

Załącznik nr 3.

AUTOREFERAT

Wykorzystanie metrologii magnetycznej w dziedzinie badania
właściwości materiałów.

1. Imię i Nazwisko.

Marek Chmielewski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

**Doktor nauk fizycznych w zakresie fizyki
Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej
Politechnika Gdańska, Gdańsk (2000)
Rozprawa doktorska: " Relacja pomiędzy natężeniem mechanicznego efektu
Barkhausena a stratami energii na histerezę magnetoosprężystą"
Promotor: Prof. Dr hab. Mieczysław Chybicki**

**Magister inżynier, w zakresie Fizyka Techniczna
Praca magisterska Politechnika Gdańska 1992
Promotor: dr inż. Bolesław Augustyniak**

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych.

**Starszy Wykładowca Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej,
Politechnika Gdańska, Gdańsk (2015 – obecnie).**

**Adiunkt Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechnika Gdańska,
Gdańsk (2001 – 2015).**

**Asystent naukowo-dydaktyczny Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej,
Politechnika Gdańska, Gdańsk (1994 – 2001).**

**Asystent naukowo-dydaktyczny Wydział Organizacji i Zarządzania, Politechnika
Gdańska, Gdańsk (1993 – 1994).**

4. Wskazanie osiągnięcia¹ wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 r. poz. 1789):

Tytuł osiągnięcia naukowego

Wykorzystanie metrologii magnetycznej w dziedzinie badania właściwości materiałów.

Osiągnięcie naukowe

Opracowanie innowacyjnych, autorskich rozwiązań systemów pomiarowych wykorzystujących zjawisko histerezy magnetycznej służących do badania jakości oraz wyznaczania stanu naprężenia materiałów ferromagnetycznych. Działanie to wymagało wykonania prac koncepcyjnych oraz konstrukcyjnych uzupełnionych pomiarami testowymi zaprojektowanych i zbudowanych urządzeń. Ważnym aspektem projektowanych systemów była konieczność uwzględnienia możliwości zastosowania układów pomiarowych w warunkach przemysłowych.

Wykaz prac wchodzących w temat pracy habilitacyjnej

[G1] Augustyniak, B; **Chmielewski, M**; Sablik, MJ; Multiparameter magnetomechanical NDE; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS; Volume: 36 , Issue: 5 , Sept 2000; IF = 1,467

[G2] B. Augustyniak, **M.Chmielewski** and M.J.Sablik; NDE of creep damage at seam welds via MAE; NONDESTRUCTIVE TESTING AND EVALUATION; 17(6):351-361 · January 2001; IF = 1,02

[G3] Augustyniak, B; **Chmielewski, M**; Piotrowski, L; Sablik, MJ; Designing a magnetoacoustic emission measurement configuration for measurement of creep damage in power plant boiler tubes; JOURNAL OF APPLIED PHYSICS ; J. Appl. Phys. vol. 91, (2002) pp. 8897-8899; IF = 2,176

[G4] 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; MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, (2010) 21; (8pp);IF = 1,353

[G5] Piotrowski, L; Augustyniak, B; **Chmielewski, M**; Labanowski, 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) pp. 157-162; IF = 1,744

[G6] Piotrowski, L; Augustyniak, B; **Chmielewski, M**; Landgraf, FJG; Sablik, MJ; Impact of plastic deformation on magnetoacoustic properties of Fe-2%Si alloy; NDT & E INTERNATIONAL; vol. 42 (2009) pp. 92-96; IF = 1,323

[G7] Piotrowski, L; Augustyniak, B; **Chmielewski, M**; Hristoforou, EV; Kosmas, K; Evaluation of Barkhausen Noise and Magnetoacoustic Emission Signals Properties for Plastically Deformed Armco Iron; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS.; vol. 46, no. 2 (2010) pp. 239-242; IF = 1,053

[G8] L. Piotrowski, B. Augustyniak, **M. Chmielewski**, Z. Kowalewski; Possibility of Application of Magnetoacoustic Emission for the Assessment of Plastic Deformation Level in Ferrous Materials; IEEE Trans. Magn.; vol. 47, no. 8 (2011) pp. 2087-2092; IF = 1,363

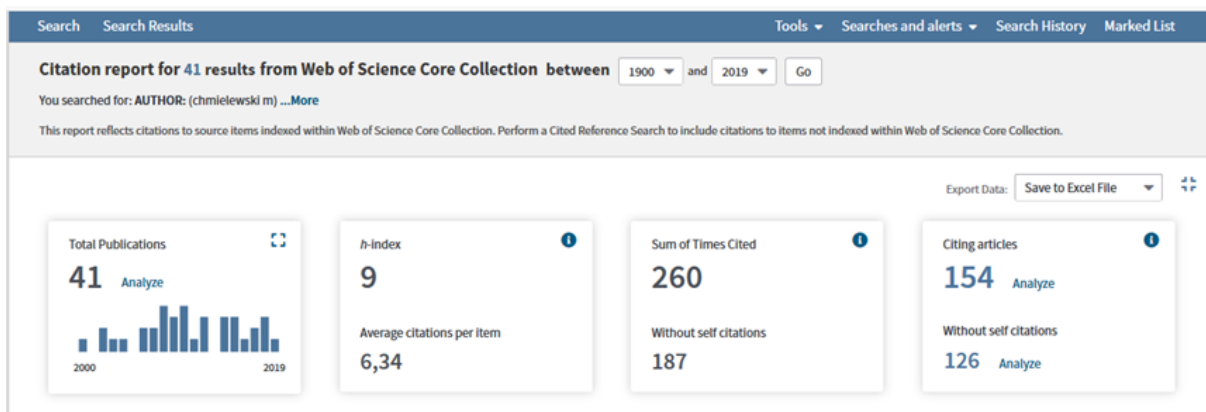
[G9] Augustyniak, B; Piotrowski, L; **Chmielewski, M**; Kosmas, K; Hristoforou, E; Barkhausen Noise Properties Measured by Different Methods for Deformed Armco Samples; IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Volume: 46 Issue: 2, Feb. 2010, IF = 1,467

[G10] Piotrowski, L; **Chmielewski, M**; Augustyniak, B; Maciakowski, P; Prokop, K; Stress anisotropy characterisation with the help of Barkhausen effect detector with adjustable magnetic field direction; INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED ELECTROMAGNETICS AND MECHANICS vol. 48 (2-3) pp. 163-170 (2015) ; IF = 0,724

[G11] **Chmielewski, M**; Piotrowski, L; Augustyniak, B; A fast procedure of stress state evaluation in magnetically anisotropic steels with the help of a probe with adjustable magnetizing field direction; MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY, February 2017, IOP Publishing Ltd, Volume 28, Number 4, 2017, IF = 1,685

[G12] **Chmielewski M.**, Piotrowski L.: Application of the Barkhausen effect probe with adjustable magnetic field direction for stress state determination in the P91 steel pipe; Journal of Electrical Engineering-Elektrotechnicky Casopis. -Vol. 69, nr. 6 (2018), s.497-501; IF = 0,549;

- Sumaryczny Impact Factor publikacji wchodzących w skład powyższej listy wynosi 15,924
- Dane bibliometryczne (na podstawie Web of Science)



Spis treści	str.
1. Wstęp.	3
2. Zjawiska fizyczne wykorzystywane w projektowanych urządzeniach.	4
3. Wykorzystanie techniki pomiarów natężenia emisji akustycznego efektu Barkhausena.	9
3.1. Badania możliwości systemu pomiarowego wykonane dla materiału 15H11MF [G1].	9
3.2. Testy autorskiego systemu pomiarowego zastosowanego dla rur grubościennych wykorzystywanych w elektrowniach konwencjonalnych jako rurociągi pary świeżej [G2].	11
3.3. Zbadanie możliwości wykorzystania systemu pomiaru akustycznego efektu Barkhausena dla potrzeb diagnozowania rur cienkościennych [G3][G4].	15
4. Prezentacja możliwości wykorzystania autorskich systemów pomiarowych w zakresie diagnozowania stanu struktury różnych materiałów ferromagnetycznych.	20
4.1. Temperaturowo generowane zmiany mikrostruktury P91 [G5].	20
4.2. Plastycznie deformowanych materiałów Fe-Si [G6], Armco [G7], 13HMF, P91, CSN12021 [G8].	21
5. Autorskie rozwiązanie systemu klasycznego, magnetycznego efektu Barkhausena do pomiaru wielkości odkształcenia, umożliwiające szybkie uzyskanie informacji o rozkładzie kątowym anizotropii magnetycznej, [G9][G10][G11][G12].	26
6. Krótki opis pozostałych dziedzin badań prowadzonych przez autora przewodnika.	36

1. Wstęp

W badaniach własności materiałów konstrukcyjnych, bardzo istotne jest uzyskanie, jak najbardziej miarodajnych i wiarygodnych pomiarów charakteryzujących badany element, przy jak najmniejszej ingerencji w jakość i strukturę badanych materiałów. Ze względu na charakter oraz typ uzyskiwanych informacji, badania takie można podzielić na kilka podstawowych grup:

- Badania służące do określenia w mikro i w makro skali stanu struktury badanych materiałów.

- Pomiary wielkości odkształcenia, występującego w materiale, które to zazwyczaj indukuje zmiany właściwości struktury, a co za tym idzie zmiany, zazwyczaj pogorszenie własności mechanicznych badanych materiałów.

Troska o utrzymanie ruchu instalacji technicznej oraz działania mające na celu zapewnienie bezpieczeństwa ludziom stwarza konieczność ciągłego rozwoju i tworzenia nowych, bardziej skutecznych i miarodajnych, sposobów pozyskiwania informacji na temat stanu struktury oraz stanu naprężenia w materiałach konstrukcyjnych. Dodatkowym kryterium przydatności oraz znaczenia nowych metod, może być możliwość ich zastosowania bezpośrednio na obiekcie badanym oraz ich nieniszczący charakter działania. W przypadku materiałów wykazujących własności przewodzące lub przewodzące i ferromagnetyczne źródłem informacji o ich stanie, może być badanie konsekwencji wpływu zmiennego oraz stałego pola magnetycznego. Efekty związane z prądami wirowymi, powstającymi w materiałach przewodzących pod wpływem zmiennego pola magnetycznego czy też właściwości ferromagnetyczne, ujawniające się w procesach magnesowania między innymi jako efekt Barkhausena, związany bezpośrednio z właściwościami magnetostrykcyjnymi, wydają się mieć potencjalnie duże zastosowanie w dziedzinie badania własności materiałów. Niniejsze opracowanie prezentuje i systematyzuje szereg autorskich rozwiązań systemów pomiarowych badających właściwości magnetyczne, mających bezpośrednie i potwierdzone działanie umożliwiające określenie i sparametryzowanie właściwości materiałów konstrukcyjnych.

Urządzenia pomiarowe zaprojektowane i skonstruowane przeze mnie były i są wykorzystywane w zakresie badania jakości materiałów przewodzących i ferromagnetycznych. W swoich konstrukcjach wykorzystywałem zjawiska związane z: nieodwracalnym procesem przemagnesowania materiałów ferromagnetycznych, z właściwościami pętli histerezy magnetycznej, prądami wirowymi szczególnie w przypadku badania materiałów niemagnetycznych, techniką wytwarzania i rejestracji impulsów magnetostrykcyjnych, czy też z pomiarem pola magnetycznego rozproszonego. Opis moich osiągnięć ograniczyłem tylko do badań stanu struktury materiałów ferromagnetycznych oraz wyznaczania wielkości i rozkładu naprężenia w materiałach konstrukcyjnych. Wybór taki spowodowany był zbieżnością charakteru budowy układów pomiarowych wykorzystywanych w zakresie badania obu

zagadnień oraz ich podstawowy modularny charakter. Zjawiska, które zostały wykorzystane przeze mnie w projektowanych systemach pomiarowych to klasyczny efekt Barkhausena oraz jego akustyczna odmiana.

Zanim przedstawiona zostanie systematyka publikacji prezentujących efekty wykorzystania autorskich rozwiązań systemów i urządzeń pomiarowych, przedstawiona zostanie krótka charakterystyka zjawisk elektrycznych i magnetoelastycznych wykorzystywanych w skonstruowanych urządzeniach pomiarowych.

