

Stan rozwoju metody diagnozowania materiałów z wykorzystaniem efektu emisji magnetoakustycznej

Recent development in material state evaluation with the use of magnetoacoustic emission effect measurements

Streszczenie

Zjawisko emisji magnetoakustycznej polega na generacji dźwięku na skutek ruchu granic domenowych (nie 180°) w materiałach o niezerowej magnetostrykcji. Zaprezentowano aktualny stan wiedzy odnośnie do możliwości zastosowania efektu emisji magnetoakustycznej (EMA) do diagnozowania, w sposób nieniszczący, stanu materiałów konstrukcyjnych. Omówiono problemy związane z metodyką pomiaru, ze szczególnym uwzględnieniem pomiarów w warunkach przemysłowych oraz przedstawiono metody umożliwiające uzyskanie użytecznych sygnałów w tych warunkach.

Przedstawiono szerokie spektrum możliwych zastosowań pomiarów natężenia sygnału EMA: badanie stopnia degradacji materiałów eksploatowanych w energetyce, diagnozowanie stopnia deformacji plastycznej, ocenę jakości obróbki cieplnej oraz możliwość analizy zmian struktury domenowej w stalach elektrotechnicznych wywołanych naprężeniami.

Abstract

Magnetoacoustic emission signal is generated by the movement of non 180° domain walls in materials with non-zero magnetostriction. The paper presents the up to date state of knowledge concerning the possibility of application of the magnetoacoustic emission (MAE) for diagnosing, in a nondestructive way, the state of engineering materials. The paper discusses the possible complications connected with the measurements with special attention paid to measurements in the industrial environment. It also presents the methods enabling reliable measurements in such conditions.

The wide range of possible application of the MAE signal measurements is discussed: monitoring of the degradation processes in the materials exploited in power plants, determination of the plastic deformation level, heat treatment quality assessment and in addition to that the possibility to analyze the changes in the magnetic domain structure in electrical steels resulting from elastic stresses application.

Wstęp

Diagnozowanie stanu materiału stanowi bardzo istotne zagadnienie z punktu widzenia możliwości zapewnienia bezawaryjnej pracy wszelkiego rodzaju

urządzeń i konstrukcji przemysłowych. Wśród metod diagnostycznych szczególne znaczenie mają metody nieniszczące, a dla materiałów ferromagnetycznych (większość gatunków stali, z wyjątkiem stali austenitycznych) metody oparte na pomiarze zmian właściwości magnetosprężystych. Najbardziej znanym efektem tego typu jest efekt Barkhausena (EB) polegający na indukowaniu się impulsów napięciowych w cewce detekcyjnej zbliżonej do powierzchni przemagnesowywanego materiału. Zmiany te są wynikiem skokowych zmian położenia granic domenowych we wnętrzu ferromagnetyka, którym towarzyszy skokowa zmiana namagnesowania

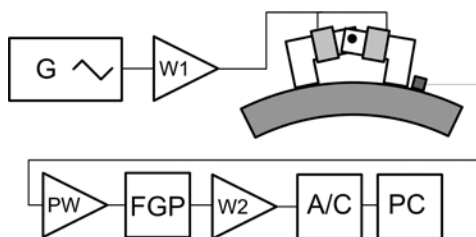
Dr Leszek Piotrowski, dr hab. Bolesław Augustyniak, dr Marek Chmielewski – Politechnika Gdańska.

materiału oraz strumienia magnetycznego obejmowanego przez cewkę detekcyjną. Sygnał efektu Barkhausena składa się z impulsów elektromagnetycznych, które są niestety silnie tłumione w materiałach przewodzących, jakimi są metale, co ogranicza możliwość jego detekcji do głębokości rzędu milimetra. Wady tej pozbawiony jest sygnał akustyczny generowany podczas skokowej zmiany objętości materiału ferromagnetycznego o niezerowej magnetostrykcji wywołanej przemieszczaniem się nie 180° granic domenowych. Zjawisko to, znane od połowy lat 70 ub.w., nosi nazwę emisji magnetoakustycznej (EMA) [1]. W początkowym okresie było ono intensywnie badane pod kątem możliwości zastosowania w dziedzinie badań nieniszczących [2÷3]. Z uwagi jednak na problemy metrologiczne związane z pomiarami, w sposób powtarzalny, bardzo słabych sygnałów zainteresowanie to znacząco osłabło. Postęp w dziedzinie wytwarzania niskoszumowych układów wzmacniających, przetworników piezoelektrycznych oraz, przede wszystkim, w dziedzinie cyfrowego przetwarzania sygnałów pozwolił na pokonanie większości problemów związanych z możliwością zastosowania metody opartej na efekcie EMA w warunkach przemysłowych. Przyczyniły się do tego w dużej mierze prace prowadzone w Katedrze Fizyki Ciała Stałego Politechniki Gdańskiej.

