

Bolesław Augustyniak, Marek Chmielewski, Leszek Piotrowski,
Politechnika Gdańska, Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej,
Wojciech Kiełczyński, Karolina Prokop,
Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny,
Dominik Kukla
Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej

Pomiar naprężeń własnych metodą Barkhausena za pomocą sondy z wirującym polem magnetycznym

Internal stress level determination using Barhausen Effect probe with rotating magnetic field

Efekt Barkhausena (EB) kojarzony jest z impulsami napięcia indukowanymi w cewce detekcyjnej zbliżonej do magnesowanej płyty. Typowa sonda efektu Barkhausena składa się z elektromagnesu jarzmowego (typu C) i cewki detekcyjnej z rdzeniem ferrytowym [1]. Natężenie efektu Barkhausena zależy od mikrostruktury (wielkości ziarna, morfologii wydzielań i dyslokacji) oraz od poziomu naprężeń [2]. Magnesowanie jest łatwiejsze, gdy kierunek pola magnetycznego sondy zgodny jest z kierunkiem działania naprężeń rozciągających i trudniejsze, gdy magnesowany jest materiał poddany działaniu naprężeń ściskających. Pomiar naprężeń z wykorzystaniem efektu Barkhausena ma wiele zalet: krótki czas pomiaru (kilkanaście sekund), względnie proste przygotowanie powierzchni (usunięcie warstwy tlenków szlifierką oscylacyjną z papierem ściernym o gradacji powyżej 100). W celu określenia składowych płaskiego stanu naprężenia konieczne jest wyznaczenie rozkładu kąтового natężenia EB [2, 3].

W artykule opisano wyniki badań stanu naprężenia za pomocą nowo opracowanego aparatu wyposażonego w sondę, która generuje w badanym elemencie namagnesowanie o skokowo zmiennym kierunku magnesowania. Aparat ten umożliwia automatyczny pomiar rozkładów kątowych natężenia EB. Badania te są realizowane w ramach projektu NCBiR nr PBS1/A9/14/2012 pt. *Opracowanie magnetycznej metody oceny stanu naprężeń w materiałach konstrukcyjnych zwłaszcza anizotropowych*. Zdaniem Autorów jest to rozwiązanie o lepszych walorach użytkowych niż proponowane w poprzednich opracowaniach [4, 5]. Anizotropowość właściwości magnetycznych (wynikająca np. z tekstury struktury ziaren) ujawnia się w eliptycznym, a nie kołowym rozkładzie kątowym natężenia EB. Oczywiście jest konieczność uwzględnienia tej anizotropii przy badaniu stanu naprężenia tą techniką. Poniżej podano przykłady badania stanu naprężenia nowym układem dla złączy spawanych wykonanych z praktycznie izotropowej magnetycznie stali oraz dla stali z wyrażną anizotropią magnetyczną.

Opis układu pomiarowego

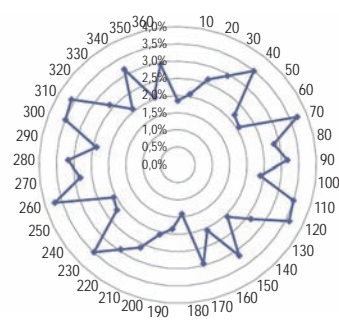
Sonda pomiarowa (rys. 1) składa się z dwóch wzajemnie prostopadłych układów elektromagnesów typu „C”, na których umieszczono dwie cewki magnesujące oraz jedno uzwojenie kontrolne. Uzwojenia kontrolne znajdują się w części środkowej rdzeni. Uchwyt mocujący rdzenie zapewnia niezależne przemieszczanie jednego elektromagnesu względem drugiego, umożliwiając tym samym wykonywanie pomiarów na zakrzywionych powierzchniach. Cewka detekcyjna umieszczona jest centralnie między biegunami i dzięki ruchomemu rdzeniowi optymalnie dopasowuje się do zakrzywionych powierzchni. Sonda współpracuje z układem elektronicznym sterowanym przez komputer. Układ ten zawiera generatory prądu magnesującego (przebieg trójkątny) oraz wzmacniacz z filtrami pasmowo-przepustowymi i kartę pomiarową (16 bit). Amplitudy prądów magnesujących są dobrane tak, aby wypadkowe namagnesowanie osiągnęło pożądaną kierunek φ . Sygnał napięciowy EB z cewki detekcyjnej jest rejestrowany w pamięci komputera wyposażonego w program pracujący w środowisku *LabView*. Pierwotną miarą natężenia EB jest wartość chwilowa napięcia skutecznego (napięcie U_b). Dla ustalonego kąta magnesowania φ rejestrowane są zmiany U_b w jednym cyklu (obwódni) oraz całka z tego napięcia ($\text{Int } U_b$) i napięcie maksymalne $U_{b\text{max}}$. Czas pomiaru jednej zależności kątowej dla skoku $\Delta\varphi = 10^\circ$ wynosi około 30 s.



