

Procedura badania PB01 stanu naprężenia w elementach stalowych z wykorzystaniem efektu Barkhausena

Test procedure PB01 of stress state evaluation in steel elements using Barkhausen effect

Streszczenie

Przedstawiamy syntetyczny opis pierwszej w Polsce procedury badania o nazwie PB01, która dotyczy badania stanu naprężenia w elementach stalowych z wykorzystaniem efektu Barkhausena. Procedura ta została opracowana przez firmę NNT sp. z o.o. i uzyskała uznanie przez Polski Rejestr Statków w styczniu 2017 r.

Słowa kluczowe: stan naprężenia; stale; efekt Barkhausena; procedura badania

Abstract

There is presented synthetic description of the first in Poland test procedure labelled as PB01 which allows stress state evaluation in steel elements using Barkhausen effect. This test procedure was elaborated by NNT Ltd. company and had been approved by Polski Rejestr Statków in January 2017.

Keywords: stress state; steels; Barkhausen effect; test procedure

Wstęp

Wyznaczanie w sposób nieniszczący poziomu naprężenia w stalowych elementach konstrukcji to zagadnienie o wyjątkowo dużym znaczeniu technicznym i ekonomicznym. W przypadku elementów wykonanych ze stali o właściwościach ferromagnetycznych atrakcyjne i uzasadnione merytorycznie jest zastosowanie metody czy też procedury badania, która bazuje na efekcie Barkhausena (EB). Badania nad tym zagadnieniem autor niniejszego komunikatu rozpoczął w połowie lat 90. [1,2]. Badanie zjawisk magnetostrykcyjnych – bazy dla wykorzystania efektu Barkhausena dla potrzeb diagnostyki stanu naprężenia, zaowocowały monografią [3]. Decydujące znaczenie dla rozwoju metody badania z użyciem EB miało zrealizowanie projektu badawczego NCBiR pt. Opracowanie magnetycznej metody oceny w materiałach konstrukcyjnych zwłaszcza anizotropowych [4]. W projekcie tym przeprowadzono badania komplementarne wykorzystując obok efektu Barkhausena także metodę Mathara, dyfrakcji promieni X (XRD) oraz cyfrowej analizy obrazu (DIC). Opracowano wówczas innowacyjną sondę EB, która automatycznie zmienia kierunek magnesowania [5]. Niniejszy komunikat zawiera syntetyczny opis pierwszej w Polsce procedury badania o nazwie „Nieniszcząca metoda wyznaczania stanu naprężenia w elementach stalowych z wykorzystaniem efektu Barkhausena” i numerze PB01,

która wypełnia oczywistą lukę w krajowej diagnostyce. Procedura ta została opracowana przez firmę NNT sp. z o.o. i uzyskała uznanie przez Polski Rejestr Statków w styczniu 2017 r. [6].

Podstawowe informacje o procedurze

Procedura PB01 dotyczy nieniszczącej metody wyznaczania stanu naprężenia w elementach stalowych o właściwościach ferromagnetycznych z wykorzystaniem efektu Barkhausena (EB). Stan naprężenia wylicza się z wyznaczonego z wartości natężenia EB stanu odkształcenia, wykorzystując do tego wyznaczoną podczas kalibracji relację między natężeniem EB i stanem odkształcenia. Treść istotna procedury zawarta jest w dokumencie głównym pt. Procedura badania nr PB01, natomiast informacje szczegółowe są przedstawione w ośmiu załącznikach:

- PB01-Z1 Podstawy fizyczne EB i zależność natężenia EB od stanu naprężenia;
- PB01-Z2 Schemat blokowy standardowego układu pomiarowego EB i zasada działania;
- PB01-Z3 Metodyka ustalenia warunków początkowych badania;

Dr hab. Bolesław Augustyniak – NNT sp. z o.o.