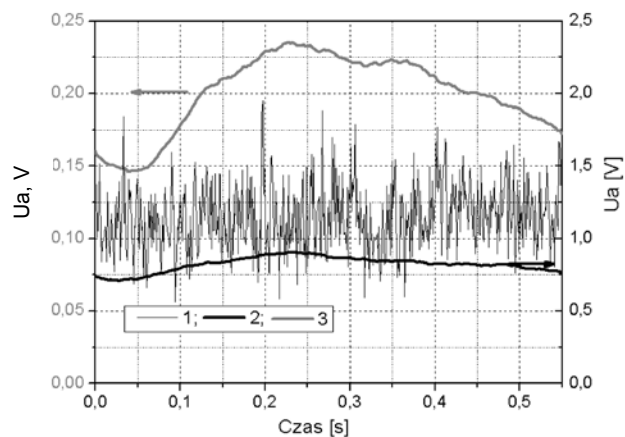
Metodyka pomiaru

Przykładową konfigurację układu do pomiaru EMA przedstawiono na rysunku 1. Sygnał z generatora sygnału o przebiegu trójkątnym (G) podawany jest przez wzmacniacz prądowy (W1) na element magnesujący którym może być elektromagnes (jak na rysunku) lub też cewka obwodowa w której umieszcza się badaną próbkę (typowa konfiguracja laboratoryjna). Sygnał EMA mierzony za pomocą przetwornika piezoelektrycznego podawany jest na przedwzmacniacz (PW). W zależności od potrzeb (np. w wypadku dużego natężenia szumów akustycznych) sygnał ten może być poddany filtracji z wykorzystaniem analogowych filtrów górnoprzepustowych (FGP), a następnie ponownie wzmacniony (W2) (sumaryczne wzmacnienie jest rzędu 100÷120 dB). Wzmocniony sygnał podawany jest na przetwornik analogowo – cyfrowy (A/C) i rejestrowany na komputerze (PC).

O ile pomiar sygnału EMA w warunkach laboratoryjnych nie nastęrcza obecnie trudności, o tyle w warunkach przemysłowych wymagana jest często dalsza

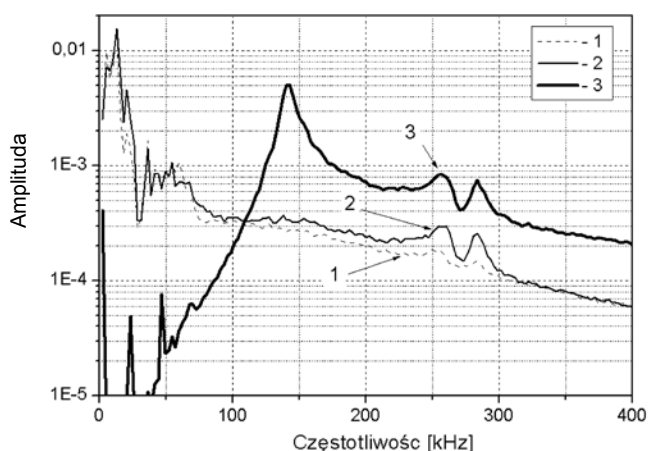


Rys. 1. Układ pomiarowy EMA
Fig. 1. MAE measurement system



Rys. 2. Sygnały zmierzone w warunkach przemysłowych: 1 – sygnał bez filtracji, 2 – sygnał po filtracji analogowej, 3 – sygnał po filtracji analogowej i cyfrowej

Fig. 2. The measured signals in industrial environments: 1 – signal without filtration, 2 – signal after analog filtering, 3 – signal after analog and digital filtering

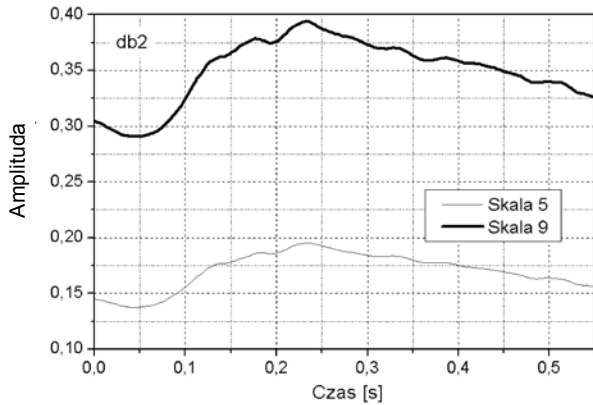


Rys. 3. Widma FFT mierzonych sygnałów: 1 – szumy tła, 2 – sygnał EMA bez filtracji, 3 – sygnał po filtracji analogowej

Fig. 3. FFT spectra of the measured signals 1 – background noise, 2 – MAE signal without filtration, 3 – signal after analog filtering

cyfrowa obróbka sygnału [4]. Przykładowy wynik pomiaru uzyskany w trakcie badań rurociągu przedstawiono na rysunku 2 (wykres 1), pomiary były prowadzone podczas trwania akcji remontowej i w wyniku pomiaru uzyskano sygnał niemalże nieróżniący się od szumu tła. Badania prowadzone wcześniej w warunkach laboratoryjnych pozwoliły jednak stwierdzić, że w widmie szumów wywołanych w sposób mechaniczny (szlifowanie, piłowanie itp.) dominują składowe niskoczęstotliwościowe (do 50 kHz), natomiast widmo sygnału EMA dla badanych stali sięga zakresu 300 kHz. Na rysunku 3 przedstawiono widmo sygnału tła (wykres 1) oraz sygnału EMA (wykres 2). Jak widać sygnały te różnią się znacząco w zakresie częstotliwości 240÷300 kHz, co pozwala na zastosowanie cyfrowego filtrowania sygnału (z wykorzystaniem programu pomiarowego pracującego w środowisku LabView) i uzyskanie sygnału EMA o mierzalnym natężeniu.