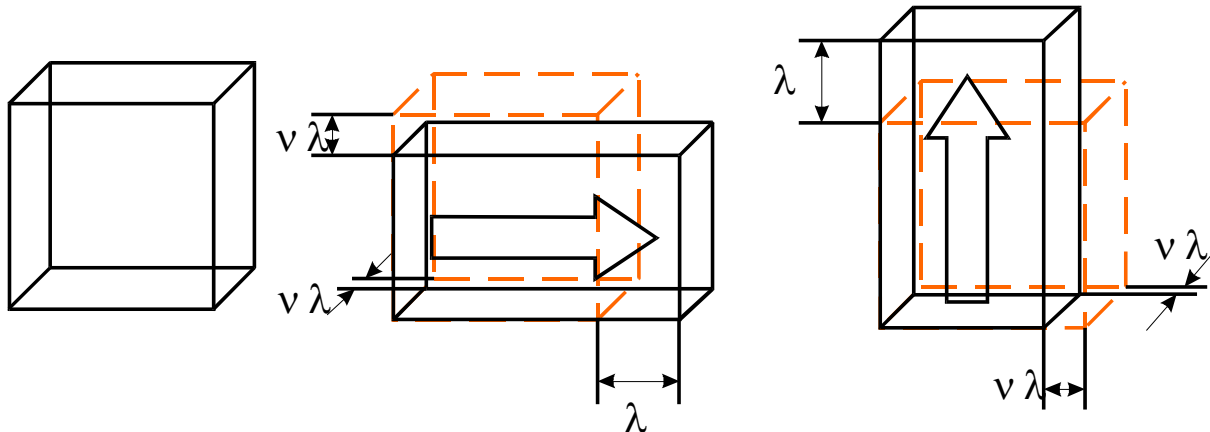
2. Zjawiska fizyczne wykorzystywane w projektowanych urządzeniach

Źródłem, myślę że sukcesu, w zakresie budowy autorskich systemów pomiarowych jest szeroko pojęte zrozumienie fizyki zjawisk magnetycznych oraz praktyka w zakresie budowy pomiarowych urządzeń elektronicznych. Zaczynając od podstaw makroskopowej teorii magnetyzmu, jak powszechnie wiadomo procesy magnesowania materii wprowadzają jej systematykę na kilka wyraźnie rozróżnianych grup materiałowych. Podstawowy opis dzieli istniejące materiały na paramagnetyczne, diamagnetyczne i ferromagnetyczne dalej ferrimagnetyczne i antyferrimagnetyczne. Parametrem makroskopowym najlepiej opisującym taką systematykę jest przenikalność magnetyczna względna lub podatność magnetyczna. Obydwie wielkości w sposób jednoznaczny związane są z typami materiałów i jednoznacznie wiążą swoim charakterem opis wielkości magnetycznych występujących w materiałach fazy skondensowanej, choć pojawiają się doniesienia o zaobserwowaniu stanu ferromagnetycznego również w silnie przechłodzonych gazach. W zakresie zastosowań praktycznych, zwłaszcza w szeroko pojętym dziale jakim jest przemysł wykorzystujący metalowe materiały konstrukcyjne, materiałami najczęściej wykorzystywanymi są ciągle stale ferromagnetyczne. Oznacza to, że można podjąć próbę wykorzystania wielkości pomiarowych związanych z właściwościami magnetoelastycznymi do celów określenia ich stanu czy też poziomu naprężenia. Wiążąc fakt wpływu stanu badanego materiału na makroskopowe współczynniki opisujące stan ferromagnetyczny, można oczekiwać potencjalnie dużego znaczenia badania tych wielkości w zakresie szeroko pojętej diagnostyki materiału. Niestety do dnia dzisiejszego nie ma spójnego modelu, który byłby w stanie opisać skutecznie właściwości makroskopowych materiałów ferromagnetycznych. Z praktycznej strony na szczególną uwagę zasługuje wpływ jakości struktury, składu fazowego, właściwości magnetostrykcyjnych, parametrów geometrycznych na procesy magnesowania materiałów ferromagnetycznych. Sam ferromagnetyzm związany z właściwościami elektronów na ostatnich powłokach atomowych, a ściślej mówiąc z ich spinami, może być opisany termodynamicznie jako stan równowagi pomiędzy energią wymiany, energią magnetostatyczną, energią anizotropii magnetokrystalicznej, energią magnetosprężystą oraz,

czasami uwzględnianym, czynnikiem geometrycznego rozmagnesowania (głównie w badaniach makroskopowych). Superpozycja tych wszystkich czynników powoduje powstanie, w warunkach naturalnych, subtelnej nadstruktury pojawiającej się w przestrzeni wymiarowej pomiędzy strukturą atomową (krystaliczną) a strukturą fazową. Ta struktura nazywa się układem domenowym i związana jest z charakterem ułożenia elementarnych momentów magnetycznych pochodzących od atomów w objętościach, w których ułożone są równoległe do siebie, tworząc obszary o nasyconych właściwościach magnetycznych. Minimalizowanie efektu powstawiania pola magnetycznego związane jest z chaotycznym, przypadkowym rozłożeniem kierunków namagnesowania domen magnetycznych. Oznacza to, że materiał ferromagnetyczny nie wytwarza, makroskopowo, zewnętrznego pola magnetycznego mimo posiadania w swoim wnętrzu obszarów o nasyconym namagnesowaniu. Wielkość domen magnetycznych waha się w dość szerokim zakresie od rozmiarów nano metrycznych do milimetrowych i większych. W klasycznych ferromagnetycznych materiałach konstrukcyjnych rozmiary domen magnetycznych wahają się w okolicy wielkości mikrometrycznych. Jednak, ze względu na właściwości ferromagnetyczne z punktu widzenia procesów przemagnesowania, to nie sama obecność domen magnetycznych ma znaczenie. Kluczowym elementem w procesach magnetycznych jest obecność obszarów rozdzielających domeny o różnym kierunku namagnesowania. Obszary te nazwano granicami domenowymi i ze względu na to jakie kierunki namagnesowania domen rozdzielają nazywane są granicami 180 i nie 180 stopniowymi. Granice nie 180 stopniowe mocno związane są ze stałymi anizotropii magnetokrystalicznej, i w przypadku żelaza dla którego współczynnik anizotropii jest dodatni, granice te stają się granicami 90 stopniowymi. Dla niklu natomiast, dla którego stała anizotropii magnetokrystalicznej jest ujemna, granice nie-180 stopniowe rozdzielają domeny magnetyczne pomiędzy którymi wektory namagnesowania tworzą kąty 71 i 109 stopni. Granice domenowe, a przede wszystkim ich przemieszczanie, w procesach przemagnesowania są kluczowym źródłem informacji na temat struktury przemagnesowanego materiału. Ruch granic domenowych bardzo mocno związany jest z jakością struktury poprzez proces nazywany kotwiczeniem. Oznacza to, że granica domenowa dla konkretnego stanu namagnesowania i temperatury zajmują pozycje optymalną (w studni potencjału) związaną z niedoskonałościami struktury przemagnesowanego materiału. Takimi źródłami zakotwiczenia może być skupisko dyslokacji jak również wydzielenie w obszarze lub na granicy ziarna. Kluczowym elementem określającym źródła zakotwiczenia jest rozmiar granic domenowych, które dla granic 180 stopniowych określa się na 100nm natomiast dla granic nie-180 stopniowych na 40-50nm. Zewnętrzne źródło pola magnetycznego, uruchamiające procesy przemagnesowania, powoduje skokowe przemieszczanie granic domenowych z jednego stanu zakotwiczenia do następnego, stabilnego dla nowych warunków wartości pola magnetycznego miejsca zakotwiczenia. Granica domenowa przemieszcza się z prędkością bliską prędkości dźwięku w materiale

przemagnesowanym, generując tym samym silne lokalne zmiany strumienia pola magnetycznego, oraz prądy wirowe, które przez zjawisko Joula objawiają się grzaniem materiału i są bezpośrednio związane z gęstością start energii na procesy przemagnesowania. Makroskopowo energia ta określana jest przez powierzchnie pętli histerezy magnetycznej dla danego materiału. Jednak kluczowa, względem możliwości śledzenia procesu przemagnesowania, jest lokalna zmiana strumienia pola magnetycznego, która zgodnie ze zjawiskiem Faradaya, może być rejestrowana przez cewki detekcyjne bezpośrednio sąsiadujące z przemagnesowanym materiałem i wytwarzając w nich impulsy napięciowe. Zjawisko to prawie 100 lat temu odkrył Barkhausen i od nazwiska tego odkrywcy przyjęto nazywać je efektem Barkhausena. Jeżeli teraz powiązać taką możliwość pomiarową z zależnością od jakości i ilości defektów struktury występujących w magnesowanym materiale, można uzyskać jakościowo zależny od charakteru struktury badanego materiału, sygnał pomiarowy. Pewnym ograniczeniem jest sam charakter systemów detekcyjnych wykorzystujący zjawisko Faradaya, w konfrontacji z dużą ilością lokalnych, możliwych do rejestracji przeskoków granic domenowych w trakcie procesu magnesowania. Praktycznie, dla rzeczywistych materiałów konstrukcyjnych, niemożliwe jest zarejestrowanie pojedynczych impulsów związanych z elementarnym skokiem granicy domenowej. Praktyka pomiarowa pokazuje, iż to co udaje się rejestrować to superpozycja dużej ilości zmian strumieni pola magnetycznego od elementarnych skoków granic domenowych. Stanowi to poważny problem w ilościowym opisie zjawiska, jednak nie dyskredytuje takiej metody pomiarowej wykorzystywanej jako technikę pomiarów porównawczych. Typowe układy pomiarowe mojej konstrukcji, charakteryzują się zdolnością rozdzielczą pojedynczych impulsów napięciowych na poziomie $5\mu\text{s}$. Oznacza to ograniczenie górnej częstotliwości rejestrowanych impulsów efektu Barkhausena na poziomie do 200kHz. Klasyczny efekt Barkhausena posiada jeszcze jedną ważną cechę związaną z jego naskórkowością. Oznacza to, że impulsy napięciowe, które jest w stanie rejestrować cewka pomiarowa pochodzą tylko z warstwy wierzchniej przemagnesowanego materiału. Optymistycznie szacuje się, że taką metodą można rejestrować lokalne, skokowe zmiany strumienia pola magnetycznego pochodzące z maksymalnej głębokości ok. 0,5 mm magnesowanego ferromagnetycznego materiału. Jest to jedna z najważniejszych cech zjawiska, dokładnie pozycjonująca jego możliwe wykorzystanie w dziedzinie badania materiałów. Ograniczenie co do naskórkowego charakteru możliwości pomiarowych, z jednej strony jest poważnym ograniczeniem tej techniki w zakresie objętościowego badania materiałów z drugiej zaś jest unikalnym narzędziem umożliwiającym dokładne badanie powierzchni i warstwy przypowierzchniowej. Jak wspomniano na wstępie, struktura magnetyczna ferromagnetyków jest określana między innymi przez właściwości magnetoelastyczne bezpośrednio związane ze zjawiskiem makroskopowo określanym jako magnetostrykcja. Właściwość ta jest szczególnie istotna dla struktury domenowej i dla granic domenowych nie-180 stopniowych. Najprościej ujmując związek magnetostrykcji ze struktura

domenową oznacza, że kierunki namagnesowania domen skorelowane są z kierunkami zmian ich rozmiarów geometrycznych. Dla żelaza, na przykład, stałe anizotropii magnetoelastycznej są dodatnie i oznacza to, że obszar namagnesowany w danym kierunku jest też w tym samym kierunku dłuższy od obszaru nienamagnesowanego lub od obszaru namagnesowanego prostopadle do tej orientacji. Typowy przykład, ilustrujący zależność zmian geometrycznych ze względu na zamiany pola magnetycznego zewnętrznego zaprezentowałem na rysunku 1.



Rysunek 1. Magnetostrykcyjne zmiany geometrii domen magnetycznych dla prostopadłych kierunków magnesowania λ - stała magnetostrykcji, ν - współczynnik Poissona dla magnetostrykcji, zwykle przyjmuje się równy 0,5.

Jeżeli teraz do tego zjawiska dodamy fakt skokowej reorganizacji struktury domenowej pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego otrzymujemy, w pewnej części, efekt przemagnesowania związany jednocześnie z lokalnymi zmianami geometrii. Oznacza to, że podczas przemagnesowania materiału ferromagnetycznego, skokowy ruch granic nie-180 stopniowych, oprócz lokalnych zmian strumienia pola magnetycznego generuje również lokalne zmiany objętości czyli lokalną generację chwilowych zmian geometrii i propagację zaburzenia elastycznego. Powstaje zatem fala mechaniczna wędrująca od źródła, czyli lokalnej zmiany namagnesowania związanego z przemieszczaniem granic nie-180 stopniowych. Zjawisko to zostało określone jako akustyczna odmiana efektu Barkhausena i może być rejestrowane przez przetworniki piezoelektryczne, znajdujące się w bezpośrednim kontakcie z przemagnesowanym materiałem. Podstawową cechą takiego sygnału jest fakt jego swobodnego przemieszczania wewnątrz magnesowanego materiału. Oznacza to tym samym, że uzyskujemy możliwość rejestracji sygnału akustycznego efektu Barkhausena z całej objętości przemagnesowywanego materiału. Jeżeli dodamy jeszcze fakt, iż domeny nie-180 stopniowe tzw. domykające usytuowane są zazwyczaj na granicy ziaren, to uzyskujemy możliwość, ze względu na wrażliwość ruchu granic domenowych na charakter struktury materiału, nieniszczącego monitorowania zmian w obszarach granicznych, które to szczególnie wrażliwe są na procesy

degradacji i starzenia. Ważnym elementem wyróżniającym jeszcze technikę pomiaru akustycznego efektu Barkhausena jest właśnie jej wybitnie nieniszczący charakter. Te czynniki spowodowały moje intensywne zaangażowanie w proces projektowania oraz tworzenia aparatury kontrolno pomiarowej, która może być wykorzystana w dziedzinie pomiarów akustycznej emisji Barkhausena, i jej wtórne wykorzystanie w dziedzinie określania i monitorowania, w sposób nieniszczący, zmian strukturalnych w konstrukcyjnych materiałach ferromagnetycznych. Ze względów praktycznych, przez fakt takiego samego źródła generującego klasyczny i akustyczny efekt Barkhausena, konstruowane przeze mnie aparatura ma zazwyczaj charakter modułowy, umożliwiając tym samym pomiary obu zjawisk. Tego typu rozwiązania konstrukcyjne zostały, w dużej części swojego zastosowania, wykorzystane w dziedzinie badania materiałów wykorzystywanych w szeroko pojętym przemyśle energetycznym. Dość często jednak przemysł energetyczny wykorzystuje również materiały konstrukcyjne niemagnetyczne. W przypadku takiego typu materiałów zastosowanie technik związanych z efektem Barkhausena jest niezasadne i praktycznie niemożliwe. Jednak zmienne pole magnetyczne może również oddziaływać z takimi materiałami ze względu na wytwarzane w nim podczas przemagnesowania prądy wirowe. Aby w mojej działalności konstruktorskiej i projektowej nie być bezsilny w przypadku badania takich materiałów, a jednocześnie pozostać w zakresie badań z wykorzystaniem zmian pola magnetycznego, zaprojektowałem i zbudowałem system pomiarowy służący do pomiarów prądów wirowych, który wyposażony został w autorskie rozwiązanie sondy pomiarowej oraz układ analizy sygnałów pomiarowych. Nowatorskie, w tym zastosowaniu technik prądów wirowych, było jej wykorzystanie w dziedzinie badania jakości materiałów przewodzących niemagnetycznych, głównie austenitycznych. Aby nadmiernie nie rozszerzać wątku badań magnetycznych w tym obszarze w niniejszym opracowaniu skupię się tylko na zjawiskach magnetoelastycznych występujących w materiałach konstrukcyjnych i efektach wykorzystania urządzeń pomiarowych mojego pomysłu i konstrukcji w zakresie ich badania. Podsumowując zatem ten wstęp zaprojektowałem i skonstruowałem szereg urządzeń pomiarowych, które były i są nadal wykorzystywane w dziedzinie badania jakości, stopnia degradacji stali magnetycznych i niemagnetycznych oraz urządzenia wykorzystywane do wyznaczania wielkości naprężenia w konstrukcjach wykonanych z materiałów ferromagnetycznych. Niniejszy przewodnik przedstawia efekty wykorzystania moich urządzeń i technik pomiarowych w dziedzinie badań nieniszczących, prezentując ich skuteczność i szerokie spektrum zastosowania.

