

System pomiarowy do badań właściwości wyrobów stalowych z wykorzystaniem zjawiska Barkhausena

▶ Tomasz Garstka

W artykule przedstawiono opis opracowanego systemu pomiarowego, służącego do wyznaczania właściwości wyrobów walcowanych stalowych metodą magnetyczną opartą na zjawisku Barkhausena, ze szczególnym uwzględnieniem pomiaru za jej pomocą naprężeń własnych. Opisana została również istota zjawiska Barkhausena, procedura pomiaru naprężeń oraz wymagania stawiane aparaturze do jego pomiarów. Prezentowany system składa się z elektronicznej aparatury pomiarowej, w postaci przenośnego urządzenia, zawierającej moduły magnesowania, kondycjonowania i wyznaczania parametrów szumu Barkhausena oraz, współpracującej z nią poprzez kartę pomiarową, aplikacji programowej odpowiadającej za obróbkę statystyczną, wizualizację i wyświetlanie wyników pomiarów.

Rosnące wymagania w sferze kontroli jakości produkcji, dotyczą także szerokiego grona wyrobów produkowanych w przemyśle hutniczym, a zwłaszcza wyrobów walcowanych na gorąco [1]. Wymogi odnoszą się w głównej mierze do ich właściwości mechanicznych, wynikających z budowy mikrostrukturalnej wyrobu, obecności wad a także, coraz częściej, również do kontroli poziomu naprężeń własnych, wprowadzonych w procesach ich wytwarzania. Jest to szczególnie ważne dla wyrobów poddawanych w trakcie eksploatacji działaniu dużych sił i odkształceń, takich jak budowlane kształtowniki konstrukcyjne (dwuteowniki, kątowniki) czy też przeznaczonych do transportu szynowego (szyn kolejowych, obręczy kół). Istota rzeczy wynika z faktu, iż w procesie eksploatacji tych wyrobów, naprężenia własne sumują się z naprężeniami pochodzącymi od obciążeń zewnętrznych, powodując najczęściej niekorzystne obniżenie ich granicy wytrzymałości i wzrost prawdopodobieństwa ich zniszczenia [2].

Stosowanie niszczących metod badawczych pozwala jedynie na wrywkową kontrolę części produkowanych wyrobów w niewielkim ich obszarze, powodując przy tym bezpowrotne zniszczenie obiektu badań. Dlatego też, szczególne znaczenie mają nieniszczące metody pomiarowo-badawcze, pozwalające na szybką inspekcję całych partii produkowanych wyrobów. Metody te polegają zazwyczaj na pomiarze parametrów zjawisk fizycznych, których przebieg determinowany jest przez właściwości badanego materiału.

W przemyśle hutniczym, do oceny poziomu naprężeń własnych, oprócz obecnie stosowanych metod: rentgenograficznej i ultradźwiękowej, coraz częściej stosowana jest tzw. metoda Barkhausena, pozwalająca również na ocenę budowy mikrostrukturalnej stali [3, 4].

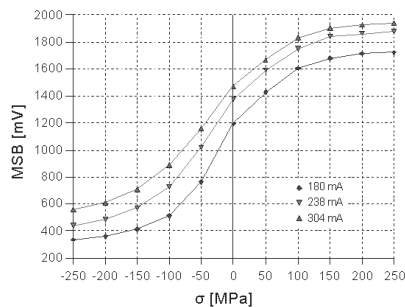
Metoda ta została nazwana na cześć H. Barkhausena, odkrywcy zjawiska fizycznego, stanowiącego jej podstawę, zachodzącego w materiałach ferromagnetycznych w trakcie ich przemagnesowywania. Pod wpływem przemiennego zewnętrznego pola magnetycznego, wytwarzanego przez elektromagnes jarzmowy, następuje cykliczna przebudowa struktury domenowej, polegająca na zmianie orientacji domen magnetycznych i skokowym przesuwaniu się ich granic (skokach Barkhausena). Przebieg tego zjawiska jest determinowany przez szereg czynników, takich jak: skład chemiczny, stan naprężeń wewnętrznych, budowa mikrostrukturalna czy też stopień namagnesowania badanego wyrobu. Skokowy charakter tego ruchu objawia się w lokalnych zaburzeniach indukcji wewnątrz badanego materiału, te zaś detekcjonowane mogą być za pomocą, zbliżonej do powierzchni materiału, cewki pomiarowej, w której indukują się impulsy napięciowe. Charakterystyczne, zawierające się w zakresie od 0,1 kHz do 100 kHz, widmo napięciowe indukujące się w cewce pomiarowej nazywane jest magnetycznym szumem Barkhausena (MSB). Sygnał ten może być scharakteryzowany przez parametry elektryczne takie jak: amplituda A_{MSB} , wartość skuteczna RMS_{MSB} , liczba impulsów Barkhausena o danej amplitudzie w jednostce czasu N_C , czy też poprzez parametry geometryczne i zależności czasowe, opisujące kształt obwiedni szumu Barkhausena.