Innym sposobem na uzyskanie mierzalnego sygnału jest zastosowanie górnoprzepustowych filtrów analogowych – sygnał uzyskany w ten sposób przedstawiono na rysunku 2 (wykres 2), a jego widmo na



Rys. 4. Współczynniki falkowe wyliczone dla mierzonego sygnału z wykorzystaniem falki z rodziny Daubechies (db2)
Fig. 4. Wavelet coefficients calculated for the measured signal using Daubechies family wavelets (db2)

rysunku 3 (wykres 3). Jak widać, uzyskano charakterystyczny kształt sygnału EMA (szerokie maksimum typowe dla elementów grubościennych), jednakże stosunek sygnału do szumu nie był w pełni zadowalający. W tej sytuacji zmierzony sygnał poddano cyfrowej filtracji (pozostawiono jedynie składowe z zakresu 240+300 kHz) i uzyskano sygnał przedstawiony na wykresie 3 (rys. 2), z którego widać, że natężenie sygnału spadło, ale stosunek sygnał/szum uległ znacznej poprawie.

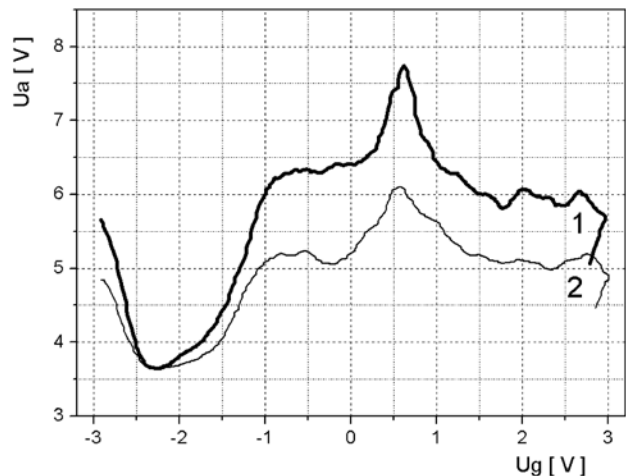
Cyfrowa filtracja sygnału, o której mowa powyżej, polegała na wyliczeniu transformaty FFT, obcięciu jej pasma i odtworzeniu (transformata odwrotna) sygnału. Transformata Fouriera nie jest jednak narzędziem idealnym do analizy sygnałów szumowych, lepsze rezultaty daje często zastosowanie transformaty falkowej, w której nie dokonuje się dekompozycji na składowe sinusoidalnie zmienne a na tzw. falki, czyli sygnały krótkookresowe o przebiegu zbliżonym do rejestrowanych impulsów. Wyniki zastosowania takiej transformaty do mierzonego sygnału przedstawiono na rysunku 4, na którym wykreślono wartości parametru falkowego dla skali 5 i 9 (skala określa czas trwania falki, którą wykorzystuje się w dekompozycji sygnału – im wyższa skala, tym mniejsza zmienność czasowa falki). Zaletą tego typu analizy jest to, że nie trzeba wyznaczać transformaty odwrotnej, gdyż sam przebieg zmian parametru falkowego odzwierciedla przebieg zmian natężenia sygnału EMA. Wyznaczanie transformaty falkowej dla dużego zakresu skal jest na ogół czasochłonne, jednak jak wykazały badania wystarczające jest wyznaczenie wartości parametrów falkowych dla niskich skal, co znacząco przyspiesza proces.

Zastosowania praktyczne zjawiska emisji magnetoakustycznej

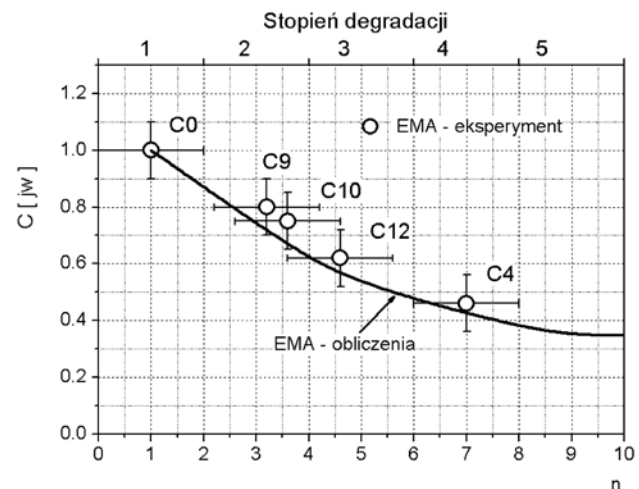
Pomiary stopnia degradacji materiałów eksploatowanych w energetyce

Przykładowe sygnały emisji magnetoakustycznej zmierzone na wycinkach rur z przegrzewaczy pary