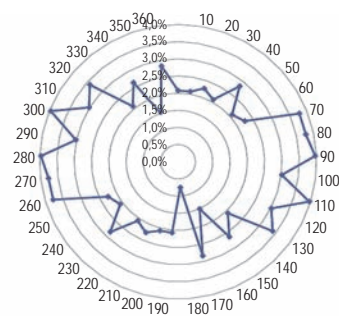
Rys. 1.
Sonda EB
z wirującym
polem

Materiał badany

Badania wykonano dla dwóch gatunków stali niestopowych: stali S235JR – o niewielkiej anizotropii magnetycznej, oznaczonej jako 'A' oraz stali o podwyższonej wytrzymałości S460M – o wyraźnej anizotropii magnetycznej, oznaczonej jako 'B'. W przypadku stali 'B' natężenie EB było znacząco większe przy magnesowaniu w kierunku walcowania płyty. Wykonane w Politechnice Warszawskiej statystyczne badania z obrazów mikroskopii optycznej kształtu ziaren dostarczyły informacji o rozkładach kątowych osi głównej elipsoidy opisującej ziarno obu stali (rys. 2 i 3).



Rys. 2. Rozkłady kątowe położenia osi głównej elipsoidy opisującej ziarno stali 'A'



Rys. 3. Rozkłady kątowe położenia osi głównej elipsoidy opisującej ziarno stali 'B'

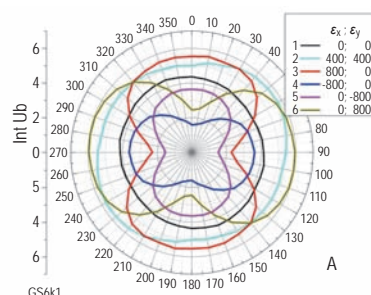
Widoczne na rysunkach rozkłady kątowe pozwalają twierdzić, że w przypadku stali 'B' występują w znacznie większym stopniu niż dla stali 'A' ziarna wydłużone, a ich oś główna ma kierunek walcowania. Blachy w stanie dostawy miały grubość $h = 6$ mm dla stali 'A' oraz $h = 15$ mm dla stali 'B'. Kalibrację zależności natężenia EB od stanu odkształcenia wykonano dla próbek w kształcie krzyża o grubości $h = 6$ mm. Ramiona krzyża miały szerokość $S = 50$ mm i długość całkowitą $D = 200$ mm.

Stan naprężenia badano na powierzchni blach zespawanych doczołowo półautomatyczną metodą MAG. Blachy miały wymiary: długość $L = 400$ mm i szerokość $W = 250$ mm. Zastosowano ukosowanie typu V i dwa ściegi dla blach ze stali 'A' oraz ukosowanie typu X i spawanie obustronne wielościęgowe dla blach ze stali 'B'.

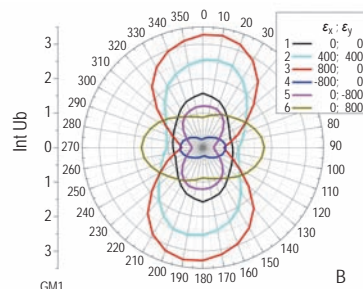
Wyniki pomiarów EB

Pierwszym etapem badań było wyznaczenie zależności natężenia EB od poziomu naprężeń dla dwuosowego stanu naprężenia dla próbek w kształcie krzyża [5, 6]. Stan odkształce-