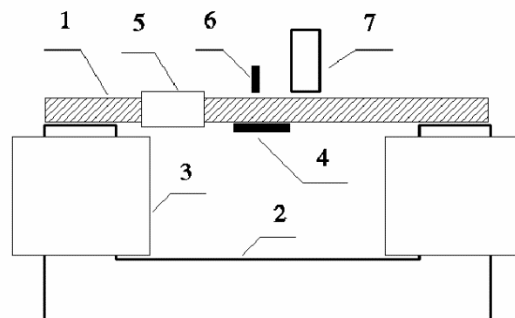
3. Wykorzystanie techniki pomiarów natężenia emisji akustycznego efektu Barkhausena

Rozpoczynając współpracę z Southwest Research Institute podjąłem się zadania opracowania zaprojektowania i skonstruowania zestawu urządzeń pomiarowych, które mogłyby być wykorzystane w dziedzinie nieniszczących, strukturalnych badań materiałów. Głównymi elementami przewidzianymi do badań miały być elementy wykonane z materiału ferromagnetycznego, wykorzystywane na systemy transportu pary świeżej i wtórnej elektrowni konwencjonalnych. Ze względu na ten typ materiału oczywistym stał się pomysł, aby do tego celu wykorzystać pomiary właściwości charakterystycznych dla stanu ferromagnetycznego. Dodatkowym czynnikiem wskazującym na słuszność takiego wyboru, było moje doświadczenie w projektowaniu i budowaniu układów magnesujących i systemów pomiarowych kwantyfikujących właściwości magnetoelastyczne. Związane było to z wcześniej realizowanym projektem badawczo rozwojowym, który miał wykazać przydatność pomiarów klasycznego efektu Barkhausena do celu określenia stanu naprężenia w okolicy złącza spawanego. W ramach tego projektu zaprojektowałem i skonstruowałem szereg urządzeń służących do pomiarów tego zjawiska i dzięki temu nabyłem właściwego doświadczenia w tym zakresie. Jednocześnie, aby rozpocząć komercjalizację takiego rozwiązania założyłem w roku 1995 firmę Mag-Lab s.c., która przejęła zadania związane z procesem produkcji urządzeń mojej konstrukcji. Potrzeba badań jakości materiałów ferromagnetycznych zmieniła, a właściwie utworzyła nowy kierunek moich działań konstrukcyjnych i badawczych w dziedzinie metrologii i wykorzystania pomiarów własności magnetoelastycznych. Jednak ze względu na modularność projektowanych przeze mnie systemów, większość urządzeń posiadała zdolność pomiarową w zakresie i klasycznego i akustycznego efektu Barkhausena. Aby syntetycznie przedstawić możliwości pomiarowe i efekty wykorzystania moich układów pomiarowych, w pierwszej kolejności przedstawię zestawienie artykułów prezentujących wykorzystanie własności magnetoelastycznych w dziedzinie badania jakości materiałów.

3.1. Badania możliwości systemu pomiarowego wykonane dla materiału 15H11MF [G1]

W publikacji poświęconej prezentacji możliwości metrologii właściwości magnetycznych z wykorzystaniem mojego układu pomiarowego, kolejno przedstawiony został aspekt istotności takich badań, oraz opis parametrów konstrukcyjnych mojego układu pomiarowego. Prezentowany system pomiarowy składał się zasadniczo z dwóch głównych części. Pierwsza to U-kształtny układ magnesowania, który umożliwiał pomiar na płaskich próbkach o rozmiarach 89x30x6mm. Półka umieszczona na takim układzie magnesującym była przygotowana do pomiarów trzech zjawisk z zakresu właściwości magnetoelastycznych. Za pomocą naklejonego tensometru oporowego możliwy

był pomiar magnetostrykcji w funkcji zmieniającego się pola magnetycznego, cewka obwodowa, składająca się ze 100 zwojów drutu nawojowego umożliwiała rejestrację impulsów napięciowych klasycznego efektu Barkhausena. Natomiast impulsy akustycznego efektu Barkhausena rejestrowane były za pomocą skonstruowanego przez mnie przetwornika piezoelektrycznego z wbudowanym przedwzmacniaczem. Układ wzmacniacza prądowego sterowany analogowym generatorem przebiegów liniowych i umożliwiał generowanie pola magnetycznego w zakresie częstotliwości od 20mHz do 3,3 Hz. Analogowy układ pomiarowy wyposażyłem w szereg kanałów umożliwiających pomiar wszystkich, przewidzianych sygnałów, ich digitalizację i zapis w wersji cyfrowej. Sygnał klasycznego efektu Barkhausena filtrowany był za pomocą regulowanego filtra dolno i górnoprzepustowego umożliwiającego skokowo ustawienie granicznych wartości częstotliwości odcięcia w zakresie od 5kHz do 200kHz. Układ wzmacniaczy analogowych pozwalał na regulację wzmocnienia toru pomiarowego od 40dB do 80dB. Dla akustycznego efektu Barkhausena pasmo częstotliwości przenoszenia układu pomiarowego ustalone zostało sztywno na zakres od 40kHz do 1MHz, zakres został ustalony ze względu na częstotliwością rezonansową przetwornika piezoelektrycznego, która wynosiła ok. 200kHz. Całkowite wzmocnienie toru pomiarowego akustycznego efektu Barkhausena wynosiło 110dB. Układ do pomiaru odkształcenia oparty o tensometrię oporową, wykorzystywał tensometr o oporze początkowym 350 om i pracował w konfiguracji ćwierć mostkowej. Całkowite wzmocnienie toru pomiaru odkształcenia wynosiło 80dB. Model blokowy części pomiarowej urządzenia wykorzystany w publikacji pokazano na rysunku 2.



Rysunek 2 . Schemat układu magnesującego próbkę: 1 – próbka, 2 - rdzeń magnesujący, 3 – cewki magnesujące, 4 – mostek magnetostrykcyjny, 5 – cewka obwodowa, pomiarowa, 6 – przetwornik Halla, 7 – Sonda MAE.

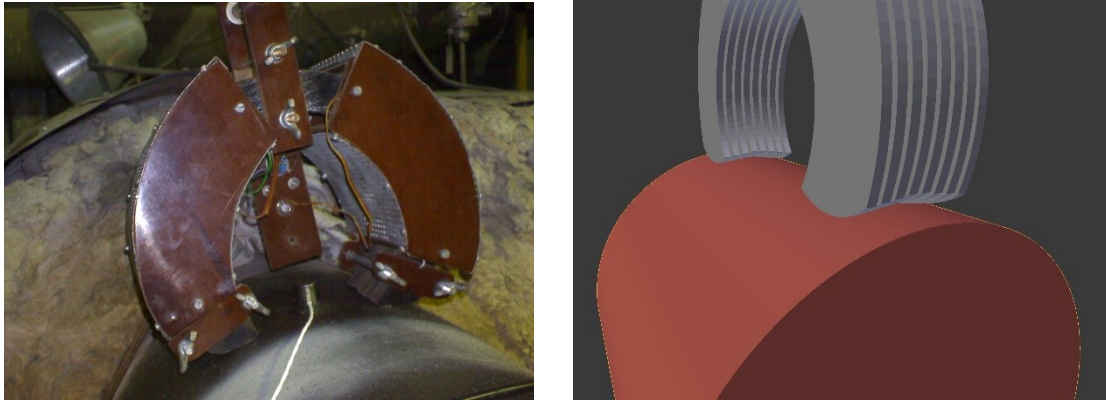
Tak zaprojektowany układ współpracował z częścią przetwarzającą sygnały pomiarowe, który posiadał możliwość analogowego przetwarzania sygnałów pomiarowych klasycznego i akustycznego efektu Barkhausena, wykorzystując do tego celu układy całkujące oraz elementy przetwarzające napięcie zmienne na napięcie skuteczne stałe typu RMS (Root Means Square). W czasie realizacji tego

projektu systemy sygnałowego przetwarzania analogowo cyfrowego były bardzo kosztowne i trudno dostępne. Dlatego też proces przetwarzania sygnału dla potrzeb jego analizy intensywnie wykorzystywał technikę analogową. Układ przetwornika analogowo cyfrowego wykorzystywanego w tym systemie pomiarowym umożliwiał przetwarzanie z 12 bitową rozdzielczością, wykonywaną z maksymalną szybkością 10kHz, maksymalnie ośmiu kanałów pomiarowych. Tak zaprojektowany układ pozwalał na rejestrację następujących wielkości pomiarowych: napięcia proporcjonalnego do prądu płynącego w układzie magnesującym, zmianę strumienia pola magnetycznego w cewce pomiarowej klasycznego efektu Barkhausena, napięcie proporcjonalne do odkształcenia magnetostrykcyjnego badanego materiału, napięcie skuteczne szumu akustycznego efektu Barkhausena, napięcie proporcjonalne do natężenia klasycznego efektu Barkhausena oraz napięcie związane z pomiarem indukcji pola magnetycznego realizowanym za pomocą przetwornika wykorzystującego efekt Halla. W artykule zaprezentowano wyniki pomiarowe, uzyskane przy badaniach próbki wykonanej ze stali 15H11MF i wykazano szereg zależności pomiędzy uzyskanymi wielkościami pomiarowymi. Na szczególną uwagę zasługuje analiza porównawcza wykazująca zbieżność pomiędzy pochodną zmiany strumienia pola magnetycznego w cewce pomiarowej otaczającej materiał badany, a charakterem rozkładu maksimum natężenia klasycznego efektu Barkhausena oraz pomiędzy pochodną rejestrowanych zmian magnetostrykcyjnych, a napięciem skutecznym akustycznego efektu Barkhausena. Związek ten był zgodny z postulowanym przez współautorów, modelem zjawiska akustycznego i klasycznego efektu Barkhausena oraz potwierdzał opisane we wcześniejszych publikacjach zależności. Stanowiły one dobry prognostyk do wykorzystania takich pomiarów w dziedzinie badań jakości struktury ferromagnetycznych materiałów konstrukcyjnych, wskazując tym samym na bezpośrednią możliwość wykorzystania pomiarów akustycznego efektu Barkhausena dla potrzeb objętościowej analizy stopnia degradacji stali.

3.2. Testy autorskiego systemu pomiarowego zastosowanego dla rur grubościennych wykorzystywanych w elektrowniach konwencjonalnych jako rurociągi pary świeżej [G2]

Jedno z pierwszych praktycznych zastosowań zaprojektowanej i skonstruowanej przez mnie aparatury pomiarowej miało miejsce w 2000 roku i odbyło się na terenie Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej. Urządzenie, skutecznie wykorzystane dla potrzeb analizy stopnia degradacji stali chromowo molibdenowej wykorzystywanej do budowy rur pary świeżej w elektrowni węglowej, jako źródła informacji na temat jakości badanego materiału wykorzystywało zjawisko akustycznego i klasycznego efektu Barkhausena. Takie badania możliwe były dzięki współpracy z jednostką badawczą SouthWest Research Institute (SWRI) z San Antonio. Celem takiego przedsięwzięcia było

zweryfikowanie możliwości skutecznego wykorzystania techniki pomiaru akustycznego efektu Barkhausena w zakresie badań jakości rurociągów pary świeżej elektrowni konwencjonalnej. Wiadomym było, że w trakcie procesów degradacyjnych stali chromowo molibdenowej, zmiany w mikrostrukturze powodują dyfuzję defektów sieci krystalicznej w tym i wakansów w kierunku granic ziaren i łączenie ich w skupiska przy czym te drugie w konsekwencji mogą generować pustki. Podobnie w procesach degradacyjnych wydzielenia z obszaru ziaren wędrują w kierunku granic i koagulują w większe granule. Takie procesy stanowią bezpośrednią przyczynę osłabienia struktury materiału i powodują, ze względu na wysokie ciśnienie medium podróżującego takim rurociągiem, późniejsze konsekwencje pod postacią utraty ciągłości elementu, co w przypadku instalacji elektrowni może stanowić bardzo poważne zagrożenie z olbrzymimi konsekwencjami ekonomicznymi i bezpośrednim zagrożeniem życia ludzkiego. Klasyczne metody nieniszczących badań materiałów niestety, w przypadku techniki replik, ograniczają się tylko do powierzchni lub jak w przypadku ultradźwięków wykrywane są mikropęknięcia, które charakteryzują ostateczny, tuż przed makro pęknięciami stan degradacji materiału. Dlatego też, tak obiecujące było zastosowanie techniki wykorzystującej akustyczny efekt Barkhausena, który wywodzi się bezpośrednio z właściwości magnetoelastycznych związanych z ruchem granic domenowych nie-180 stopniowych. Wykazują one bardzo silną zależność, przez proces kotwiczenia, z wszelkimi zmianami występującymi na granicy ziaren. Proces ten uruchamiany zmianą pola magnetycznego, właśnie przez właściwości magnetostrykcyjne generuje fale mechaniczne w szerokim zakresie widmowym i może być skutecznie rejestrowany przez czułe mikrofony, wykorzystujące jako podstawę swojej działalności właściwości piezoelektryczne. Wpływ degradacji materiału ferromagnetycznego na właściwości, a zwłaszcza intensywność zjawiska akustycznego efektu Barkhausena, został przewidziany i opisany w innych pracach modelowych współautorów tej publikacji. Największym wyzwaniem związanym z wymyśleniem i zaprojektowaniem układu pomiarowego, służącego do jednoczesnego pomiaru klasycznego i akustycznego efektu Barkhausena był fizyczny rozmiar badanych elementów. Rurociągi pary świeżej należą do grupy rur ze szwem o średnicy zewnętrznej rzędu 460mm i grubości ścianek w zakresie 70mm. Geometria ta, ze względu na konieczność efektywnego magnesowania całego przekroju rury, zmusza do wykorzystania odpowiednio dużego układu magnesowania o wydajnym układzie zasilania i właściwego dopasowanego do tej geometrii, sterowania prądem. Dodatkowo ze względu na nieregularne kształty magnesowanych elementów, powinien on posiadać możliwość samo dopasowywania się do ewentualnej krzywizny powierzchni badanego rurociągu. Do tego celu zaprojektowałem i zbudowałem elektromagnes, którego zdjęcie prezentuje fotografia na rysunku 3.