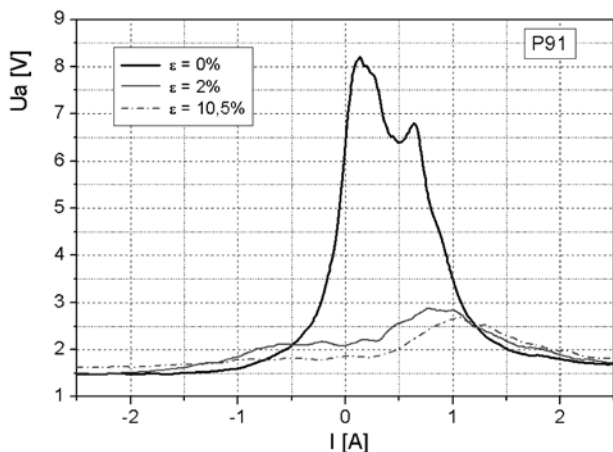
wykonanych ze stali 10H2M przedstawiono na rysunku 5. Wykres 1 przedstawia sygnał zmierzony dla próbki w stanie dostawy, natomiast wykres 2 dla próbki o średnim stopniu wyeksploatowania. Natężenie sygnału uległo znaczącemu zmniejszeniu. Spadek sygnału EMA wraz ze wzrostem stopnia degradacji obserwowano także dla stali T22 (amerykański odpowiednik stali 10H2M), jak również dla stali 15HM oraz 13HMF. Wynika on z przebudowy struktury wydzieleniowej w materiale, zwłaszcza na granicach ziaren ferrytu. Dzieje się tak, ponieważ to właśnie na granicach ziaren tworzą się domeny domykające, które mają granice nie 180° i wszelkie modyfikacje rozmiarów wydzieleni w tych obszarach znacząco wpływają na proces kotwiczenia tego rodzaju granic domenowych. Do ilościowego charakteryzowania zmian natężenia sygnału EMA wywołanych procesem degradacji wygodnie jest wykorzystać parametr będący całką (C) z obwiedni sygnału EMA po półokresie. Parametr ten jest znacznie mniej wrażliwy na zakłócenia niż wartość maksymalna napięcia na wyjściu przetwornika EMA. Wykres zmian wartości



Rys. 5. Sygnały EMA zmierzone dla próbek ze stali 10H2M: 1 – w stanie dostawy, 2 – o średnim stopniu degradacji
Fig. 5. MAE signals measured for samples of 10H2M steel: 1 – as supplied, 2 – with an average degree of degradation

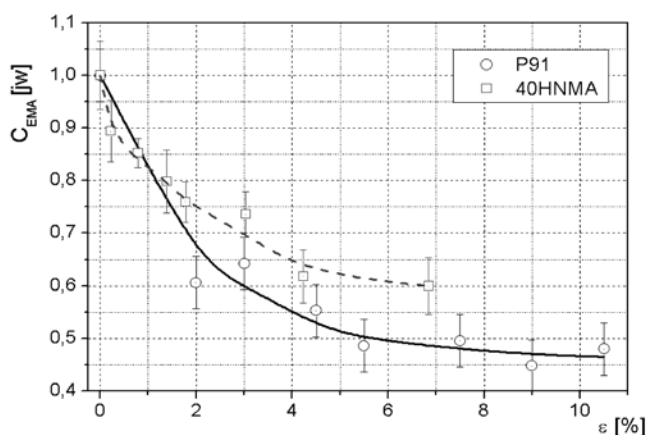


Rys. 6. Zmiany natężenia sygnału EMA w funkcji stopnia degradacji dla próbek ze stali 10H2M
Fig. 6. MAE signal intensity changes as a function of the degree of degradation of samples of 10H2M steel



Rys. 7. Sygnały EMA zmierzone dla próbek ze stali P91 poddanych deformacji plastycznej

Fig. 7. MAE signals measured for the P91 steel samples undergoing plastic deformation



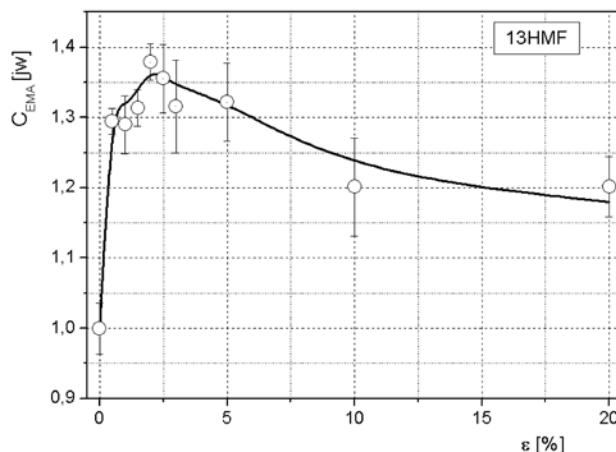
Rys. 8. Zmiany natężenia sygnału emisji magnetoakustycznej w funkcji stopnia deformacji plastycznej dla stali P91 i 40HNMA

Fig. 8. Changes magnetoacoustic emission signal intensity as a function of the degree of plastic deformation for P91 and 40HNMA steels

tego parametru w funkcji stopnia degradacji dla stali 10H2M przedstawiono na rysunku 6, linia ciągła na rysunku przedstawia wyniki modelowania zmian EMA przeprowadzonego przez M. Sablika na podstawie modelu zmian struktury wydzieleniowej w procesie degradacji [5].