Autor korespondencyjny/Corresponding author: boleslaw.augustyniak@nntlab.com

- PB01-Z4 Zasady procedury kalibracji dla materiału izotropowego i anizotropowego;
- PB01-Z5 Wyznaczanie stanu naprężenia dla materiału izotropowego;
- PB01-Z6 Wyznaczanie stanu naprężenia dla materiału anizotropowego;
- PB01_Z7 Spis skrótów i symboli występujących w Procedurze PB01;
- PB01_Z8 Wzór Raportu z wyników badania stanu naprężenia.

W dokumencie głównym przedstawiono kolejno: definicje użytych w procedurze PB01 podstawowych pojęć i wielkości oraz pięć kolejnych etapów badania.

Podstawowe definicje

Trzy podstawowe co do znaczenia dla tej procedury badania pojęcia to 'stan naprężenia' oraz 'efekt Barkhausena' i 'natężenie efektu Barkhausena'. Stan naprężenia (SN) to termin oznaczający naprężenie występujące w warstwie powierzchniowej elementu stalowego. Zakłada się, że w tej warstwie naprężenie jest jednorodne po głębokości i opisane jest jednoznacznie za pomocą trzech wielkości: wartości dwóch składowych głównych (σ_1 i σ_2) oraz kąta α pomiędzy kierunkiem składowej głównej σ_1 a kierunkiem przyjętej osi x układu współrzędnych. Stan naprężenia jest wyznaczany ze stanu odkształcenia na podstawie zależności opisujących tę relację dla przypadku płaskiego stanu naprężenia. Efekt Barkhausena (EB) to zjawisko fizyczne polegające na indukowaniu w cewce detekcyjnej zbliżonej do powierzchni magnesowanego ferromagnetyka ciągu impulsów napięcia (sygnał napięciowy U_s). EB skojarzony jest ze skokowym ruchem granicy domenowej (GD), która odkotwicza się od defektów mikrostruktury w trakcie magnesowania. Natężenie efektu Barkhausena (NEB) oznacza wielkość fizyczną użytą do ilościowego określenia intensywności impulsów napięciowych EB. Wielkość ta ma mieć reprezentację w postaci napięcia typu DC (wartość niezmienna w czasie). W procedurze PB01 podstawową miarą NEB jest uśrednione dla wielu cykli magnesowania napięcie skuteczne U_s ze wzmacnionego i odfiltrowanego sygnału napięciowego U_0 . Należy też dodać, że pomiary NEB wykonywane są za pomocą tak zwanego standardowego układu pomiarowego (SUP). Układ ten składa się z: sondy pomiarowej (SP), generatora prądu (GP) magnesowania oraz analizatora sygnału (AS), który wyznacza napięcie skuteczne U_s z sygnału napięciowego U_0 . Wielkość U_s może być skorygowana tak, aby odjąć zakłócenia napięciowe występujące w torze pomiarowym AS. Korekcja ta dostarcza napięcia skutecznego U . Poniżej są opisane kolejne etapy badania z PB01.

Etapy badania procedury PB01

1. Ustalenie warunków początkowych badania

- Ustalenie warunków początkowych wykonywane jest zgodnie z zaleceniami opisanymi w PB01-Z3. Należy kolejno:
- przeprowadzić kontrolę działania i dobór nastaw układu pomiarowego SUP oraz korektę sygnału U_s wykorzystując próbkę wzorcową PW0;
 - umieścić punkt pomiarowy na obiekcie badanym (wypełniając wymogi wynikające z geometrii sondy pomiarowej SP – gwarantując poprawny kontakt części magnesyjnej i pomiarowej głowicy pomiarowej);
 - przygotować do badania powierzchnię danego obiektu. Powierzchnia badana nie powinna zawierać powłok malarskich ani też rdzy i zendry. Usunięcie tych warstw

nie powinno wprowadzać naprężeń resztkowych. Końcowym etapem przygotowania powierzchni powinno być szlifowanie oscylacyjne papierem ściernym o gradacji powyżej 100.