nia w centralnej części krzyża (kontrolowany za pomocą rozety tensometrycznej) zmieniano wyginając metodą czteropunktową ramiona krzyża. Na rysunkach 4 i 5 wykreślono rozkłady kątowe natężenia EB zmierzone dla wybranych wartości odkształceń ε_x i ε_y zadawanych odpowiednio wzdłuż osi X – zgodnej z kierunkiem walcowania oraz wzdłuż osi Y – prostopadłej do kierunku walcowania. Dla tych rysunków w opisie odkształceń przyjęto jednostkę odkształcenia ε : $[\varepsilon] = 1 \mu def = 1 \cdot 10^{-6}$. O różnicy w anizotropii magnetycznej obu stali świadczą wykresy kątowe dla próbek nieobciążonych ($\varepsilon_x = 0$ i $\varepsilon_y = 0$): 'prawie koło' dla stali 'A' i 'elipsa' dla stali 'B'. Widać także, że natężenie EB mierzone w kierunku zadanej osi zwiększa się, gdy struktura w tym kierunku jest rozciągana (ε dodatnie), a maleje dla przypadku ściskania (ε ujemne).



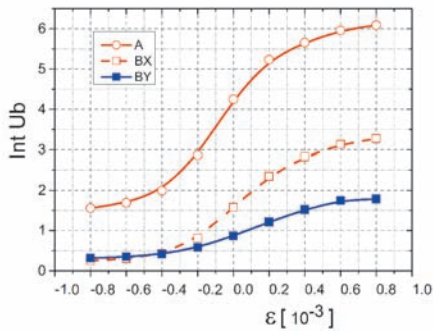
Rys. 4. Rozkłady kątowe natężenia BE dla zadanych odkształceń ε_x i ε_y (μdef); stal 'A'



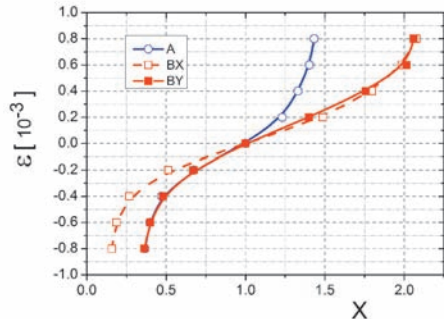
Rys. 5. Rozkłady kątowe natężenia BE dla zadanych odkształceń ε_x i ε_y (μdef); stal 'B'

W przypadku nieznaczącej anizotropii stali 'A' do dalszych analiz przyjęto zależność uśrednioną z obu kierunków. Wykresy na rysunku 6 pokazują, że dynamika tych zmian jest specyficzna i charakterystyczna dla danego materiału. Zależności z rysunku 6 wykorzystano do sporządzenia tzw. funkcji kalibrujących $\varepsilon = f(X)$, gdzie zmienna X jest wartością ilorazu natężenia EB w stanie naprężonym do tej wartości dla stanu nienaprężonego. Funkcje te są wykorzystywane do wyliczania wartości składowych odkształceń ε_x i ε_y na podstawie zmierzonych natężeń EB dla danych kierunków X i Y na spawanej płycie.

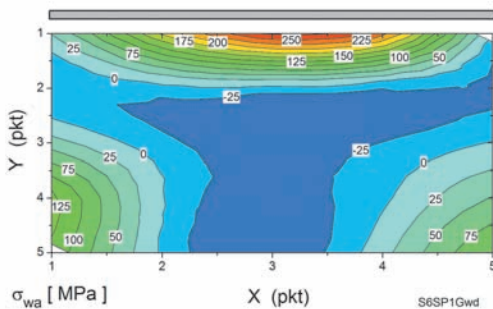
Wartość zmiennej X wyznaczano oddzielnie dla danego kierunku badania jako iloraz wartości zmierzonej EB i wartości średniej z wszystkich pomiarów natężenia EB wykonanych dla danej płyty przed spawaniem. Wartości odkształceń ε wyliczano z funkcji kalibrującej korzystając z metody interpolacji albo z metody ekstrapolacji (zależności liniowe). Uniknięto w ten sposób procedury aproksymacji danych z funkcji kalibrującej arbitralnie dobraną funkcją analityczną.