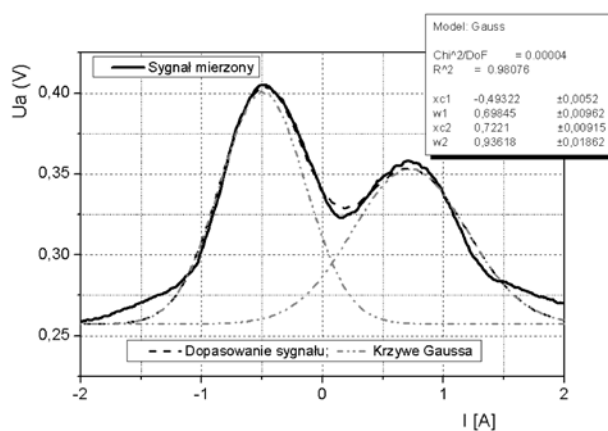
Pomiary stopnia deformacji plastycznej materiałów

Deformacja plastyczna powoduje bardzo silną zmianę struktury dyslokacyjnej materiału. W początkowym jej etapie obserwuje się znaczący wzrost gęstości dyslokacji, które zaczynają tworzyć skupiska, a następnie strukturę komórkową. O ile pojedyncze dyslokacje nie stanowią znaczącej przeszkody dla ruchu granic domenowych, o tyle ich skupiska, czy też ściany komórek dyslokacyjnych mogą stanowić punkty kotwiczenia tych granic. Natężenie emisji magnetoakustycznej podlega dużym zmianom w procesie deformacji; najkorzystniejsze, z punktu widzenia możliwości detekcji



Rys. 9. Zmiany natężenia sygnału emisji magnetoakustycznej w funkcji stopnia deformacji plastycznej dla stali 13HMF

Fig. 9. Changes of magnetoacoustic emission signal intensity as a function of the degree of plastic deformation for 13HMF steel

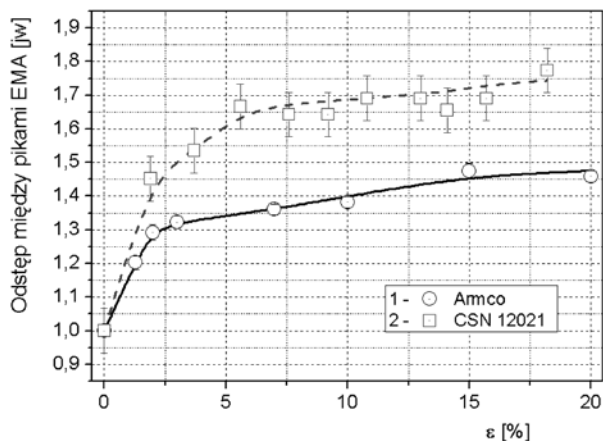


Rys. 10. Przykład dopasowania sygnału EMA za pomocą dwóch funkcji Gaussa w celu wyznaczenia odległości maksimum sygnału

Fig. 10. Example of MAE signal matching with the use of two Gaussian functions to determine the distance of the signal peaks

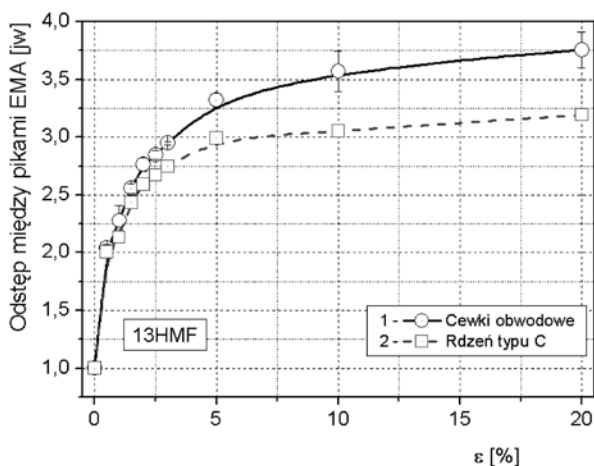
deformacji plastycznej, zmiany zachodzą podczas deformacji stali o strukturze odpuszczonego martenzytu. W tego rodzaju stalach obserwuje się silny spadek natężenia sygnału EMA w procesie deformacji plastycznej. Przykładowe obwiednie sygnału EMA dla próbek ze stali P91 przedstawiono na rysunku 7. Jak widać, spadek natężenia sygnału jest znaczący. Ilościowo zmiany natężenia sygnału EMA (wyrażonego za pomocą całki z obwiedni) dla stali P91 oraz 40HNMA przedstawiono na rysunku 8. Dla obu gatunków stali charakter przebiegu jest podobny, natężenie sygnału spada o 40÷50% dla badanych zakresów deformacji.