Rysunek 3. Elektromagnes wykorzystywany do magnesowania rurociągów pary świeżej, elektrowni węglowej, zdjęcie rzeczywiste w lewej części rysunku, schemat funkcjonalny z prawej części

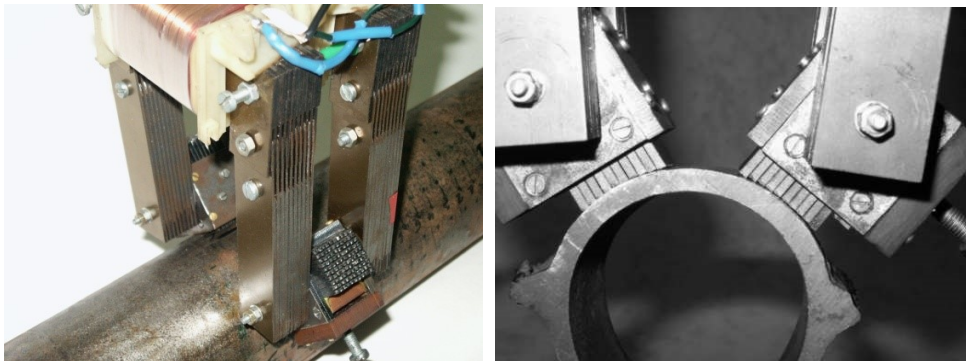
Dla potrzeb budowy elektromagnesu zastosowałem blachę krzemową wykorzystywaną w transformatorach toroidalnych o średnicy zewnętrznej 250mm, ułożoną w stos o grubości 150mm, przez wycięcie części pierścienia, uformowanych w kształt litery C (szare elementy widoczne na schemacie w prawej części rysunku 3). Ruchome blachy w „C” kształtnym elektromagnesie, umożliwiały adaptacje do krzywizny badanej powierzchni i pozwoliły na maksymalizację efektywności procesu magnesowania fragmentu rurociągu. Uzwojenia prądowe wytwarzające pole magnetyczne umieszczone były ruchliwie na rdzeniu i dzięki śrubowym zaciskom usztywniającymi ułożenie blach rdzenia elektromagnesu, mogły być również blokowane. Taki układ magnesujący zasilany był zaprojektowanym i zbudowanym przeze mnie dedykowanym wzmacniaczem prądowym o mocy szczytowej równej 200W, sterowany układem generatora przebiegów liniowych również mojego autorstwa. Blok pomiarowy akustycznego efektu Barkhausena, również wymagał bardzo szczególnego podejścia i to od poziomu dedykowanego układu czujnika rezonansowego emisji akustycznej. Ze względu na fakt, że przewidywano możliwość wykonywania pomiarów w trakcie procesów eksploatacyjnych rurociągów pary świeżej czyli inisi tu na instalacji elektrowni, konstrukcja takiego przetwornika powinna gwarantować odporność na wysoką temperaturę. Maksymalna wartość temperatury rurociągu pary świeżej w instalacji energetycznych może osiągnąć nawet 550°C. Aby w trakcie pomiarów nie uszkodzić elementu detekcyjnego sondy przetwornika, został on umieszczony na specjalnie do tego celu wytopionym rdzeniu ze szkła kwarcowego. Taki izolacyjny fałowód umożliwiał wykonywania pomiarów na gorącym rurociągu tylko w krótkich przedziałach czasu. Aby w sposób skuteczny wykonywać pomiary emisji akustycznej, sonda pomiarowa została wyposażona we wbudowany przedwzmacniacz szerokopasmowy o wzmocnieniu 40dB. Pozwoliło to wykorzystać długie przewody podłączeniowe pomiędzy sondą pomiarową, a układem końcowego kondycjonowania sygnału, nie powodując tym samym dużych strat jakości rejestrowanego sygnału.

Układ kondycjonujący klasyczny efekt Barkhausena, umożliwił filtrowanie i odcinanie górnego i dolnego zakresu pasma częstotliwości za pomocą dwubiegunowych aktywnych filtrów Butterforda. Następnie sygnał był wzmacniany regulowanym wzmacniaczem napięciowym. Całkowite wzmocnienie w tak zaprojektowanym torze pomiarowym wynosiło 120dB, dla toru pomiarowego emisji akustycznej, i 80dB dla toru pomiarowego klasycznego efektu Barkhausena. Tak uzyskane sygnały, w dalszej części urządzenia poddawane były obróbce umożliwiającej wyznaczenie skutecznych wartości chwilowych sygnałów napięciowych efektu Barkhausena formowanych za pomocą układów typu RMS o odpowiednio dobranych stałych czasowych całkowania. Dodatkowym sposobem przetwarzania sygnałów napięciowych była ich amplitudowa analiza za pomocą układu komparatorów i układów przerzutników monostabilnych, pozwalając uzyskać sygnał proporcjonalny do szybkości zliczania impulsów. W ten sposób uzyskiwano dodatkową charakterystykę, opisującą impulsy akustycznego efektu Barkhausena umożliwiającą ich dokładniejszą charakterystykę. Takie sygnały uzupełnione były o dokładną rejestrację kształtu prądu magnesowania oraz wartości zmiany strumienia pola magnetycznego indukowanego w dodatkowym uzwojeniu umieszczonym na rdzeniu magnesującym. Ten ostatni był wykorzystywany jako sygnał kontrolny i umożliwił dokładne dopasowanie kształtu elektromagnesu do badanej powierzchni. Proces ten weryfikowano przez różne ustawienia magnesu, które miało spowodować powstanie maksymalnej wartości napięcia indukowanego w tej cewce. Wszystkie sygnały digitalizowano za pomocą przetworników analogowo-cyfrowych o 12 bitowym zakresie przetwarzania i całkowitej szybkości próbkowania na poziomie 100kHz. Urządzenie obsługiwane było za pomocą mikrokomputera z dedykowanym oprogramowaniem mojego autorstwa, umożliwiającym bezpośrednią wizualizację danych pomiarowych oraz ich późniejszą rejestrację. Taki zestaw pomiarowy umożliwił przebadanie fragmentu (800mm) rurociągu pary świeżej o zmiennym poziomie degradacji, którego obrazem ostatnim stadium uszkodzenia struktury było fizyczne pęknięcie. Do celów charakterystyki zmian struktury badanego elementu wykorzystano jednocześnie zjawiska klasycznego efektu Barkhausena oraz akustycznego efektu Barkhausena. W artykule jednak skupiono się głównie na wynikach pomiaru akustycznego efektu Barkhausena i zaprezentowano przykłady połówek pełnego cyklu pomiarowego chwilowego natężenia, zarejestrowanych efektu, dla skrajnych punktów pomiarowych. Zilustrowano tym samym fakt efektywnego zmniejszenia tej wielkości dla pomiarów wykonanych w obszarach o większym stopniu degradacji. Charakterystykę sygnałów pomiarowych uzupełniono o dokładne przedstawienie zmian maksymalnych wartości obwiedni natężenia akustycznego efektu Barkhausena wykazując tym samym jego monotoniczną zmianę, zmniejszenie wraz z pomiarami wykonanymi w coraz mniejszej odległości od fizycznego pęknięcia na fragmencie rurociągu. Dodatkowo wykazano zmianę lokalizacji, względem wartości prądu magnesowania, maksimum natężenia obwiedni efektu skorelowanego ze wzrostem stopnia degradacji. Zauważono, że obniżenie

natężenia emisji akustycznego efektu Barkhausena, połączone jest z przesunięciem jego maksymalnej wartości w obszar większych wartości pola magnetycznego. Fakt ten jest zgodny z modelem zjawiska, zakładającym zwiększanie efektywności blokad granic domenowych na granicy ziaren wynikającym z rozrostu wydzielań i ewentualnym powstawaniem pustek w tej strefie. W podsumowaniu artykułu wskazano na potencjalnie ogromne możliwości zastosowania zjawiska emisji akustycznej w dziedzinie badania jakości materiałów ferromagnetycznych. Wskazano również na podobny charakter wyników uzyskanych na innych przebadanych materiałach o innych rozmiarach. Wskazano na wyjątkowy charakter możliwości wykorzystania takiego pomiaru, zwłaszcza ze względu na unikalny objętościowy charakter badania. Tak zaprojektowane urządzenie, skutecznie zostało wykorzystane w pomiarach weryfikujących uzyskaną tendencję zmian sygnału akustycznego efektu Barkhausena w latach następujących.

3.3. Zbadanie możliwości wykorzystania systemu pomiaru akustycznego efektu Barkhausena dla potrzeb diagnozowania rur cienkościennych [G3][G4].

W 2002 roku opublikowany został artykuł, ponownie prezentujący efektywność wykorzystania techniki pomiaru akustycznego efektu Barkhausena w przypadku badań rur wymiennika ciepła w elektrowniach węglowych. Dla potrzeb takich badań skonstruowałem specjalny układ magnesujący, umożliwiającym poprawę efektywności magnesowania rur wymiennika ciepła. Zaprojektowany i zbudowany przeze mnie układ magnesowania prezentuję fotografia 2.



Rysunek 4. Elektromagnes wykorzystywany do magnesowania rur wymiennika ciepła z możliwością adaptacji do dowolnej krzywizny i orientacji badanego elementu.

Elektromagnes ten wyróżniała konstrukcja nabiegowników, składająca się z ruchomych prętów o przekroju kwadratowym o boku długości 2mm. Pojedynczy nabiegownik tworzyło 100 takich prętów, tworząc ruchomą powierzchnię o boku długości 2cm i polu kontaktu równym 4cm^2 , blokowanych w pozycji pomiarowej za pomocą jednej ruchomej przegrody, dociskanej nakrętką motylkową. Tak jak w przypadku badań rurociągów pary świeżej i w tym przypadku ważnym

parametrem umożliwiającym poprawne wykonanie pomiarów była jakość magnesowania, charakteryzowana głównie przez powtarzalność uzyskanego wyniku pomiarowego. W eksperymencie wykorzystano zjawisko klasycznego i akustycznego efektu Barkhausena. Ze względu na typ i jakości uzyskanych sygnałów efekt akustyczny, przez objętościowy charakter badania, wydawał się korzystniejszy. Do potrzeb pomiarowych wykorzystany został, analogiczny do opisywanego wcześniej, układ pomiarowy mojego pomysłu i konstrukcji. Dzięki temu wykonano pomiary kilku zjawisk występujących podczas procesu magnesowania i zestawiono je ze sobą. Materiałami badanymi były fragmenty rurociągów wymiennika ciepła, wykonanego ze stali chromowo molibdenowej wykorzystywane w Polskich elektrowniach węglowych. Ze względu na dużą swobodę w umieszczeniu układu magnesowania względem badanego rurociągu, podstawowym zagadnieniem badawczym było zoptymalizowanie oraz ustalenie sposobu magnesowania badanych rur. Procedura ta polegała na ustawianiu głowicy magnesującej dla różnych kątów pomiędzy ruchomymi nabiegunkami w kierunku obwodowym. Pomiary akustycznego efektu Barkhausena wykonywano na linii pomiędzy biegunami magnesującym, a w przypadku klasycznego efektu Barkhausena ze strony wewnętrznej i zewnętrznej rurociągu. Do tego celu skonstruowałem miniaturową sondę pomiarową klasycznego efektu Barkhausena, umieszczoną na elastycznym ramieniu dodatkowo wyposażoną w wbudowany 40dB przedwzmacniacz. Taka sonda umożliwiła pomiar wewnątrz rurociągu oraz w obszarze pomiędzy biegunami magnesującymi. Wyniki pomiarowe zaprezentowano w postaci znormalizowanej, przy czym akustyczny efekt Barkhausena, unormowany został do swojej największej wartości, natomiast wyniki klasycznego efektu Barkhausena unormowano do największej wartości natężenia zmierzonego dla zewnętrznej powierzchni rurociągu. Uzyskane w ten sposób przetworzone dane przedstawiono na wykresie (FIG.2 publikacja G3). Wskazały one, iż najbardziej efektywny kąt ustawienia układu magnesującego mieścił się w granicach 140 stopni. W analizie wyników wykorzystano scałkowany, sumaryczny sygnał natężenia obu efektów, obliczony dla połowy okresów magnesowania materiału. Dodatkowo wykonano pomiary pola magnetycznego rozproszonego na linii pomiędzy biegunami magnesującymi w celu określenia jakości magnesowania. Uzyskany poziom wyliczonego z pomiarów indukcji pola magnetycznego natężenia pola magnetycznego wynosił 12,5 kA/m. Zauważono przesunięcie ekstremów natężenia pomiaru klasycznego efektu Barkhausena względem górnej i dolnej powierzchni magnesowanej rury. Związane jest to z występowaniem przesunięcia w fazie w rozkładzie chwilowej wartości pola magnetycznego po grubości ścianki magnesowanego rurociągu. Zmiana jakości magnesowania ze względu na grubość obszaru powoduje również przesunięcie w intensywności akustycznego efektu Barkhausena. Jednak ze względu na niewielkie uzyskane przesunięcie oraz fakt, że wartość natężenia klasycznego efektu Barkhausena jest o połowę mniejsza na wewnętrznej części rurociągu od tego samego sygnału zarejestrowanego na zewnętrznej stronie, można oczekiwać, i to co stała się faktem

pomiarowym, zbieżności lokalizacji maksymalnej wartości rejestrowanego sygnału emisji akustycznej z maksymalnym sygnałem klasycznego efektu Barkhausena rejestrowanego na zewnętrznej stronie rurociągu. Drugi eksperyment związany był z wpływem częstotliwości magnesowania i grubości ścianki rurociągu na natężenie akustycznego efektu Barkhausena. Uzyskana zbieżność, pomiędzy wpływem na jakość sygnału, zmian częstotliwości magnesowania oraz zmianami grubości, przy zachowaniu pierwiastkowego, ze względu na częstotliwość, wpływu szybkości magnesowania na natężenie akustycznego efektu Barkhausena jest zgodna z zależnościami sugerowanymi w założeniach modelowych prezentowanych w innych pracach. Ostatnim wynikiem pomiarowym, prezentowanym w zakresie opisywanej publikacji był obraz obwodowego rozkładu natężenia akustycznego efektu Barkhausena uzyskanego z pomiarów, w których kierunek magnesowania był zgodny z kierunkiem osiowym oraz obwodowym. Uzyskano jakościową zbieżność wyników które zostały zaprezentowane na wykresie 4 umieszczonym w publikacji. Podobieństwo to wskazuje jednoznacznie na objętościowy, bez wpływu kierunku magnesowania, charakter badania. Ujawnia tym samym obwodową zmianę stopnia degradacji rurociągu, związanego z kierunkowym oddziaływaniem gazów spalinowych w kotle energetycznym. Strona od ognia wykazała mniejszą wartość natężenia akustycznego efektu Barkhausena, a więc większy stopień degradacji. W podsumowaniu stwierdzono skuteczność działania zaprojektowanego i zbudowanego przez mnie układu pomiarowego, wykorzystanego do celów badania stopnia degradacji rur wymienników ciepła stosowanych w kotłach energetycznych. Zgodnie z założeniami zaproponowano nową technikę, która miała posłużyć do pomiaru stopnia degradacji stali wykorzystywanej w konstrukcji rurociągów wymienników ciepła wykorzystywanych w elektrowniach węglowych.