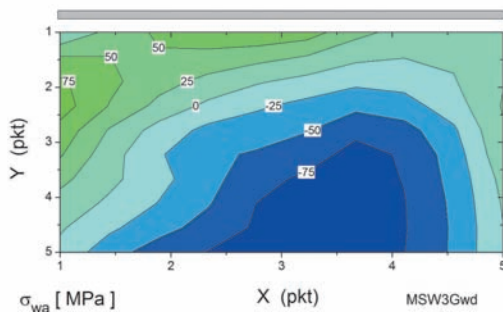
Rys. 6. Zależność natężenia EB od odkształcenia: A – stal 'A', BX i BY – stal 'B' w kierunku walcowania i w kierunku prostopadłym



Rys. 7. Funkcje kalibracyjne: A – stal 'A', BX i BY – stal 'B' w kierunku walcowania i w kierunku prostopadłym



Rys. 8. Mapa rozkładu naprężeń (składowa równoległa do osi spoiny); stal 'A'



Rys. 9. Mapa rozkładu naprężeń (składowa równoległa do osi spoiny); stal 'B'

Powyżej podane są przykładowe wyniki badania stanu naprężeń dla złącza ze stali 'A' oraz ze stali 'B'. Bazą do obliczeń były wyniki pomiarów rozkładów kątowych wykonanych w 25 punktach na powierzchni płyty w węzłach linii wzajemnie prostopadłych. Linia najbliższa względem złącza spawanego była

odległa o około 30 mm od osi spoiny. Z tych rozkładów kątowych wybrano natężenia EB odpowiadające kierunkom równoległym i prostopadłym do osi spoiny w danym punkcie i przeliczano te natężenia na składowe odkształceń (ϵ_x i ϵ_y) wykorzystując funkcje kalibrujące odpowiednie dla znanej orientacji kierunku walcowania danej blachy w badanym złączu. Tak wyznaczone wartości składowych odkształceń wykorzystano do wyliczenia składowych naprężeń σ_x i σ_y , stosując znane z mechaniki zależności między tymi wielkościami dla dwuosiowego stanu naprężeń.

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono mapy rozkładu składowego naprężenia wyznaczonego w kierunku zgodnym z osią spoiny (oznaczonej jako σ_{wa}) odpowiednio dla złącza ze stali 'A' i ze stali 'B'.

Rozkład uzyskany dla pierwszego złącza (rys. 8) ujawnia cechy typowe dla doczołowego połączenia spawanego: wysoki poziom naprężeń rozciągających (bliski granicy plastyczności) w strefie bliskiej spoinie, przechodzący w stan naprężeń ściskających w centralnej części płyty.

Stan naprężeń dla drugiego złącza jest wyraźnie odmienny. W materiale rodzimym w strefie bliskiej spoinie złącza ze stali 'B' (rys. 9) nie stwierdzono wysokiego poziomu naprężeń rozciągających. Jest to ewidentny skutek zastosowanej wielościennej i naprzemiennej techniki spawania (z ukosowaniem na X).

Podsumowanie

Przedstawiono wyniki wykorzystania nowego typu sondy efektu Barkhausena (EB) służącej do automatycznego pomiaru rozkładów kątowych natężenia EB do oceny stanu naprężeń złącz spawanych wykonanych ze stali izotropowej magnetycznie (stal S235) i anizotropowej (stal S460). Wyniki te świadczą jednoznacznie o przydatności zastosowanego rozwiązania technicznego dla potrzeb diagnostyki złącz spawanych. Wyniki badań porównawczych stanu naprężeń wykonanych innymi metodami nieniszczącymi (technika XRD, metoda Mathara i metoda DIC) będą przedstawione w następnych publikacjach.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Sablik M.J., Augustyniak B.: Magnetic Methods of Non-Destructive Evaluation, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, New York, (1999) vol. 12.
- [2] Augustyniak B.: Zjawiska magnetosprężyste i ich wykorzystanie w nieniszczących badaniach materiałów, Monografia 38, Wyd. Politechnika Gdańska, Gdańsk, 2003.
- [3] Sablik J.M., Smith M.Q., Waldhart C.J., McKee D.A., Augustyniak B.: The effects of biaxial stress on Barkhausen noise signals when the magnetic field is noncoaxial with the stress; J. Appl. Phys. 84 (11) (1998), p. 6239-6249.
- [4] Caldas-Morgan M., Padovese L.R., Fast detection of the magnetic easy axis on steel sheet using the continuous rotational Barkhausen method. NDT&International 45 (2012), p. 148-155.
- [5] Espina-Hernandez J.H., Perez-Benitez J.A., Caleyó F., Baudin T., Helbert A.L., Hallen J.M.: Barkhausen noise measurements give direct observation of magneto-crystalline anisotropy energy in ferromagnetic polycrystals; J. Phys. D: Appl. Phys. 46 (2013), 392001.