Sytuacja nie jest jednak tak prosta w przypadku innych stali, np. na rysunku 9 przedstawiono zmiany natężenia sygnału EMA w funkcji stopnia deformacji dla stali 13HMF. Zmiany mają charakter niemonotoniczny, co podważa zasadność wykorzystania metody opartej na pomiarze sygnału EMA do diagnozowania stopnia deformacji plastycznej w tego rodzaju materiałach. Sygnał EMA można jednak charakteryzować nie tylko za pomocą jego natężenia [6]. Na rysunku 10 przedstawiono obwiednię sygnału EMA



Rys. 11. Zmiany odstępów między położeniami maksimów sygnału EMA w funkcji stopnia deformacji plastycznej dla żelaza Armco (1) i stali CSN12021

Fig. 11. Changes in the distance between the positions of maxima MAE signal in function of the degree of plastic strain of the Armco iron (1) and CSN12021 steel



Rys. 12. Zmiany odstępów między położeniami maksimów sygnału EMA w funkcji stopnia deformacji plastycznej dla stali 13HMF przy różnych sposobach magnesowania

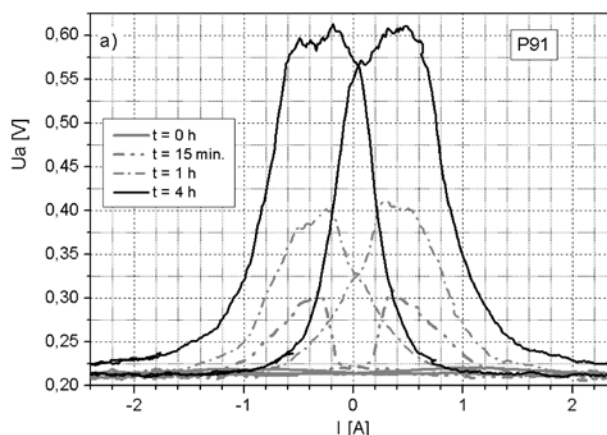
Fig. 12. Changes in the distance between the positions of the signal peaks as a function of the degree of MAE plastic strain of 13HMF steel for different ways of magnetization

jaką uzyskuje się dla próbek o umiarkowanym przekroju (kilkudziesięciu milimetrów kwadratowych). Obwiednię taką można dość dobrze dopasować za pomocą dwóch pików Gaussa, których centra przypadają na obszary wzmożonej aktywności nie 180° granic domenowych (w obszarach tych zachodzi kreacja i anihilacja domen domykających). Charakterystyczną cechą obwiedni EMA jest systematyczny wzrost odległości (w dziedzinie prądu lub natężenia pola magnesującego) pomiędzy tymi pikami, co jest bezpośrednio związane ze zmianami właściwości pętli histerezy magnetycznej – pętla ta systematycznie pochyla się, a odległość pomiędzy jej „kolanami” rośnie. Zmianę odległości między maksimami sygnału EMA dla żelaza Armco oraz stali CSN12021 (produkcji czeskiej) przedstawiono na rysunku 11. Obserwowany wzrost jest znaczący, zwłaszcza w początkowych stadiach procesu deformacji, i sięga 80% dla stali CSN12021.

Wyniki prezentowane na rysunku 11 uzyskano z wykorzystaniem cewek obwodowych, otaczających magnesowaną próbkę, co jest konfiguracją możliwą do realizacji jedynie w warunkach laboratoryjnych. Podobne wyniki uzyskuje się jednak również przy wykorzystaniu elektromagnesu jarzmowego – porównanie wyników uzyskanych w obu tych konfiguracjach (dla stali 13HMF) przedstawiono na rysunku 12. W przypadku tej stali obserwowany wzrost jest bardzo znaczny (niemal czterokrotny), ponadto wyniki uzyskane w obu tych konfiguracjach nie różnią się zbyt od siebie. Co warto podkreślić, położenie maksimów sygnału EMA jest niewrażliwe ani na jakość kontaktu sondy z podłożem (co stanowi najczęstsze źródło błędów pomiarowych), ani na poziom szumów tła, ani też na wzmocnienie toru pomiarowego. Istotna jest natomiast powtarzalność warunków magnesowania badanych elementów.

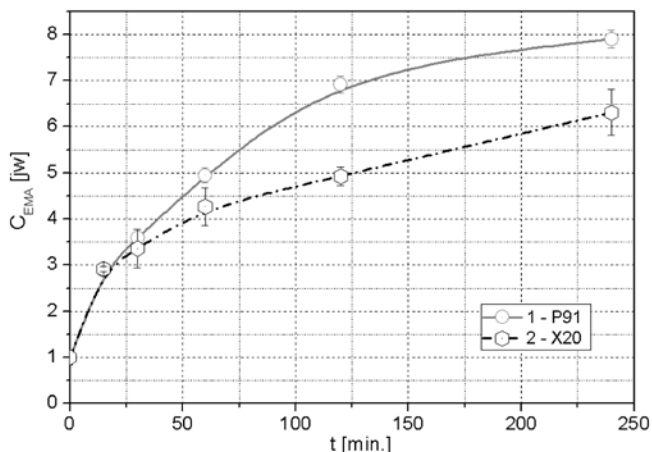
Monitorowanie jakości obróbki cieplnej

Stale stosowane w energetyce, takie jak stal X20 czy P91, poddawane są w procesie produkcji obróbce polegającej na hartowaniu, a następnie odpuszczaniu w temperaturze 750°C. W procesie odpuszczania stali bardzo silnej zmianie ulega gęstość dyslokacji, co powoduje znaczącą zmianę jej właściwości magnetycznych [7]. Z punktu widzenia możliwości monitorowania zmian zachodzących w materiale podczas eksploatacji istotna jest znajomość stanu wyjściowego materiału, a do oceny tego stanu można wykorzystać m.in. emisję magnetoakustyczną. Na rysunku 13 przedstawiono zmiany sygnału EMA zachodzące podczas odpuszczania stali P91. Próbkę nieodpuszczoną (martenzytyczną) cechuje się bardzo małym natężeniem emisji magnetoakustycznej, bliskim progu mierzalności. Sygnał ten narasta znacząco już po 15 min. odpuszczania, po czym systematycznie rośnie w pełnym zakresie analizowanych czasów