Idea pomiaru naprężeń własnych tą metodą polega na porównaniu jednego z parametrów MSB, najczę-

dr inż. Tomasz Garstka – Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej

ściej wartości skutecznej lub liczby skoków, zmierzono w badanym wyrobie, z charakterystyką kalibracyjną, opisującą zależność tego parametru w funkcji naprężenia. Na podobnej, porównawczej zasadzie, odbywa się, z wykorzystaniem innych parametrów, wyznaczanie kolejnych właściwości, np. wielkości ziarna ferrytu czy zawartości węgla. Przykładowa rodzina charakterystyk kalibracyjnych, sporządzonych dla stali S235JRG2 i różnych wartości prądu magnesującego, służącego do wytworzenia pola magnetycznego, przedstawiona została na rys. 1. Charakterystykę taką wyznacza się zazwyczaj w próbie jednoosiowego zginania bądź rozciągania, wprowadzającego w próbkę kalibracyjnej znany stan naprężenia [5].

W ramach badań własnych, prowadzonych przez autora w Instytucie Modelowania i Automatyzacji Procesów Przeróbki Plastycznej, opracowany został kompleksowy system pomiarowy, składający się



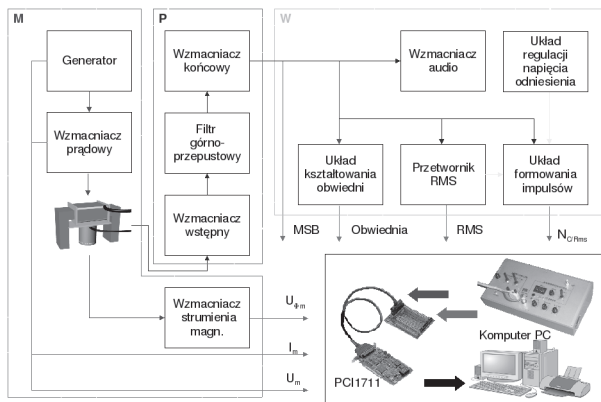
Rys. 1. Charakterystyka kalibracyjna

z elektronicznej aparatury pomiarowej [6] oraz aplikacji pomiarowej, umożliwiające pomiar parametrów MSB w celu wyznaczania na ich podstawie naprężeń własnych.

Jego pierwotnym przeznaczeniem było wykonywanie badań laboratoryjnych, jednakże z powodzeniem przeprowadzono za jego pomocą również pomiary w warunkach przemysłowych w jednej z hut.

Aparatura pomiarowa

Schemat blokowy aparatury do pomiaru parametrów MSB, przedstawiony został na rys. 2. Aparatura składa się z trzech zasadniczych części:



Rys. 2. Schemat blokowy aparatury pomiarowej

- modułu magnesowania M
- toru pomiarowego (kondycjonowania szumu Barkhausena) P
- bloku wyznaczania parametrów MSB W

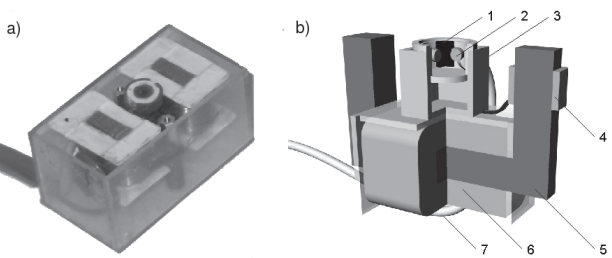
Moduł magnesowania

Zadaniem modułu magnesowania jest wytworzenie prądu o pożądanym parametrach, zasilającego uzwojenie nawinięte na jarmie magnesującym badany materiał. Moduł ten zawiera w swojej strukturze generator napięcia trójkątnego oraz wzmacniacz mocy. Układ generatora zbudowany został w klasycznym układzie: układ całkujący – komparator. Ponieważ częstotliwość przemagnesowywania, na skutek oddziaływania prądów wirowych, ma kluczowy wpływ na głębokość pomiarową, generator ma regulowaną skokowo częstotliwość, która może być ustawiona na jednym z sześciu podzakresów: 1, 3, 6, 12, 22 lub 38 Hz.