Kontynuując prace nad praktycznymi zastosowaniami zaprojektowanych i zbudowanych przez mnie systemów pomiaru akustycznego efektu Barkhausena w 2010 roku opublikowany został artykuł, który prezentował możliwości nowo zaprojektowanego i zbudowanego układu do pomiarów akustycznego efektu Barkhausena. Realizacji takiego projektu była możliwa dzięki funduszom uzyskanym w ramach projektu finansowanego przez źródła ministerialne NCBiR. Wyzwanie dotyczyło możliwości zastosowania pomiarów akustycznego efektu Barkhausena do celów określania stopnia degradacji materiałów konstrukcyjnych, wykorzystywanych w przemyśle energetycznym. Głównym celem było zbadanie możliwości wykorzystania takiej oceny dla badań rurociągów pary świeżej elektrowni węglowej. Poligonem doświadczalnym była instalacja pary świeżej Gdańskiej elektrowni węglowej. Materiał wykorzystywany do budowy tego typu rurociągów należał do stali typu 13HMF, która głównie ze względu na wiek instalacji, zastosowana została w tym rozwiązaniu konstrukcyjnym. Badania podzielono na dwa etapy. Pierwszy laboratoryjny, polegał na zbadaniu zmian natężenia emisji akustycznego efektu Barkhausena dla próbek, wyciętych z instalacji elektrowni, w różnym

stopniu degradacji określonym przez czas pracy elementu, z którego wycięto próbkę. Badania te wykazały monotoniczny spadek natężenia akustycznego efektu Barkhausena, wraz z rosnącym czasem eksploatacji danego materiału. Drugim, trudniejszym zadaniem było wytworzenie oraz przetestowanie możliwości zastosowania aparatury pomiarowej akustycznego efektu Barkhausena w przypadku badań wykonywanych w warunkach przemysłowych. Badania tego typu są zazwyczaj związane z poważnymi ograniczeniami technicznymi i logistycznymi. Już sam akustyczny efekt Barkhausena, ze względu na swoją czułość na zakłócenia mechaniczne, jest trudny do zarejestrowania w hałaśliwych warunkach przemysłowych. Dostęp do instalacji pary świeżej też nie jest łatwy, a praktycznie możliwy jest tylko w czasie przestoju remontowego danego bloku elektrowni. Przestój technologiczny wiąże się również z ogromnym natężeniem prac remontowych, realizowanych w tym samym czasie. Włączając do tego jeszcze fakt dużej grubości ścianek rurociągu oraz niekorzystne warunki propagacji fal akustycznych, związanej z swobodnym rozprzestrzenieniem się dźwięku w rurociągach, a co za tym idzie brak fal odbitych mogących korzystnie wpłynąć na jakość rejestrowanego sygnału akustycznego efektu Barkhausena, zadanie to wymagało specjalnego przygotowania. Dla potrzeb magnesowania zbudowałem nową wersję elektromagnesu oraz wydajniejszą wersję wzmacniacza prądowego. Dodatkowo cały tor akwizycji danych pomiarowych został uzupełniony o urządzenie oparte na przemysłowym rozwiązaniu jednostki sterującej firmy ADVANTECH, wyposażonej w szybką analogowo cyfrową kartę pomiarową, umożliwiającą zapis napięciowego sygnału szumowego w zakresie częstotliwości od DC do 10MHz. W praktyce pasmo przenoszenia zostało znacznie ograniczone i mieściło się w zakresie od 120kHz do 1,3MHz (próbkowanie sygnału o częstotliwości 2,6MHz). Zakres taki ustalony został na podstawie pasma przenoszenia przetwornika ultradźwiękowego, który pełnił rolę detektora drgań. Zastosowanym przetwornikiem był produkt firmy PAC, wersja szerokopasmowa WD, którego efektywne pasmo pracy mieści się w zakresie częstotliwości od 60kHz do 1MHz. Analogowy tor pomiarowy, skonstruowany przeze mnie dla potrzeb takiego eksperymentu, charakteryzował się całkowitym wzmocnieniem na poziomie 120dB. Moje rozwiązanie umożliwiło zaimplementowanie zaawansowanego oprogramowania pomiarowo analizującego, głównie opartego o szybką analizę Fouriera, bezpośrednio do jednostki pomiarowej i uzyskanie funkcjonalności przeprowadzania analizy widmowej rejestrowanego sygnału w czasie rzeczywistym. Pozwoliło to w sposób skuteczny wyizolować składniki częstotliwościowe sygnału szumowego akustycznego efektu Barkhausena, bezpośrednio związanego z procesami degradacji. Szczególnie ciekawe było uzyskanie wyników pomiarowych, wskazujących na obecność charakterystycznych składników częstotliwościowych akustycznego efektu Barkhausena w zakresie od 220kHz do 300kHz. Dodatkowym ważnym elementem doświadczalnym w zakresie pomiarów sygnałów szumowych było powiązanie wyników pomiarowych, uzyskanych w warunkach przemysłowych z pomiarami wykonywanymi w warunkach

laboratoryjnych, przy czym te drugie powinny i mają charakter pomiarów kalibracyjnych. O ile filtracja sygnału z zastosowaniem różnych technik, również opisywanych w artykule, może być zastosowana w dowolnej lokalizacji układu pomiarowego, o tyle warunki różnego typu rozpraszania fal akustycznych wymagały dodatkowego pomysłu na określenie współczynnika korekcyjnego. Podstawowa różnica w pomiarach wykonywanych w warunkach laboratoryjnych, a przemysłowych jest związana z rozmiarem badanego elementu. Relatywnie niewielkie próbki wykorzystywane w warunkach laboratoryjnych, gwarantują, poprzez procesy wielokrotnych odbić od powierzchni ograniczających, efektywne wzmocnienie natężenia rejestrowanego sygnału akustycznego efektu Barkhausena. W warunkach przemysłowych, długość dźwiękowodów którymi stają się badane rury, powoduje brak w rejestrowanym sygnale fal odbitych, a co za tym idzie efektywne zmniejszenie natężenia rejestrowanego sygnału. Ze względu, że właśnie intensywność takiego sygnału ma stać się deskryptorem wykorzystywanym do określenia stopnia degradacji, należało wymyślić sposób na uniknięcie nadinterpretacji obniżenia natężenia akustycznego efektu Barkhausena, wynikającego z rozmiaru badanych obiektów, jako zmianę stopnia degradacji badanego elementu. Dla potrzeb takiej techniki korekcyjnej zaimplementowałem w tak skonstruowanym układzie pomiarowym, źródło szumowego sygnału wzorcowego. Do budowy takiego systemu, wykorzystałem miniaturowy kompresor powietrza, połączony z odpowiednio skonstruowaną kątową dyszą o średnicy 0,5mm. Dodatkowa możliwość regulacji szybkości przepływu, umożliwiła elastyczne dopasowanie intensywności tak generowanego sygnału do ustawień wzmocnienia toru pomiarowego. Uzyskano w ten sposób jakościową i ilościową informacje na temat właściwości akustycznych badanego ośrodka oraz uzyskano jednoznaczny wskaźnik korygujący sygnały natężenia akustycznego efektu Barkhausena. W artykule dodatkowo przedyskutowano możliwość wykorzystania transformaty Falkowej dla potrzeb odpowiedniego kondycjonowania sygnałów pomiarowych. Ze względu na to, że nie jestem autorem tej części artykułu pozwolę sobie ją pominąć, wskazując jedynie na dużą skuteczność tej techniki obliczeniowej w zakresie analizy i filtrowania sygnałów pomiarowych.

Podsumowując treści prezentowane w artykule, pomiary i właściwa analiza sygnałów akustycznego efektu Barkhausena wskazały na jednoznaczną przydatność zaprojektowanego i zbudowanego przeze mnie systemu pomiarowego do celu określenia jakości diagnozowanego materiału. System skutecznie przetestowany został w warunkach laboratoryjnych jak i w warunkach przemysłowych. Określono również, skuteczną metodykę postępowania która umożliwiła korelacje wyników laboratoryjnych z badaniami terenowymi.

4. Prezentacja możliwości wykorzystania autorskich systemów pomiarowych w zakresie diagnozowania stanu struktury różnych materiałów ferromagnetycznych.

Kontynuując zagadnienie wykorzystania zjawiska akustycznego efektu Barkhausena, wykonano badania z wykorzystaniem laboratoryjnej wersji mojego urządzenia pomiarowego przeznaczonego do diagnozowania materiałów o różnym stanie mikrostruktury. Celem działań następnych była weryfikacja możliwości wykorzystania pomiarów akustycznego efektu Barkhausena do celów diagnozowania różnych materiałów modelowych i konstrukcyjnych.

4.1. Temperaturowo generowane zmiany mikrostruktury P91 [G5].

Materiał użyty do badań, uzyskano z nowego fragmenty rurociągu grubościennego, wykonanego ze stali typu P91 przeznaczonego do wykorzystywania w elektrowniach węglowych. Ze względu na atrakcyjne właściwości, związane z wytrzymałością na eksploatację w wysokich temperaturach oraz przy dużym ciśnieniu, taki materiał znalazł zastosowanie głównie w systemach przesyłowych pary świeżej. Właściwości takiego materiału bardzo mocno zależą od obróbki termicznej zastosowanej w początkowej fazie jego wytwarzania. Wysokochromowa stal P91 charakteryzują się strukturą martenzytyczną, którą przez procesy austenizacji i odpuszczania można doprowadzić do stanu charakteryzującego się dużą odpornością na proces pełzania. Z racji tego, że proces odpuszczania przebiega w temperaturach bliskich temperaturom procesu eksploatacji, zagadnienie określania stanu początkowego i późniejszego monitorowania stanu takiego materiału jest ważnym tematem w aspekcie bezpieczeństwa procesów eksploatacyjnych. Aby wykazać przydatność pomiaru akustycznego efektu Barkhausena do celów określenia stanu wyjściowego stali martenzytycznej po procesie austenizacji i odpuszczania, do badań przygotowano szereg próbek o różnym stanie struktury. Przygotowano trzy serie próbek wspólnie austenizowanych w temperaturze 1050°C przez 1 godzinę i później odpuszczanych w trzech różnych temperaturach 720, 750, 780°C, w czasie od 15 minut do 4 godzin. Jakość uzyskanej struktury dla każdej próbki weryfikowana była pomiarami twardości oraz pomiarami dyfrakcji rentgenowskiej, gdzie parametrem kontrolnym była szerokość połówkowa rejestrowanych pików dyfrakcyjnych. Obie te wielkości zmieniają się monotonicznie wraz ze zmianą gęstości dyslokacji badanego materiału. Zgodnie też z przewidywaniami, zarejestrowano znaczący i monotoniczny spadek tych wartości wraz z rosnącym czasem wygrzewania oraz ze zmianą temperatury procesu odpuszczania. Uzyskane w ten sposób informacje, potwierdziły jakość uzyskanej struktury badanych materiałów. Tak przygotowany, o właściwościach zdefiniowanych dodatkowymi technikami pomiarowymi, materiał poddany został docelowym badaniom magnetycznym. Wyznaczono przebieg pętli histerezy magnetycznej, zbadano natężenie klasycznego efektu Barkhausena oraz zmierzono amplitudową zależność rozkładu

natężenia akustycznego efektu Barkhausena. Wszystkie te wyniki wspólnie zaprezentowano w artykule, potwierdzając tym samym jakościową i ilościową zbieżność wyników pomiarów własności magnetycznych z pozostałymi technikami pomiarowymi, użytymi do identyfikacji poprawnie uzyskanej struktury wyjściowej badanych materiałów. W pracy przeprowadzoną dokładną analizę możliwych interakcji pomiędzy strukturą badanej próbki, a parametrami sygnału akustycznej emisji Barkhausena wskazując na bardzo ciekawy wpływ fazy martenzytycznej na intensywność tego efektu. Uzyskano jego mocne osłabienie, co może zostać wykorzystane, wraz z pomiarami magnetostrykcji, w zakresie bardzo wydajnej identyfikacji i charakteryzacji tej fazy. Wykazano tym samym wysoką, do celów badania zmian strukturalnych w stali P91, przydatność i skuteczność wykorzystania układów pomiarowych mojego pomysłu i konstrukcji. Wskazano jednocześnie większą przydatność, do celu określenia jakości badanej struktury, pomiaru emisji magnetoakustycznej.

