



Rys.5. Widok głowicy pomiarowej w trakcie badań

Trójwymiarowy model obudowy głowicy został zaprojektowany przy użyciu oprogramowania *FreeCAD* w wersji 0.19 (rys. 6) z uwzględnieniem typowych cech antropometrycznych dłoni oraz wymiarów geometrycznych zestawu cewek przemagnesowujących i komponentów elektronicznych interfejsu kontrolno-sterującego.

Wyeksportowane z programu modele bryłowe osobno dolnej i górnej części, posłużyły następnie do wygenerowania plików wynikowych w formacie *G-code* z przeznaczeniem dla drukarki 3D. Obudowa przedstawianej głowicy pomiarowej wydrukowana została finalnie na drukarce *DaVinci M200* [22, 23] zarówno z tworzyw PLA jak i ABS.



Rys.6. Proces modelowania kształtu obudowy głowicy z wykorzystaniem oprogramowania *FreeCAD*

Poprzez dokonanie niewielkich modyfikacji w utworzonym parametrycznie modelu trójwymiarowym obudowy głowicy istnieje możliwość dostosowania go do indywidualnych preferencji operatora, np. rozmieszczenia przycisków funkcyjnych czy dopasowania do wielkości dłoni. Ponadto, przy zastosowaniu prostej transformacji lustrzanej (rys.7), obudowa głowicy może zostać wydrukowana dla osób leworęcznych.



Rys.7. Widok górnej części obudowy głowicy w wykonaniu dla osoby lewo (tworzywo ABS) i praworęcznej (tworzywo PLA)

Podsumowanie

Prezentowane rozwiązanie, dotyczące głowicy pomiarowej do badań metodą Barkhausena zintegrowanej z modulem kontrolno-sterującym, stanowi nowatorskie podejście do tego typu konstrukcji, nie mające w obecnej chwili odpowiednika. Dzięki zastosowaniu nowych technologii związanych z drukiem 3D, czy wykorzystaniem łatwo programowalnych układów mikrokontrolerów, głowicę tę można pod wieloma aspektami dostosowywać do indywidualnych potrzeb badawczych.

Na podstawie zebranych doświadczeń związanych z opracowaniem i użytkowaniem przedstawianego prototypu głowicy, opracowany został projekt jej unowocześnionej konstrukcji. Charakteryzuje się on m.in. zoptymalizowanym

kształtem w obrębie uchwytu. Sam kształt głowicy jak i szczególnie zastosowane w niej rozwiązania zostały objęte zgłoszeniem do Urzędu Patentowego RP pod numerem P441365.

Publikacja powstała w ramach realizacji prac zespołu badawczego Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów Politechniki Częstochowskiej, nr: BS/PB-200-301/ZB-202-4/2022 "Wykorzystanie technologii druku 3D w prototypowaniu aparatury do diagnostyki materiałów"

Autorzy: dr inż. Tomasz Garstka, Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Instytut Inżynierii Materiałowej, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, E-mail: tomasz.garstka@pcz.pl; dr inż. Marlena Krakowiak, Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Instytut Inżynierii Materiałowej, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, E-mail: marlena.krakowiak@pcz.pl; dr inż. Marcin Kwapisz, Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Produkcji i Technologii Materiałów, Instytut Inżynierii Materiałowej, Al. Armii Krajowej 19, 42-200 Częstochowa, E-mail: marcin.kwapisz@pcz.pl