Rys. 13. Sygnały EMA zmierzone dla stali P91 po różnym czasie odpuszczania

Fig. 13. MAE signals measured for P91 steel after tempering at different times



Rys. 14. Wpływ czasu odpuszczania na natężenie sygnału EMA dla dwu różnych gatunków stali – P91 (1) i X20 (2)

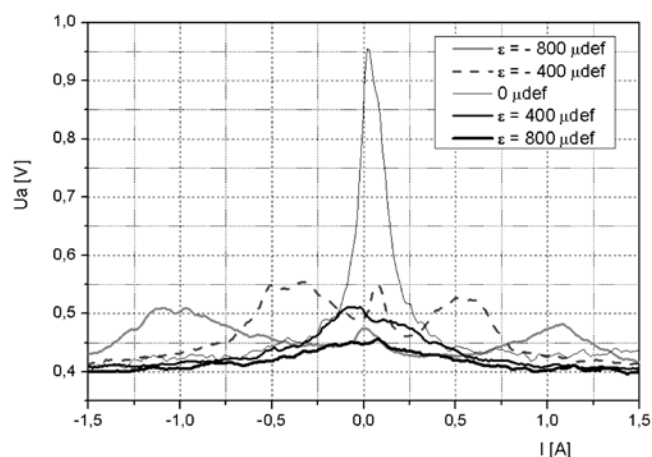
Fig. 14. Effect of tempering time on MAE signal intensity for two different types of steels – P91 (1) and X20 (2)

odpuszczania. Analogicznie wygląda sytuacja w przypadku stali X20 o zbliżonej mikrostrukturze. Ilościowo zmiany natężenia sygnału EMA dla obu tych gatunków stali przedstawiono rysunku 14. Widać, że natężenie sygnału w obu przypadkach różnie bardzo znacząco (6÷8 krotnie).

Analiza zmian struktury domenowej wywołanych naprężeniami

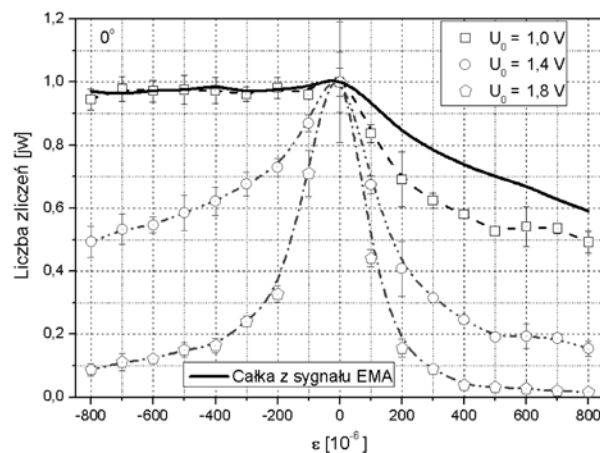
Naprężenia mechaniczne silnie wpływają na strukturę domenową materiału, a co za tym idzie – na jego właściwości magnetosprężyste. Do grupy materiałów, dla których właściwości te mają ogromne znaczenie, należą przede wszystkim stale elektrotechniczne, w tym również stale o teksturze Gossa. W przypadku tego rodzaju stali szczególne znaczenie mają naprężenia ściskające, które prowadzą do bardzo silnej przebudowy struktury domenowej już przy małych wartościach tych naprężeń. Obwiednie (przykładowe) sygnału EMA uzyskane dla przypadku ściskania oraz rozciągania w zakresie odkształceń $\varepsilon = -800 \div 800 [10^{-6}]$ przedstawiono na rysunku 15 [8]. Naprężenia rozciągające modyfikują bardzo silnie natężenie sygnału, nie zmieniając przy tym znacząco jego kształtu. Wynika to z tego, że naprężenia te powodują zanik domenowych struktur „lancetowych”, które ograniczone są przez granice nie 180° i są głównym źródłem emisji magnetoakustycznej w tych materiałach. Kształt sygnału zmienia się natomiast bardzo silnie podczas ściskania, pojawiają się dwa duże maksima (i jedno małe pośrodku), które oddalają się od siebie ze wzrostem naprężeń. Tak gwałtowna zmiana wynika z tego, że nawet niewielkie naprężenia zmieniają strukturę domenową z uporządkowanej wzdłuż osi próbki (pokrywającej się z osią łatwego magnesowania) na strukturę złożoną z domen objętościowych,