4.2. Plastycznie deformowanych materiałów Fe-Si [G6], Armco [G7], 13HMF, P91, CSN12021 [G8].

Procesy zmęczeniowe i ich konsekwencje są bardzo istotne ze względu na bezpieczeństwo wykorzystania tak obciążanego elementu konstrukcyjnego. Szczególnie istotne są procesy deformacji plastycznej, które w wyniku swojego działania powodują istotne zmiany w gęstości dyslokacji, a te tym samym mogą powodować znaczne osłabienie materiału. W latach 2009 – 2011 zająłem się badaniami możliwości wykorzystania pomiarów właściwości magnetycznych w dziedzinie określania stopnia zmian strukturalnych w materiałach poddanych procesom kontrolowanej deformacji plastycznej. Ze względu na objętościowy charakter pomiarów emisji akustycznej dla potrzeb tego typu badania zaprojektowałem i skonstruowałem dedykowaną aparaturę laboratoryjną, która ze względu na swoją uniwersalność, możliwość jednoczesnego pomiaru klasycznego i akustycznego efektu Barkhausena, została skutecznie wykorzystana dla badania takich materiałów jak: stal elektrotechniczna Fe-2%Si, czeska stal konstrukcyjna CSN12021, żelazo Armco oraz stal wysokostopowa wykorzystywana w przemyśle energetycznym 13HMF. Wyniki badań magnetycznych tych czterech materiałów zostały opisane w niezależnych czterech publikacjach, których jestem współautorem. W przypadku badania stali elektrotechnicznych najbardziej istotną cechą powinien być wąski kształt pętli histerezy magnetycznej, gwarantujący minimalną wielkość strat cieplnych, ten właśnie pomiar był jednym z istotniejszych w zakresie analizy wpływu stopnia deformacji. Zmiany struktury, w tym przypadku, uzyskano za pomocą procesu walcowania na zimno. Dla próbek ze stali krzemowej, w procesach przygotowawczych, wytworzono deformację plastyczną w zakresie od 0 do 8 % i dla tych wartości przeprowadzono badania pętli histerezy magnetycznej, natężenia magnetycznego efektu Barkhausena (MBN) oraz natężenia akustycznego efektu Barkhausena (MAE). Określono pole koercji dla wszystkich próbek wraz z ich początkową przenikalności różniczkową.

Wykazano, co było oczekiwane, wzrost wartości pola koercji wraz ze wzrostem deformacji plastycznej, przy czym parametr ten nasycał się już przy 4% deformacji plastycznej, niemniej nadal miał charakter monotoniczny. Wyznaczona na podstawie pętli histerezy magnetycznej różniczkowa przenikalność magnetyczna początkowa zmieniała się w sposób niemonotoniczny i osiągnęła minimum dla próbek o 2% deformacji. Podobnie niemonotoniczny charakter posiadała charakterystyka natężenia MAE przy czym w zakresie analizy natężenia jak i średniej wielkości impulsów MAE osiągała wartości ekstremalne w zakresie 2% deformacji materiału. Ciekawiej na tym tle wypadły pomiary natężenia MBN które w całym zakresie odkształceń materiału mały charakter monotoniczny, który powyżej 1% deformacji przybiera wręcz charakter liniowy. Niejednoznaczność tak uzyskanych wyników utrudnia podejście modelowe, które mogłoby skutecznie, ilościowo opisać zjawiska występujące w procesie deformacji plastycznej. Nie mniej jednak w pracy przedstawiono również podejście modelowe mające na celu właściwy opis zjawiska MBN oraz MAE. Zastosowany i zaprezentowany przez Sablika model bazujący na zjawiskach histerezowych, jakościowo dobrze poradził sobie z opisem zmian natężenia MBN lecz napotkał dość duży problem z modelowaniem zjawiska MAE, który może wynikać z faktu niezerowych naprężeń początkowych występujących w badanym materiale. Jednak, jakościowa dość dobra zbieżność modelu z wynikami pomiarów powyżej 2% deformacji plastycznej stanowi dobry prognostyk do dalszej pracy nad jej poprawną formułą. Elementem kluczowym w opisie wszystkich zjawisk obserwowanych przy pomiarach pętli histerezy magnetycznej czy też efektów MBN i MAE jest ewolucja gęstości dyslokacji których obecność wpływa, a właściwie decyduje o intensywności wszystkich zjawisk magnetycznych w materiale. Ważnym wnioskiem, wynikającym z publikacji była wysoka czułość pomiarów efektów Barkhausena na zmiany struktury wywołane deformacją plastyczną, które to mogą stać się wydajnym narzędziem, służącym do szeroko pojętej nieniszczącej diagnostyki materiałów wykonanych ze stali elektrotechnicznej. Następnym materiałem testowanym w zakresie przydatności systemu do pomiaru właściwości magnetosprężystych w dziedzinie określenia stopnia deformacji plastycznej była czeska stal konstrukcyjna CSN12021. Przebadano próbki plastycznie deformowane w zakresie od 0 do 18,2%. Na podstawie pomiarów zmian strumienia indukcji pola magnetycznego określono kształt pętli histerezy magnetycznej oraz, wykorzystując stykową sondę pomiarową, zmierzono natężenie MBN. Emisję akustyczną podczas procesu magnesowania rejestrowano za pomocą przetwornika piezoelektrycznego. Analiza pola koercji oraz przenikalności różniczkowej ujawniła podobne relacje jakie uzyskano dla stali elektrotechnicznej z zakresem nasycania powyżej 2% deformacji plastycznej. Aby uzyskać efektywniejszy charakter opisu zmian wprowadzonych przez proces deformacji plastycznej wykorzystano technikę MAT (Magnetic Adaptive Testing). Wyniki uzyskane dzięki zastosowaniu tej techniki ujawniły dużą efektywność w potwierdzeniu monotonicznego charakteru parametrów analizy. Badania akustycznego efektu Barkhausena ujawniły wyraźny dwu pikowy

charakter sygnału, który w zakresie zmiany lokalizacji maksimum lokalnych dobrze koresponduje z parametrem współczynnika koercji pętli histerezy magnetycznej. Szczególnie przydatne wydają się być pomiary maksymalnej wartości natężenia MAE, które odpowiadają charakterowi zmian pola koercji badanych próbek. Ciekawym zadaniem była modyfikacja układu pomiarowego w celu pomiaru MBE. Rozmiar próbki uniemożliwił wykorzystanie sond obwodowych, które skutecznie zostały wykorzystane do wyznaczenia kształtu pętli histerezy magnetycznej. Dlatego też dla potrzeb tego eksperymentu zastosowano sondę stykową, mojej konstrukcji, której głównym elementem był rdzeń ferrytowy o średnicy 1,6mm z nawiniętym uzwojeniem pomiarowym wraz z 40dB wzmacniaczem wstępnym. Takie rozwiązanie pozwoliło na pomiary w wielu (czterech) miejscach magnesowanego materiału. Tak uzyskane wyniki były uśredniane. Zmiany charakteru natężenia MBN ujawniły gwałtowny wzrost amplitudy tego sygnału dla próbki zdeformowanej o 1,9% oraz jego gwałtowne zmniejszenie dla wyższych wartości deformacji. Z punktu widzenia parametru który mógłby opisywać stopień deformacji badanego materiału taka wielkość byłaby bezużyteczna. Jednak, aby określić energię reprezentowaną przez obwiednie natężenia MBN można wykorzystać pole powierzchni pod pętlą natężenia efektu Barkhausena. Zastosowanie takiej formy obróbki wyników pomiarowych, ujawniło monotoniczny malejący charakter tego parametru, co potwierdziło możliwość zastosowania techniki pomiarowej z wykorzystaniem stykowej sondy pomiarowej do celu określenia stopnia deformacji stali. Ciekawostką jest fakt, że podobna analiza wyników pomiarowych uzyskanych przy badaniu zdeformowanej stali elektrotechnicznej dała wynik odwrotny. Ze względu na lokalny charakter pomiarów z wykorzystaniem stykowej sondy pomiarowej, wykonano dodatkowe testy z wykorzystaniem tzw. kompaktowej sondy miernika MEB2c, również mojej konstrukcji. Układ kierunkowego magnesowania takiej sondy umożliwił określenie rozkładu kąтового natężenia MBN ujawniając tym samym złożoną, lokalną strukturę, kierunkowo magnetyczną, związaną zarówno z naprężeniem jak i anizotropią strukturalną. Użycie, w przypadku pomiarów MBN, sondy stykowej różni się od pomiarów z wykorzystaniem sondy obwodowej głównie geometrycznym zakresem uśrednienia uzyskanych wyników. Sonda obwodowa rejestruje sygnał z powierzchni w całym obszarze swojego obejmowania, więc jest mniej czuła na lokalne zmiany strukturalno-naprężeniowe. Aby w to miejsce wprowadzić pomiary z wykorzystaniem sondy stykowej, niewątpliwie potrzebne są pomiary wielokrotne. Z drugiej strony lokalne właściwości materiału też mogą być istotne, dlatego w celu jednoznacznego scharakteryzowania badanego materiału, chociażby kierunku anizotropii magnetycznej czy strukturalnej, pomiarowa sonda stykowa efektu Barkhausena wydaje się być optymalnym rozwiązaniem. W kontekście badań stopnia deformacji plastycznej stali CSN12021 bardziej wartościowe, choćby przez swój objętościowy charakter mają pomiary MAE. Jednoznaczne połączenie wpływu gęstości dyslokacji z minimalnym wpływem wielkości naprężenia, pozwala skutecznie wykorzystać tę technikę w zakresie zrozumienia charakteru zmian dyslokacyjnych

zachodzących w deformowanym materiale, zwłaszcza jeżeli uzupełni się je badaniami natężenia MBN.

Zaawansowany sposób analizy wyników pomiarowych, uzyskanych przy wykorzystaniu systemu do pomiaru klasycznego i akustycznego efektu Barkhausena, opisano w artykule zawierającym wyniki badania próbek stali Armco poddanych procesowi deformacji plastycznej. Podobnie jak w dwóch poprzednich przykładach, do pomiarów wykorzystano zaprojektowany i zbudowany przez mnie system pomiarowy. Próbki Armco zostały przygotowane przez Grecki zespół współautorów w dwojaki sposób. Aby wprowadzić deformacje plastyczną, w badanych materiałach, wykorzystano proces walcowania na zimno oraz deformacje uzyskaną za pomocą maszyny rozciągającej. Próbki deformowane w procesie walcowania zostały wstępnie, przed tym procesem, wygrzane. Zakres wprowadzonych deformacji wynosił od 0 do 10% dla procesu walcowania oraz od 0 do 5% dla procesu rozciągania. W artykule, w sposób syntetyczny przedstawiono wyniki analizy pomiarów dla obu procesów deformacji, wskazując jednocześnie na bardzo duży wpływ typu deformowania próbki na uzyskane wyniki pomiarowe. Próbki deformowane przez proces walcowania ujawniły niemonotoniczny charakter zmian całkowych natężeń sygnałów zarówno MBN jak i MAE, ujawniając również wyraźny dwu pikowy charakter dla obu typów pomiarów. W przypadku deformowania próbek w stanie dostawy, za pomocą procesu rozciągania, wyraźny efekty dwu pikowości ujawniają tylko pomiary natężenia MAE. Natomiast pomiary natężenia MBN maksymalną wartość osiągają tylko w okolicy środkowej części procesu magnesowania, ujawniając również dwa piki, ale o niewielkim polu koercji w porównaniu do analogicznych pomiarów wykonanych dla próbek deformowanych przez proces walcowania. Analiza całkowego natężenia MBN pozwoliła uzyskać monotoniczny charakter zmian tych wartości w funkcji zmiany wielkości deformacji. Taka niejednoznaczna informacja pomiarowa spowodowała zastosowanie dodatkowej zaawansowanej analizy sygnałowej, co w przypadku pomiarów szumowych ma oczywiste uzasadnienie. Po zastosowaniu analizy sygnału z zastosowaniem szybkiej transformaty Fouriera, analizy Falkowej oraz progowej analizy impulsowej udało się uzyskać praktycznie monotoniczne zmiany w funkcji wielkości deformacji dla obu procesów deformowania badanych materiałów. Tego typu zaawansowana analiza ujawniła możliwości wynikające z analizy szumowych sygnałów pomiarowych MBN i MAE, wskazując tym samym ich potencjał w zakresie badania stopnia deformacji wygenerowanych dowolnym typem oddziaływań mechanicznych.

Publikacją zamykającą wątek możliwości określenia wielkości deformacji plastycznej za pomocą pomiarów MBN oraz MAE jest artykuł, w którym zaprezentowano wyniki pomiarów natężenia MAE przy badaniu odkształconych plastycznie próbek stali 13HMF oraz badanych i prezentowanych wcześniej P91, Armco i CSN12021. Próbki z materiału 13HMF pozyskano ze źródeł

IPPT z Warszawy. Typoszereg próbek deformowany był do górnej granicy 20%, ale ze względu na kształt materiału umożliwiającym umieszczenie w maszynie wytrzymałościowej, wymagał adaptacji i dostosowania zaprojektowanego przez mnie układu pomiarowego. Dla potrzeb tego badania wykonano pomiary zmian strumienia pola magnetycznego w magnesowanym materiale, w celu wyznaczenia kształtu pętli histerezy magnetycznej oraz pomiary impulsów akustycznego efektu Barkhausena. Dodatkowym celem opisanym w artykule było wskazanie sposobu wykorzystania pomiarów natężenia MAE do celów jednoznacznego określenia stopnia degradacji badanego materiału, jako uniwersalnego wskaźnika niezależnego od typu badanego materiału. Jak prezentowano, w trzech wcześniej opisanych publikacjach, analiza taka z wykorzystaniem pomiarów natężenia MAE nie zawsze była jednoznaczna. Dlatego też, w pracy zaproponowano i przetestowano uniwersalny deskryptor opisujący pomiary natężenia MAE oraz zweryfikowano jego efektywność dla różnych materiałów i dla różnych warunków pomiarowych. Pomysł aby pomiary natężenia MAE były narzędziem właściwym do określenia stopnia deformacji materiału podyktowany był przede wszystkim objętościowym charakterem badania oraz małą wrażliwością na lokalne właściwości powierzchni badanego materiału. Dla potrzeb eksperymentu zmodyfikowano układ pomiarowy w taki sposób, aby przybliżyć warunki pomiaru do rzeczywistości przemysłowej. Oprócz pomiarów wykonanych w klasycznym układzie tzn. z cewką generacyjną pola magnetycznego obejmującą badany materiał i „U” kształtnym magnetowodem zamykającym strumień pola magnetycznego, wykonano pomiary z pobudzaniem elektromagnesem zewnętrznym, w którym próbka diagnozowana zamykała strumień pola magnetycznego. Miało to na celu przybliżyć ewentualne warunki przemysłowe wykonywania tego typu pomiarów. O ile analiza sygnałów całkowych natężenia MAE nie dała monotonicznych rezultatów wpływu wielkości deformacji plastycznej, to wielkość prądu określająca natężenie pola magnetycznego powiązana z lokalnymi maksimami sygnału natężenia MAE dla pół okresu magnesowania okazała się bardzo dobrym parametrem. W całym zakresie zmian deformacyjnych badanego materiału uzyskano wynik monotonicznej zmiany rosnącej, zgodnie ze wzrostem pola koercji pętli histerezy. Wyniki te zostały potwierdzone dla próbek ze stali P91, Armco i CSN12021. Procedura wyznaczenia pozycji dwóch maksimów w półokresie magnesowania, wykorzystywała dopasowanie krzywymi Gaussa. Aby potwierdzić przydatność takiej procedury w warunkach przemysłowych, nie tylko wykonano analizę przy użyciu dwóch różnych systemów pomiarowych ale przetestowano algorytm w warunkach pogarszającej się jakości powierzchni materiału i w warunkach zwiększonych zakłóceń akustycznych. We wszystkich wypadkach zarejestrowano znaczący spadek intensywności natężenia MAE. Uzyskane w ten sposób wyniki potwierdziły skuteczność wykorzystania pomiarów natężenia MAE do celu określenia stopnia degradacji materiału. Uzyskano w ten sposób potwierdzenie przydatności zaprojektowanego i zbudowanego przez mnie systemu do rejestracji parametrów magnetycznych badanych materiałów.