LITERATURA

- [1] Tu Le Manh, José Alberto Pérez Benitez, José Hiram Espina Hernández, José Manuel Hallen López: Barkhausen Noise for Nondestructive Testing and Materials Characterization in Low-Carbon Steels, Woodhead Publishing, (2020), DOI:10.1016/C2018-0-00863-4
- [2] Anthony Moses, Stanisław Zurek, Sławomir Tumański, Philip Marketos, Harshad Patel: Korelacja między powierzchniowym polem magnetycznym a szumami Barkhausena w blachach o ziarnie zorientowanym, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2009), nr 1, 111-114
- [3] Ferreira da Silva S., Rodrigues Mansur T. R., Cruz J. R., Neto M. M.: The use of magnetic Barkhausen noise analysis for nondestructive determination of stresses in structural elements, (2007) International Nuclear Atlantic Conference, INAC 2007, Santos, SP, Brazil, September 30 to October 5, 2007
- [4] Roskosz, M.; Fryczowski, K.; Schabowicz, K.: Evaluation of Ferromagnetic Steel Hardness Based on an Analysis of the Barkhausen Noise Number of Events, *Materials* (2020), 13, 2059, <https://doi.org/10.3390/ma13092059>
- [5] Chukwuchekwa N, Moses A, Anderson P: Investigation of the Effects of Strips Thickness and Grain Size on AC Magnetic Barkhausen Noise of Grain-oriented Electrical Steel, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2012), nr 05a, 18
- [6] Hauk M.: Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods, Elsevier, Amsterdam, (1997)
- [7] Accuracy in Residual Stress Measurement Methods, *Metal Finishing News*, (2020) vol. 21, March issue
- [8] Jiles D. C., Kiarie W.: An integrated model of magnetic hysteresis the magnetomechanical effect and the Barkhausen effect", *IEEE Trans. Magn.*, (2021), vol. 57
- [9] Zeng, K., Tian, G., Liu, J., Gao, B., Liu, Y., Liu, Q.: Influence of Varying Tensile Stress on Domain Motion, *Materials* (2022), 15, 3399, <https://doi.org/10.3390/ma15093399>
- [10] Cizeau P, Zapperi S, Durin G, Stanley H E.: Dynamics of a ferromagnetic domain wall and the Barkhausen effect, *Phys. Rev. Lett.*, (1997), vol. 79
- [11] Garstka T.: System pomiarowy do badań właściwości wyrobów stalowych z wykorzystaniem zjawiska Barkhausena, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 12, (2008), nr 6, 58-61
- [12] Santa-Aho S. et al.: Barkhausen Noise Probes and Modelling: A Review, *Journal of Nondestructive Evaluation*, (2019), No. 94, 1-11
- [13] Garstka T.: Comparison of the Results of the Barkhausen Noise Investigations Conducted with Using Various Designs of Sensor, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93, (2017), nr 7, 27-30, 10.15199/48.2017.07.07
- [14] Boller C, Altpeter I., Dobmann G., Rabung M., Schreiber J., Szielasko K., Tschuncky R.: Electromagnetism as a means for understanding materials mechanics phenomena in magnetic materials, *Mater. Sci. Eng. Technol. (Mat.-wiss. u. Werkstofftech)*, (2011), 42, 269-278, <https://doi.org/10.1002/mawe.201100761>.
- [15] He Y., Mehdi M., Hilinski E. J., Edrissy A.: Through-process characterization of local anisotropy of nonoriented electrical steel using magnetic Barkhausen noise, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, (2018), 453, 149-162, <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.01.023>.
- [16] Rułka R.: Metoda oceny własności i stanu naprężeń materiałów ferromagnetycznych oparta na wykorzystaniu zjawiska Barkhausena, Praca doktorska, IPPT PAN, Warszawa 1980
- [17] Augustyniak B., Chmielewski M., Piotrowski L.: Assessment of residual stress in electric power turbine blades with Barkhausen effect; Proc. 6th International Conference on Barkhausen noise and micromagnetic testing, July 9-10, 2007, Valenciennes, France; Ed. Stresstech Oy, 2007, pp. 97-104
- [18] Gierczak J., Ignatowicz L. R.: Naprężenia własne w spawanych słupach skrzynekowych z kształtowników profilowanych na zimno, *Builder*, (2020), nr 1 (270), 19-23, DOI: 10.5604/01.3001.0013.6517
- [19] Garstka T, Koczurkiewicz B, Golański G.: Diagnostic examination of P265GH boiler steel plate using the Barkhausen method, *Advances in Material Sciences*, (2010), nr 10, 81-92
- [20] Gauthier J., Krause T., Atherton D.: Measurement of residual stress in steel using magnetic Barkhausen noise method, *NDT&E International*, (1998), Vol. 31, No. 1, 23-31
- [21] <https://rickkas7.github.io/DisplayGenerator/index.html>
- [22] Kwapisz M., Bajor T., Krakowiak M.: Analysis of Strength Changes of PLA Samples Made in 3D Printing Technology, 28th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2019, Brno, Czechy 22 do 24 maja (2019), Wyd. TANGER Ltd., 1583-1588, DOI: 10.37904/metal.2019.963
- [23] Kwapisz M.: Charakterystyka metod druku 3D, Inżynieria zarządzania. Cyfryzacja produkcji. Aktualności badawcze 1 (red.) KNOSALA Ryszard, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa, (2019), 67-74