2. Procedura wykonania i rejestracji pomiarów NEB

Pomiar NEB na obiekcie w danym miejscu wykonywany jest co najmniej dla dwóch kierunków magnesowania (materiał izotropowy). Kierunki te powinny odpowiadać odpowiednio wartości największej i najmniejszej NEB. W przypadku materiału anizotropowego magnetycznie należy wykonać pomiary rozkładu kąтового NEB uwzględniając kąt magnesowania β względem kierunku osi anizotropii magnetycznej. Należy przyjąć, że kąt $\beta=0$ odpowiada kierunkowi magnesowania wzdłuż głównej osi anizotropii (kierunek łatwego magnesowania). Wyniki pomiarów NEB są rejestrowane w postaci arkusza (macierzy) dla każdego punktu pomiarowego z podaniem: nazwy obszaru, numeru punktu, współrzędnych punktu (x_i, y_i), kierunku magnesowania (oś x lub oś y , które przyjęte są umownie np. względem osi spoiny) a dla materiału anizotropowego – kąta magnesowania β względem kierunku osi anizotropii magnetycznej i wreszcie wartość NEB. W przypadku badania NEB w wielu punktach leżących wzdłuż założonej linii, wyniki badania należy zapisywać w postaci arkusza zawierającego także informacje o kolejności lub współrzędnych kolejnego punktu.

3. Procedura wykonania i rejestracji pomiarów NEB podczas kalibracji

Pomiar NEB podczas kalibracji wykonywany jest na próbce kalibracyjnej (PKI). Zasady wykonywania kalibracji jednoosiowej oraz kalibracji dwuosiowej podane są w załączniku PB01_Z4. Kalibracja polega na badaniu natężenia EB w funkcji zadanego poziomu odkształcenia ϵ dla próbki kalibracyjnej. Próbka ta ma kształt belki prostopadłościowej (kalibracja jednoosiowa) lub krzyża (kalibracja dwuosiowa). Odkształcenie zadawane jest metodą ugięcia próbki. Wyniki pomiarów NEB są rejestrowane w postaci arkusza (macierzy) dla każdego stanu odkształcenia z podaniem: nazwy próbki kalibracyjnej, poziomu odkształcenia ϵ_x dla kalibracji jednoosiowej (lub poziomów odkształceń ϵ_x i ϵ_y dla kalibracji dwuosiowej), natężenie EB dla kierunku x (dla kalibracji jednoosiowej) lub wartości natężenia EB dla kierunków x i y dla kalibracji dwuosiowej. UWAGA: Wartości natężenia EB to wartości napięcia U_s (bez korekty na zakłócenia) lub wartości napięcia U , które są wyliczone z U_s po korekcie na zakłócenia układu pomiarowego. Preferowane jest używanie napięcia U jako miary NEB.

4. Wyliczenie poziomu odkształcenia i naprężenia

W przypadku materiału izotropowego poziom odkształcenia ϵ wyznacza się dla znanej wartości natężenia efektu Barkhausena (NEB) zmierzonej w danym punkcie i w zadanym kierunku, wykorzystując funkcję odwrotną (FO) typu $\epsilon=F(X)$. Funkcja odwrotna FO utworzona jest z wyników procedury kalibracji. Zmienna X w tej funkcji to wartość ilorazu wartości NEB (np. U) zmierzonego dla nieznanego stanu odkształcenia i wartości NEB przyjętej dla stanu nieodkształconego. W przypadku materiału izotropowego kierunek osi głównej odkształcenia pokrywa się z kierunkiem magnesowania, dla którego uzyskano największą wartość NEB. Tym samym największy wynik NEB zmierzony pod pewnym kątem wyznacza dla danego punktu składową główną ϵ_1 odkształcenia i odpowiednio drugi wynik – zmierzony dla kierunku prostopadłego – składową ϵ_2 odkształcenia w tym punkcie. Stan naprężenia (składowe główne i ich kierunki) wylicza się z wartości składowych głównych odkształceń zgodnie ze znanymi w mechanice związkami między stanem

odkształcenia a stanem naprężenia, zakładając występowanie płaskiego stanu naprężeń. Sposób wyliczania poziomu odkształcenia i wynikającego z tego stanu naprężenia dla materiału izotropowego opisany jest w załączniku PB01_Z5.