Napięcie z wyjścia generatora, poprzez 10-stopniowy układ dzielnika skokowej i płynnej regulacji napięcia, podawane jest do układu przetwornika U/I. Przetwornik ten został zbudowany na bazie scalonego wzmacniacza operacyjnego mocy, pracującego w układzie wzmacniacza mocy o cechach źródła prądowego, które dostarcza prąd do uzwojenia magnesującego głowicy pomiarowej. Pomiar wartości prądu magnesującego jest dokonywany pośrednio poprzez pomiar spadku napięcia na rezystorze odniesienia, umieszczonym w obwodzie wyjściowym szeregowo z uzwojeniem magnesującym. Maksymalny prąd wyjściowy możliwy do uzyskania wynosi co najmniej ± 1 A.

Głowice pomiarowe

Nieodłącznym składnikiem aparatury pomiarowej do wykonywania różnorodnych pomiarów metodą Barkhausena są głowice pomiarowe (rys. 3a). Spełniają one dwójaką rolę – służą bowiem do wytworzenia zmiennego pola magnetycznego w badanym materiale (rzędu kilkuset A/m) oraz do detekcji skoków Barkhausena, objawiających się fluktuacją strumienia magnetycznego na skutek skokowych zmian namagnesowania.



Rys. 3. a) Głowica pomiarowa; b) Schemat budowy głowicy pomiarowej: 1 – rdzeń cewki detekcyjnej, 2 – uzwojenie pomiarowe, 3 – obudowa ekranująca, 4 – uzwojenie kontrolne strumienia w rdzeniu, 5 – jarmo magnesujące, 6 – uzwojenie magnesujące, 7 – przewód sygnałowy

Głowica pomiarowa w klasycznej postaci składa się z rdzenia z nawiniętym uzwojeniem magnesującym oraz umieszczonym pomiędzy jego nabiegunnikami uzwojeniem pomiarowym. Niezbędnym elementem jest także dodatkowe uzwojenie pomiarowe, służące do kontroli strumienia magnetycznego w jarzmie magnesującym. Schemat budowy jednej z wykonanych głowic pomiarowych przedstawiony został na rys. 3b.

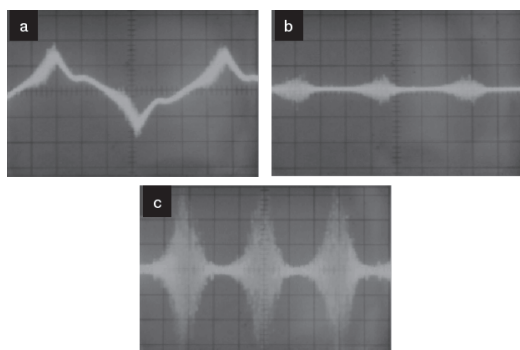
Tor pomiarowy

Zadaniem modułu pomiarowego jest kondycjonowanie, czyli wyselekcjonowanie z szumu tła i wzmocnienie użytecznego sygnału napięciowego szumu Barkhausena indukowanego w uzwojeniu pomiarowym cewki detekcyjnej, który jest rzędu kilku mikrowoltów. W tym torze jest wymagane wysokie wzmocnienie, z jednoczesnym zachowaniem odpowiedniego przebiegu kształtu charakterystyki i szerokości pasma przenoszenia.

Najwyższe wymagania są stawiane pierwszemu stopniowi wzmacniającemu. Na jego wejście, z cewki pomiarowej, podawany jest bowiem silnie zaszumiony sygnał, zawierający w swym widmie zarówno szum napięciowy Barkhausena, szumy cieplne uzwojenia detekcyjnego, zakłócenia o częstotliwościach: sieciowej 50 Hz i jej harmonicznym, jak i składowe prądu magnesującego.