namagnesowanych prostopadle do powierzchni próbki, oraz domen domykających namagnesowanych wzdłuż próbki, o kształcie wydłużonym prostopadle do jej osi. Wraz ze wzrostem naprężeń struktura ta ulega rozdrobnieniu, na powierzchni tworzą się coraz mniejsze domeny domykające. Mimo silnej zmiany kształtu sygnału jego natężenie, rozumiane jako całka z obwiedni, zmienia się bardzo nieznacznie. Do szczegółowej analizy zmian struktury domenowej wywołanej naprężeniami wykorzystać można analizę impulsową sygnału EMA. Na rysunku 16 przedstawiono zmiany liczby zliczeń impulsów EMA dla różnych progów odcięcia – zliczane były tylko impulsy o amplitudzie większej niż zadana wartość napięcia (unormowane do wartości uzyskanych dla próbki nie naprężonej). Dla porównania linią ciągłą zaznaczono również zmiany całkowitego natężenia sygnału EMA. Zauważyć można, że dla małego progu odcięcia (gdy zliczane są prawie wszystkie



Rys. 15. Sygnały EMA zmierzone dla stali elektrotechnicznej (GO) dla różnych stopni odkształcenia sprężystego próbki

Fig. 15. MAE signals measured for electrical steel (GO) for different degrees of elastic strain of the sample



Rys. 16. Zmiana liczby zliczeń impulsów (dla różnych wartości napięcia progowego) w funkcji odkształcenia sprężystego próbki

Fig. 16. Change in the number of counts of pulses (for different values of the threshold voltage) as a function of the elastic strain of the sample

impulsy) przebieg zmian liczby zliczeń (w funkcji odkształcenia) pokrywa się z przebiegiem zmian natężenia. Dla progów wyższych (zliczane są jedynie „duże” impulsy) przebieg zmian w przypadku rozciągania pozostaje podobny (wzrasta jedynie dynamika zmian), natomiast w przypadku ściskania zmiany te mają

całkowicie inny charakter. Dla progu $U_0 = 1,8$ V obserwuje się 90% spadek liczby zliczeń impulsów dla najciśniej ściśniętej próbki. Brak dużych impulsów, przy praktycznie niezmiennym natężeniu sygnału, jest dowodem istotnego rozdrobnienia struktury domenowej, co zgadza się z przewidywaniami teoretycznymi.

Podsumowanie

Zjawisko emisji magnetoakustycznej ma potencjalnie duże możliwości zastosowania w nieniszczącej diagnostyce urządzeń i konstrukcji wykonanych z materiałów ferromagnetycznych. Podstawową zaletą metody jest jej niski koszt oraz możliwość stosowania w warunkach przemysłowych. Warto podkreślić, że metoda ta umożliwia na uzyskanie informacji z całej objętości magnesianego materiału, co ma ogromne znaczenie w przypadku np. rurociągów pary, dla których

proces degradacji postępuje od wnętrza. Odpowiednio dobrane techniki analizy sygnału pozwalają nie tylko na mierzenie sygnałów o natężeniu znacznie poniżej poziomu szumów tła, ale również na charakteryzowanie zmian strukturalnych, które nie zmieniają w sposób istotny całkowitego natężenia sygnału EMA. Metoda ta może mieć również zastosowanie do analizy zmian struktury domenowej materiałów stosowanych w elektrotechnice.

Literatura

- [1] Lord A.E., Jr. Acoustic emission. W. Physical Acoustics. Ed.: Mason W.P., Thurston R.N., New York, Academic, 1975, s. 290.
- [2] Shibata M., Ono K.: Magnetomechanical acoustic emission – a new method for non-destructive stress measurement. NDT International; 1981, s. 227-234.
- [3] Kwan M.M., Ono K., Shibata M.: Magnetomechanical Acoustic Emission of Ferromagnetic Materials at Low Magnetization Levels (Type I Behaviour). J. Acoustic Emis.; vol. 3, no. 3, 1984, s. 144-156.
- [4] Piotrowski L., Augustyniak B., Chmielewski M.: On the possibility of the application of magnetoacoustic emission intensity measurements for the diagnosis of thick-walled objects in the industrial environment. Meas. Sci. Technol. vol. 21, 2010, 035702 (8pp).
- [5] Sablik M.J., Augustyniak B., Piotrowski L.: Modeling incipient creep damage effects on Barkhausen noise and magnetoacoustic emission. J. Magn. Mater., vol. 272-276, 2004, s. e523-525.
- [6] Piotrowski L., Augustyniak B., Chmielewski M., Kowalewski Z.: Possibility of Application of Magnetoacoustic Emission for the Assessment of Plastic Deformation Level in Ferrous Materials. IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 8, 2011. s. 2087-92.
- [7] Piotrowski L., Augustyniak B., Chmielewski M., Łabanowski J., Lech-Grega M.: Study on the applicability of the measurements of magnetoelastic properties for a nondestructive evaluation of thermally induced microstructure changes in the P91 grade steel. NDT&E International vol. 47, 2012, s. 157-162.
- [8] Piotrowski L., Chmielewski M., Augustyniak B.: The influence of elastic deformation on the properties of the magnetoacoustic emission (MAE) signal for GO electrical steel. 3 J. Magn. Mater., vol. 324, 2012, s. 2496-2500.