Wykazano tym samym skuteczność pomiarów zmian strumienia pola magnetycznego wykorzystywanego do wyznaczenia pętli histerezy magnetycznej, impulsów napięciowych klasycznego, magnetycznego efektu Barkhausna wykorzystującego cewki obwodowe i cewki stykowe oraz impulsów napięciowych akustycznego efektu Barkhausena. Wykorzystanie, w tym zakresie badań, zaprojektowanych i zbudowanych przeze mnie wzmacniaczy prądowych mocy okazało się bardzo dobrym rozwiązaniem, gdyż próby z wykorzystaniem fabrycznego wzmacniacza prądowego firmy KEPCO okazały się mocno nieudane. Zastosowane w moich układach systemy przetwarzania sygnału zmiennego na stały typu RMS oraz liczniki impulsów oparte o układy monostabilne umożliwiły skuteczny pomiar wartości szumowych, w późniejszych rozwiązaniach zastąpione one zostały szybkimi kartami pomiarowymi, które dodatkowo, programowo uelastyczniają możliwości pomiarowe oraz umożliwiają analizę wyników pomiarowych w czasie rzeczywistym.

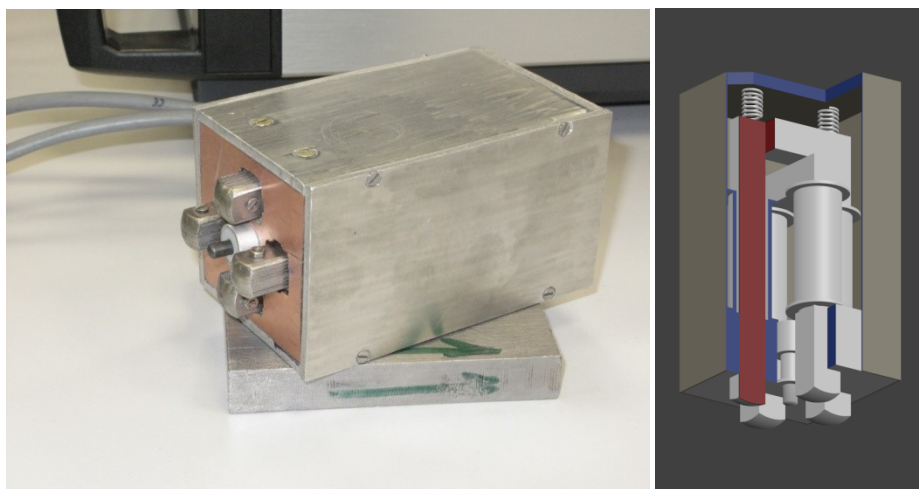
5. Autorskie rozwiązanie systemu klasycznego, magnetycznego efektu Barkhausena do pomiaru wielkości odkształcenia umożliwiające szybkie uzyskanie informacji o rozkładzie kątowym anizotropii magnetycznej, [G9][G10][G11][G12].

Prezentowane do tej pory rezultaty zastosowania urządzeń i systemów pomiarowych w zakresie określenia jakości struktury badanych materiałów wykazały ich wysoką skuteczność, i szczególnie w zakresie akustycznego efektu Barkhausena, jego bezsprzeczną efektywność w dziedzinie możliwych nieniszczących technik badania jakości materiałów ferromagnetycznych. Jednak powodem głównego zainteresowania zjawiskami magnetycznymi, a w szczególności efektem Barkhausena była możliwość jego wykorzystania w dziedzinie określania wielkości odkształceń elastycznych w badanym materiale. Informacja taka, po uzupełnieniu danymi makroskopowymi właściwości materiału, czyli współczynnikami sztywności oraz Poissona, umożliwia wyznaczenie wielkości naprężenia występującego w badanym ośrodku. Temat możliwości wykorzystania zjawiska efektu Barkhausena w zakresie wyznaczania wielkości naprężenia, był i jest jednym z głównych wątków w zakresie opracowywania przeze mnie nowych urządzeń i systemów pomiarowych. Urządzenia, które można by wykorzystać w dziedzinie tych badań, powinny charakteryzować się prostotą obsługi i dużą efektywnością w dziedzinie wyznaczania naprężenia w konstrukcjach stalowych. Zaprojektowany i zbudowany przeze mnie układ pomiarowy do pomiaru natężenia efektu Barkhausena pod nazwą MEB2c stał się flagowym urządzeniem, którego komercjalizację starałem się realizować, tak jak wspomniałem na wstępie, za pomocą utworzonej w roku 1995 firmy. Aby jednak mieć pewność że zaproponowane rozwiązanie zaprojektowanego i zbudowanego urządzenia pomiarowego spełni oczekiwane wymagania, wykonaliśmy pomiary porównujące. Badania obejmowały zastosowanie metody laboratoryjnej opartej o stacjonarne i nieprzenośne układy pomiarowe, która dodatkowo umożliwia określenie pętli histerezy magnetycznej, oraz urządzenia

MEB2C wyposażonego w zintegrowaną głowicę pomiarową, dla w różnym stopniu, badań zdeformowanej stali ARMCO. Miernik MEB2C wyposażyłem w możliwość pomiaru chwilowej wartości skutecznej napięciowych impulsów efektu Barkhausena (V1), ilości impulsów kontrolowanej za pomocą progu dyskryminacji dla pięciu kolejnych cykli magnesowania (Counter) oraz, jako wartości kontrolnej jakości magnesowania, amplitudy zmian strumienia pola magnetycznego w rdzeniu magnesującym (V2). Dodatkowo autorskie rozwiązanie konstrukcyjne sondy pomiarowej umożliwia jej umieszczenie na zakrzywionych powierzchniach. Baza sondy pomiarowej tj. odległość pomiędzy biegunami elektromagnesu sondy wynosi 20mm. Ze względu na przenośny charakter urządzenia, wyposażone jest również w wydajne źródło zasilania umożliwiające 10 godzinną, autonomiczną pracę. Ze względu na punktowy charakter pomiarów z wykorzystaniem miernika MEB2c, miejsca pomiarowe na powierzchni próbek umieszczono z obu jej stron w najbardziej istotnych jej częściach. W środku w obszarze poza uchwytowym oraz w miejscu uchwytu, gdzie materiał nie był deformowany plastycznie. Badania wykazały wysoką czułość tak uzyskanych wyników ze względu na miejsce pomiarowe oraz stronę pomiarową, ujawniając tym samym występującą w badanym materiale anizotropię magnetyczną szczególnie wyraźnie widoczną na wynikach pomiarów parametru V2. Rozrzuty wielkości parametru V1 z obu stron próbek mogą odzwierciedlać faktyczne, lokalne zmiany wielkości odkształcenia widoczne na powierzchni badanego materiału. Może to wynikać z niewielkiej grubości badanych próbek, która może sprzyjać niekontrolowanym procesom późniejszego wygięcia próbek. Kompleksowa analiza, w ten sposób zebranych pomiarów, ujawniła monotoniczną zmianę wartości średnich parametrów V1 i Counter z całej próbki dla obu stron badanego materiału. Te same próbki zostały przebadane z wykorzystaniem sondy obwodowej w laboratoryjnym układzie pomiarowym (opisywanym w części G7) . Dla potrzeb analizy wybrano kształt pętli histerezy magnetycznej, obwiednie natężenia impulsów efektu Barkhausena (EB), oraz obwiednie szybkości zliczania napięciowych impulsów EB dla dwóch progów dyskryminacji. Do celów kwantyfikacji tak uzyskanych wyników wykorzystano pola powierzchni pod krzywymi obwiednich dla połowy okresu magnesowania próbki oraz przenikalność magnetyczną początkową dla wyznaczonych pętli histerezy magnetycznej, dość nieszczęśliwie oznaczonymi jako μm . Porównanie w ten sposób uzyskanych wyników wykazało jednak dość duże różnice w uzyskanych deskryptorach pomiarowych, przy analizie wartości V1 oraz parametrów uzyskanych przy wykorzystaniu układu laboratoryjnego. Pewną zbieżność uzyskano podczas analizy wyników wartości Counter, która podobnie jak parametry pól powierzchni pod krzywymi chwilowego natężenia EB oraz szybkości zliczania impulsów, zmienia się w sposób monotonicznie rosnący dla rosnącej wartości deformacji plastycznej próbek. Przyczyny, dla której nie osiągnięto zbieżności w wynikach wartości skutecznej szumu Barkhausena uzyskanym przy wykorzystaniu miernika MEB2c, szukać należy w charakterze samych układów detekcyjnych. W przypadku sondy obwodowej rejestrowany jest sygnał z

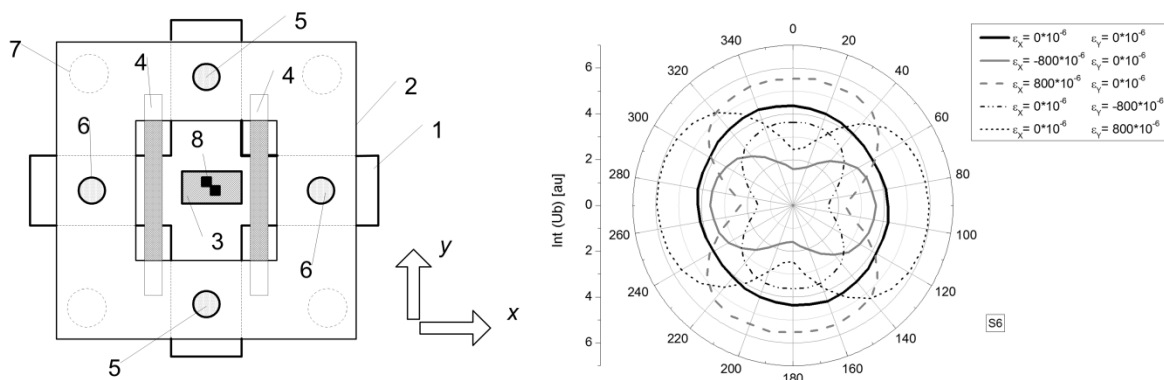
efektywnie dużej, jak na pomiary emisji Barkhausena objętości, natomiast pomiary za pomocą sondy stykowej są pomiarami czysto punktowymi. Efekt takiej rozbieżności można zmniejszyć w momencie, gdy wykonuje się serie pomiarów sondą punktową w różnych miejscach badanego materiału. Ta czułość na lokalne zmiany właściwości magnetycznych oraz kierunkowość badania z wykorzystaniem sondy punktowej mojej konstrukcji, umożliwiła bardzo efektywne jej wykorzystanie do celu określenia wielkości odkształceń oraz następnie do wyznaczenia wielkości naprężenia w badanym materiale. Jednak wykorzystanie takiego typu układu pomiarowego może być nie do końca efektywne zwłaszcza, gdy mamy do czynienia z materiałem wykazującym silne właściwości anizotropowe, spowodowane choćby procesami wytwarzania produktu gotowego.

Problem anizotropii właściwości magnetycznych powoduje konieczność wykonania, w celu dokładnego określenia kąтового rozkładu wielkości naprężenia, wielu kierunkowych pomiarów natężenia impulsów napięciowych efektu Barkhausena. Powoduje to konieczność, w przypadku gdy wykorzystuje się głowicę kontaktową kierunkową, przeprowadzenia czasochłonnych i dość uciążliwych pomiarów w jednym punkcie pomiarowym. Problem ten stał się przyczyną moich prac nad usprawnieniem tego procesu i zaowocował powstaniem unikatowego rozwiązania układu pomiarowego. Jego głównym elementem stała się głowica pomiarowa, składająca się z dwóch prostopadle do siebie ustawionych układów magnesujących umożliwiających kontrolę kierunku magnesowania materiału za pomocą sterowania amplitudą i przesunięciem fazowym prądu magnesującego w każdym z układów magnetowodu. Rysunek 5 prezentuję zbudowaną przeze mnie prototypową sondę wraz z jej przybliżonym schematem konstrukcyjnym.



Rysunek 5. Wygląd rzeczywisty oraz model autorskiego rozwiązania kierunkowej sondy efektu Barkhausena.