Aby zniwelować wszystkie niepożądane zakłócenia pojawiające się na zaciskach przewodów doprowadzających sygnał z cewki detekcyjnej, a jednocześnie zapewnić wzmocnienie rzędu kilkudziesięciu dB, dla sygnału użytecznego, w pierwszym stopniu zastosowano specjalizowany wzmacniacz pomiarowy. Umożliwia on skokową regulację wzmocnienia w zakresie od 55 dB do 80 dB. Oscylogram sygnału na jego wyjściu pokazano na rys. 4a.

Jak można zauważyć, w sygnale tym dominuje składowa prądu magnesującego, z nałożonym w okolicach jej szczytów, niewielkim szumem Barkhausena. Składowa ta, jak również zakłócenia o częstotliwości sieciowej, są eliminowane w filtrze górnoprzepustowym II rzędu, o częstotliwości granicznej 1 kHz.



Rys. 4. Oscylogramy w charakterystycznych punktach toru pomiarowego: a) sygnał na wyjściu wzmacniacza wstępnego, 0,2 V/dz.; b) sygnał na wyjściu filtra górnoprzepustowego, 0,2 V/dz.; c) sygnał na wyjściu toru pomiarowego, 0,5 V/dz.

Odfiltrowany szum Barkhausena (rys. 4b), z racji małej amplitudy, wymaga dodatkowego wzmocnienia. Jest ono realizowane w dodatkowym wzmacniaczu końcowym, umożliwiającym wybór jednej z sześciu wartości wzmocnienia, w zakresie od 0 dB do 40 dB.

Blok wyznaczania parametrów MSB

Wyselekcjonowany i wzmocniony sygnał MSB (rys. 4c) przetwarzany jest następnie w bloku wyznaczającym jego parametry, składającym się z następujących modułów:

- wyznaczania obwiedni i amplitudy MSB w układzie z detektorem jednopółprzewodnikowym z regulacją stałej czasowej
- wyznaczania wartości skutecznej MSB za pomocą scalonego przetwornika *TrueRMS*
- kształtowania impulsów TTL odpowiadających pojedynczym skokom Barkhausena o określonej amplitudzie. W bloku tym ciąg skoków Barkhausena tworzących MSB porównywany jest w komparatorze z napięciem odniesienia U_{REF} wytwarzanym w 4-bitowym przetworniku C/A (parametr N_C) lub też z wartością skuteczną tegoż szumu z przetwornika RMS (parametr N_{RMS}). Zliczanie liczby skoków odbywa się po stronie aplikacji pomiarowej.

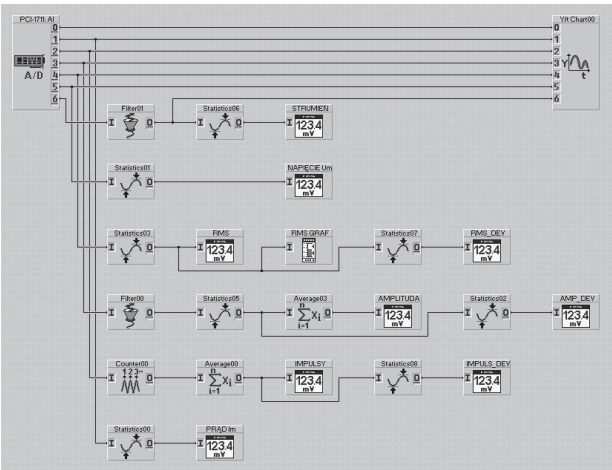
Uzupełnieniem aparatury jest moduł foniczny, będący wzmacniaczem akustycznym m.cz., za pomocą którego możliwy jest odsłuch szumu Barkhausena w głośniku.

Oprogramowanie pomiarowe

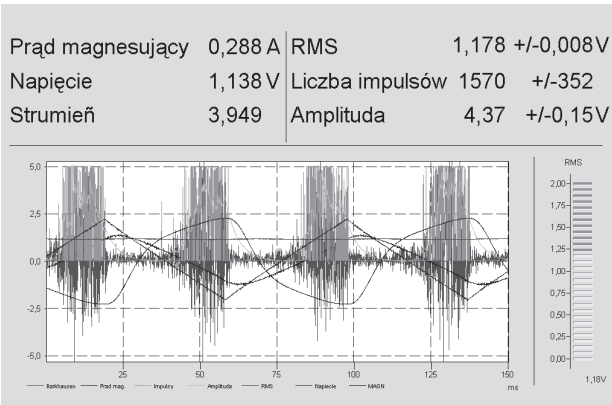
Wyznaczone przez aparaturę pomiarową wyniki pomiarów parametrów MSB oraz parametrów magnesowania wyprowadzono na złącze w postaci listwy zaciskowej, umieszczonej na zewnątrz obudowy, oraz na złącze SCSI, umożliwiające bezpośrednie podłączenie urządzenia do karty pomiarowej, gdzie są akwizycjonowane a następnie przetwarzane i analizowane przez aplikację pomiarową, zrealizowaną w programie DasyLab 7.0E.