W przypadku materiału anizotropowego z pomiarów rozkładów kątowych natężenia EB (zorientowanych względem kierunków osi głównej anizotropii magnetycznej) wyznacza się rozkład kątowy odkształcenia. Rozkład kątowy odkształcenia służy do wyznaczenia składowych odkształceń względem osi anizotropii oraz kąta osi głównej elipsoidy opisującej ten rozkład kątowy odkształceń. Znając obie składowe i kąt elipsoidy odkształceń wyznacza się wartości

składowych głównych naprężeń. Kierunek osi głównej naprężeń jest tożsamy z kierunkiem osi elipsoidy odkształceń. Szczegóły tej procedury zawarte są w załączniku PB01_Z6.

5. Raport z wyników badania stanu naprężenia

Zestawienie wyników badania stanu naprężenia ma formę raportu, w którym zawarte są informacje o: nazwie obszaru badanego, sposobie przygotowania powierzchni, typie i numerze seryjnym miernika użytego do pomiaru EB oraz tabelę z wartościami składowych σ_1 , σ_2 i kąta α . Na życzenie zleceńodawcy raport może zawierać mapy rozkładu przestrzennego obu składowych naprężeń. Wzór Raportu z wyników badania stanu naprężenia zawarto w załączniku PB01_Z8.

Podsumowanie

Opisana wyżej procedura badania PB01 usystematyzowała po raz pierwszy zasady pomiaru natężenia efektu Barkhousena dla potrzeb diagnostyki stanu naprężenia. Opracowana procedura może być zastosowana dla wszelkiego typu elementów maszyn i konstrukcji czy też instalacji o praktycznie dowolnej geometrii (powierzchnie płaskie lub zakrzywione, pręty i wałki) i grubości (dolna granica grubości to ok. 0,5 mm). Czas badania dla jednego punktu pomiarowego nie przekracza kilku sekund. Procedurę tę można wykorzystywać powszechnie dla prewencyjnego zbadania stanu naprężenia, które wynika z obciążeń mechanicznych czy też jest skutkiem zastosowanej obróbki cieplno-mechanicznej (spawanie, deformacja plastyczna, itd.). Badanie stanu naprężenia jest szczególnie zasadne wówczas, gdy przyspiesza ono degradację mikrostruktury czy też stymuluje rozwój mikro i makropęknięć. Procedura ta jest teraz wykorzystywana formalnie do badania urządzeń, które podlegają dozorowi Polskiego Rejestru Statków. Podjęte są też odpowiednie działania, aby analogiczną procedurę uznał Urząd Dozoru Technicznego oraz inne towarzystwa notyfikujące.

Literatura

- [1] Augustyniak B., Chmielewski M., Kiełczyński W.: Nowa metoda pomiaru naprężeń pozostających w złączach spawanych za pomocą efektu Barkhousena, w: [Materiały] XXIV Krajowa Konferencja Badań Nieniszczących, Poznań-Kiekrz 24-26.10.1995, PTBNiDT, SIMP. s. 9-17.
- [2] Sablik M.J., Augustyniak B.: The effect of mechanical stress on a Barkhausen noise signal integrated across a cycle ramped magnetic field, J. Appl. Phys. 79 (2) 1996, pp. 963-972.
- [3] Augustyniak B.: Zjawiska magnetosprężyste i ich wykorzystanie w niszczących badaniach materiałów, Monografia 38, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2003. s. 193.
- [4] Projekt NCBiR nr PBS1/A9/14/2012 pt. Opracowanie magnetycznej metody oceny stanu naprężeń w materiałach konstrukcyjnych zwłaszcza anizotropowych, Politechnika Gdańska, 2012-2014.
- [5] Augustyniak B., Chmielewski M., Piotrowski L., Kiełczyński W., Prokop K., Kukla D.: Pomiar naprężeń własnych metodą Barkhousena za pomocą sondy z wirującym polem magnetycznym, ENERGETYKA, Vol.11, s. 641-643, 2014.
- [6] Świadectwo Uznania PRS nr TT/821/710405/17, Gdańsk, 2017r