Ponieważ wyznaczanie wszystkich parametrów, oprócz zliczania ilości skoków Barkhausena, odbywa się po stronie aparatury pomiarowej, nie ma konieczności stosowania wysokich częstotliwości próbkowania. Możliwe było zatem zastosowanie taniej karty pomiarowej PCI1711 o częstotliwości próbkowania 100 kHz, co przy wykorzystaniu 7 kanałów karty przetwornika AC, daje realną częstotliwość próbkowania 14 kHz/kanał. Ponadto takie rozwiązanie uniezależnia, w dużej mierze, pracę urządzenia pomiarowego od posiadanego sprzętu i oprogramowania pomiarowego.

Na rys. 5 pokazano warstwę narzędziową aplikacji pomiarowej. Oprócz standardowych modułów służących do wyświetlania i wizualizacji wyników, w torach przetwarzania poszczególnych sygnałów znajdują się bloki realizujące operacje matematyczne uśredniania i przetwarzania statystycznego wyników.



Rys. 5. Warstwa narzędziowa aplikacji pomiarowej



Rys. 6. Interfejs użytkownika aplikacji pomiarowej

Zastosowanie tych zabiegów pozwoliło na znaczną poprawę dokładności wyznaczania parametrów MSB. Na rys. 6 pokazano warstwę zewnętrzną oprogramowania pomiarowego stanowiącą podstawowy interfejs użytkownika, służący do odczytywania mierzonych parametrów. Po lewej stronie ekranu wyświetlane są uśrednione wartości wielkości związanych z parametrami magnesowania. Po prawej stronie znajdują się pola odczytowe parametrów MSB. Ponadto wyświetlane są wartości odchylenia standardowego mierzonych parametrów. Wartość RMS_{MSB} przedstawiana jest dodatkowo w postaci graficznej za pomocą bargrafu, co ułatwia wykonywanie pomiarów w warunkach przemysłowych. W oknie interfejsu wyświetlane są również przebiegi mierzonych parametrów, co z kolei niezbędne jest przy naukowych badaniach laboratoryjnych.

Podsumowanie

Przedstawiony w pracy system pomiarowy stanowi część kompleksowego systemu pomiarowo-obliczeniowego naprężeń własnych w wyrobach hutniczych, w skład którego wchodzi również programy obliczające wartości tych naprężeń na podstawie parametrów MSB mierzonych przez system. Opracowana aparatura pomiarowa, wyróżnia się na tle innych tego typu konstrukcji tym, iż umożliwia jako

pierwsza wyznaczanie, dotychczas nie stosowanego parametru N_{RMS} , pozwalającego na szersze charakteryzowanie mikrostruktury badanych wyrobów.

Bibliografia

- 1. A. Miernik: *Naprężenia własne w wyrobach walcowanych*. 11 Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów” Zakopane 2003.
- 2. Z. Orłoś i inni: *Doświadczalna analiza odkształceń i naprężeń*. Wyd. PWN, Warszawa 1977.
- 3. B. Augustyniak: *Zjawiska magnetoelastyczne i ich wykorzystanie w nieniszczących badaniach materiałów*. Wyd. PG., Gdańsk 2003.
- 4. T. Garstka: *Wyznaczanie właściwości wyrobów przerabianych plastycznie przy użyciu metody efektu Barkhausena*. IV Symp. „Automatyzacja Produkcji. Nauka – Wiedza – Innowacje”, Wrocław 2003.
- 5. T. Garstka, K. Jagiela: *Testing of the stress state by Barkhausen method at different measurement parameters*. XI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Maszynostrojenie i technosfera XXI wieku” Donietsk Ukraina, 2004.
- 6. T. Garstka: *The complex system for residual stress determination based on Barkhausen noise measurement*. 5th Int. Conf. on Barkhausen Noise and Micromagnetic Testing, Petten, Holandia, 2005. ■