Pracę koncepcyjną nad rozwiązaniem technicznym takiego układu pomiarowego rozpocząłem ponad 20 lat temu, ale dopiero możliwość finansowania tych prac z projektu NCBIIR umożliwiła jego finalizację. W założeniach krzyżowy układ magnesowania miał być wykorzystywany nie tylko w laboratorium ale również w warunkach przemysłowych. To oznaczało konieczność skonstruowania układu o odpowiedniej odporności na niesprzyjające warunki pomiarowe jak i na różnorodność w kształtach powierzchni diagnozowanego materiału. Konstrukcja zaprojektowanej i zbudowanej przeze mnie sondy pomiarowej, umożliwiała jej adaptacje nawet na bardzo zakrzywionych powierzchniach. Efekt ten osiągnąłem konstruując układ niezależnie zawieszonych ruchomych układów magnesujących oraz niezależnym, również ruchomym układzie sondy pomiarowej znajdującej się w samym centrum zaprojektowanej głowicy. Własności sondy pomiarowej umożliwia niezależną kontrolę nad jakością i wielkością zmianą strumienia indukcji magnetycznej w każdym z magnetowodów oraz, dzięki wbudowanemu wzmacniaczowi pomiarowemu, niezależność i efektywnie małą czułość na charakter i długość przewodów sygnałowych. Aby w sposób wydajny wykorzystać właściwości takiego układu pomiarowego, skonstruowałem dwa niezależne torry wzmacniaczy prądowych sterowanych za pomocą zaprojektowanych i oprogramowanych arbitralnych generatorów przebiegów liniowych. Wykorzystanie takiego sposobu pobudzania w połączeniu z jego elastycznością w obsłudze programowej, umożliwiła bardzo wydajny i efektywny w czasie sposób kontroli pracy takiego układu. Zaprojektowany w ten sposób układ pomiarowy, skutecznie wykorzystany został dla określenia wielkości naprężenia w izotropowej stali konstrukcyjnej typu S235JR. Próby wykorzystania podobnego systemu do uzyskiwania rozkładu właściwości magnetycznych związanych anizotropią, cytowane we wstępie artykułu, nie powodują powstania magnesowania w charakterze zbliżonym do działania pojedynczego układu magnesującego, przez co bardzo trudno wykazać zbieżność takich wyników z klasycznymi do tej pory wykorzystywanymi technikami pomiarowymi. Zaproponowany i zbudowany przeze mnie układ pomiarowy, w sposób jednoznaczny daje się weryfikować w sposób klasyczny. Prezentowane w artykule wyniki pomiaru rozkładu kąтового natężenia emisji Barkhausena, skutecznie zostały wykorzystane w zakresie określenia płaszczyzn kalibracyjnych wpływu odkształcenia na wielkość sygnału pomiarowego. Pomiary te wykonano na próbce w kształcie krzyża, na specjalnie skonstruowanym urządzeniu do zadawania płaskiego stanu odkształcenia. Poglądowy schemat tego urządzenia wraz z zestawem kilku wyników pomiaru rozkładu kąтового natężenia emisji Barkhausena prezentuje rysunek 6.



Rysunek 6. Układ do kalibracji dwuosiowej oraz przykłady rozkładu kąowego natężenia efektu Barkhausena dla pięciu stanów odkształcenia.

Tak uzyskane wyniki pomiarów kalibracyjnych wykazały izotropowy charakter badanego materiału. Regularny kształt rozkładu kąowego natężenia efektu Barkhausena dla zerowych wartości odkształcenia umożliwił na jednoznaczne przeliczenie kierunkowych pomiarów emisji Barkhausena na wartości odkształcenia, a zaraz potem, przy użyciu elementarnych przekształceń (1) uzyskanie rozkładu wielkości naprężenia w badanym materiale.

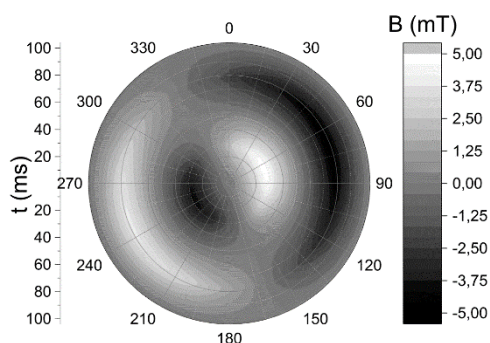
$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y) \quad \sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x) \quad (1)$$

Kluczowym zagadnieniem w opisywanym eksperymencie, było określenie wpływu spoiny na poziom i rozkład naprężenia w badanym elemencie. Dlatego też w do eksperymentu użyto dwie części blachy wykonanej z badanej stali, połączonej w całość za pomocą spoiny. Powstałe w ten sposób złącze wytwarza, właściwy ze względu na przyjętą procedurę łączenia materiału, rozkład naprężenia. Zaprojektowany i zbudowany przeze mnie układ pozwala na wykonie pomiarów rozkładu kąowego natężenia z dowolną rozdzielczością kątową. Dla potrzeb eksperymentu opisywanego w artykule przyjęto krok co 10 stopni, czyli wykonanie 36 pomiarów dla kąta pełnego. Ze względu na możliwość uzyskania w trakcie pojedynczego pomiaru rozkładu natężenia efektu Barkhausena, dla zaprojektowanego układu była to wartość amplitudy obwiedniej sygnału Barkhausena oraz bardziej odporna na zakłócenia, wielkość pola powierzchni pod obwiednią natężenia efektu Barkhausena, można było jednoznacznie wyznaczyć główne osie anizotropii magnetycznej. Do tego celu wykorzystano algorytm Lavenberg-Marquardt'a. Dla potrzeb tego eksperymentu tak uzyskany kierunek wykorzystano do zorientowanego ustawienia sondy oraz uzyskania wyników natężenia efektu Barkhausen dla głównych osi anizotropii magnetycznej wykorzystując magnesowanie za pomocą pojedynczego magnetowodu. Takie badania umożliwiły uzyskanie wyników rozkładu naprężenia efektu Barkhausena w badanym materiale ujawniając tym samym, co było bezpośrednim

celem badania, wpływ spoiny na ich wielkość. Badania przeprowadzono w siatce pomiarowej o rozmiarze 5 na 5 cm przed procesem spawania oraz po jego zaaplikowaniu. Wynik końcowy uzyskano jako różnicę między pomiarami uzyskanymi po procesie a wynikami uzyskanymi przed tym procesem. Tego typu uproszczona procedura, pozwoliła wykazać wysoką przydatność zaprojektowanego i zbudowanego przez mnie urządzenia do celów określania rozkładu naprężenia w badanym materiale.

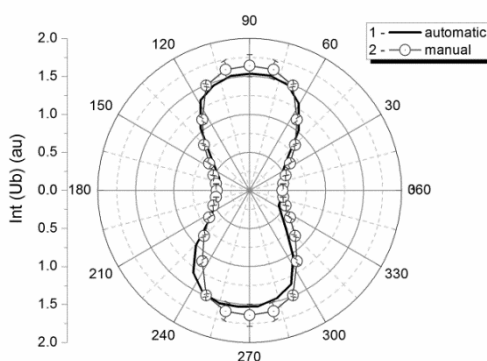
Aby jednak jeszcze efektywniej wykorzystać zaprojektowany układ pomiarowy, podjęłam próbę bezpośredniego zastosowania pomiarów kąтового rozkładu natężenia efektu Barkhausena w przypadku badania materiałów silnie anizotropowych, która głównie związana jest z procesami wytwarzania produktu gotowego. Tego typu materiały stanowią większość występujących na rynku materiałów konstrukcyjnych. Wyzwaniem dla takiego zastosowania było wykazanie, że wyniki pomiarów rozkładu kąтового natężenia efektu Barkhausena uzyskane przy wykorzystaniu mojego układu, z kierunkowym polem magnetycznym wytwarzanym przez dwa wzajemnie prostopadłe układy magnesujące, są identyczne z tymi uzyskanymi w procesie wykorzystującym pojedynczy układ magnesujący w trakcie jego bezpośredniego obrotu. Wyzwaniem dodatkowym ale nie mniej istotnym była weryfikacja czy istnieje skuteczny, matematyczny algorytm, który umożliwiłby bezpośrednie wyznaczenie rozkładu naprężenia z tak uzyskanych wyników. Te zagadnienia zostały zaprezentowane w artykule obszernie zajmującym się szybką procedurą wyznaczania rozkładu naprężenia przy wykorzystaniu mojego układu pomiarowego.

Główną własnością wymagającą jednak potwierdzenia była efektywność wykorzystania mojego układu pomiarowego oraz wykazanie, że wyniki pomiarów emisji Barkhausena uzyskane dla ustalonego kąta przy wykorzystaniu nieruchomych dwóch wzajemnie prostopadłych układów magnesujących są tożsame z wynikami uzyskanymi w przypadku obracanego pojedynczego układu magnesującego. Dla celów takiej weryfikacji, wykonałem pomiary rozkładu kąтового zmian składowej stycznej do powierzchni indukcji pola magnetycznego w obszarze umieszczenia sondy pomiarowej, wykorzystując obrotowy przetwornik Halla. Pomiary te wykonane w powietrzu, potwierdziły charakter kierunkowego rozkładu indukcji pola magnetycznego dla konkretnego sposobu sterowania zasilaniem prostopadłych układów magnesujących. Typowy kątowy rozkład indukcji pola magnetycznego dla jednego cyklu magnesowania ilustruję rysunek 7.



Rysunek 7. Rozkład kątowy indukcji pola magnetycznego dla pojedynczego cyklu magnesowania dla prądów magnesujących w relacji 1 do 2 dla kierunku pionowego.

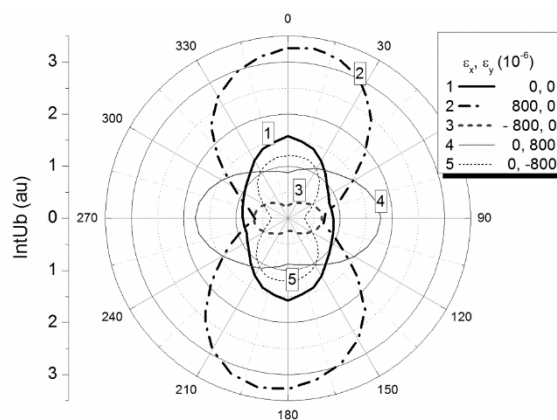
W tym przypadku użyto prądów magnesujących w proporcji 1 do 2, odpowiednio dla kierunku pionowego i poziomego. To kierunkowe potwierdzone działanie sondy pomiarowej należało jeszcze potwierdzić w przypadku badań rzeczywistego materiału. Poważnymi zagrożeniami w poprawnym działaniu takiego rozwiązania były nieliniowe i dodatkowo silnie anizotropowe właściwości magnetyczne badanego materiału. Wykonałem pomiary wykorzystując swoje autorskie rozwiązanie konstrukcyjne, uzyskując wyniki rozkładu kątowego natężenia emisji efektu Barkhausena stosując nieruchomą sondę krzyżową oraz rejestrując ten sam sygnał wtedy gdy wykorzystywany jest tylko jeden układ magnesujący. Kierunek magnesowania ustala się wtedy poprzez fizyczne obracanie sondy magnesującej. Wyniki porównania tak uzyskanych pomiarów przedstawiono na rysunku 8.



Rysunek 8. Porównanie wyników badań dla nieruchomej sondy z dwoma niezależnymi prostokątnymi magnesowaniami oraz pomiarami uzyskanymi przy obracaniu sondy wykorzystując tylko pojedynczy układ magnesujący.

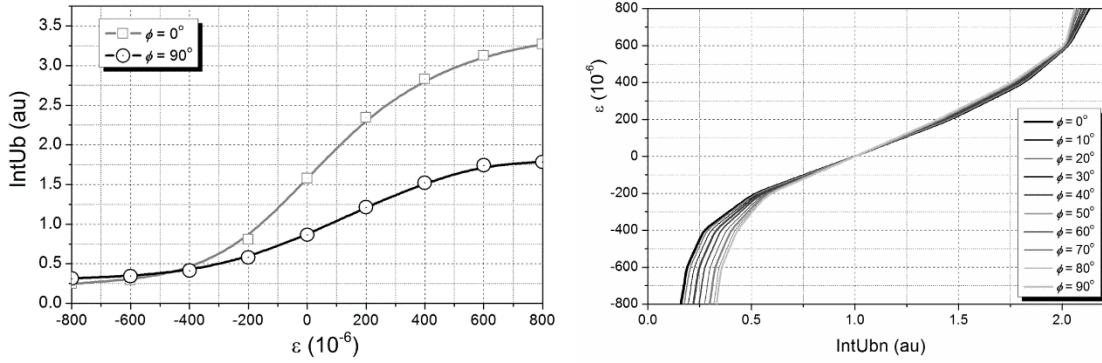
Tak uzyskane wyniki, jednoznacznie potwierdzają skuteczność wytwarzania kierunkowej zmiany pola magnetycznego przy wykorzystaniu mojego rozwiązania. Anizotropowy charakter badanego materiału wymagał również bardziej skutecznego sposobu wykorzystania kątowych pomiarów

natężenia efektu Barkhausena w celu określenia rozkładu naprężenia, niż w przypadku badania materiałów izotropowych. Aby zweryfikować możliwość wykorzystania systemu pomiarowego dla oceny wielkości naprężenia dla materiałów anizotropowych do badań wykorzystano silnie anizotropowy materiał S460ML. Dla potrzeb kalibracji, podobnie jak we wcześniej opisywanym artykule, wykonano pomiary rozkładów kątowych natężenia efektu Barkhausena na próbce w kształcie krzyża, dla zadanego stanu odkształcenia. Inaczej niż w przypadku materiału izotropowego, nie uzyskuje się regularnej postaci rozkładu natężenia efektu Barkhausena dla zerowych wartości odkształcenia w kierunku X i Y i aby stworzyć właściwą i miarodajną procedurę pomiarową, należy wykonać około 61 pomiarów kalibracyjnych. Wyniki rozkładu kąтового dla kilku stanów odkształcenia przedstawiono na rysunku 9.



Rysunek 9. Wyniki pomiarów kąтового rozkładu natężenia efektu Barkhausena dla pięciu różnych stanów odkształcenia.

Kalibracja przy wykorzystaniu układu do zadawania płaskiego stanu odkształcenia posiada jeszcze jedną ważną cechę. Jest nią orientacja sondy pomiarowej ustawiona zgodnie z głównymi kierunkami odkształcenia w kalibrowanym materiale. Uzyskane w ten sposób kalibracyjne rozkłady kątowe przekształca się w taki sposób, aby stworzyć rodzinę odwrotnych krzywych kalibracyjnych, które w etapie następnym są normowane do wartości uzyskanej dla zerowego odkształcenia. Takie przekształcenie numeryczne umożliwia uzyskanie już w miarę jednorodnej rodziny charakterystyk. Przykładowe przebiegi kalibracyjne oraz odwrotne unormowane przebiegi kalibracyjne prezentuje rysunek 10.



Rysunek 10. Przykłady funkcji kalibracyjnych (wykres lewy) oraz rodziny unormowanych kalibracyjnych funkcji odwrotnych (wykres prawy).

Tak przygotowane dane kalibracyjne, można skutecznie wykorzystać w zakresie wyznaczenia wielkości i rozkładu naprężenia dla badanego materiału i zweryfikować, jaki jest wpływ spoiny na wielkość kierunek czy w końcu rozkład naprężenia w materiale. Dla potrzeb przygotowania artykułu zbadano dwa fragmenty blachy anizotropowej przed i po procesie spawania, wykonując po 25 pomiarów po obu stronach obu blach. W artykule zaprezentowano przykład takich wyników dla jednej strony, jednej części próbki przed i po procesie spawania. Tak uzyskane wyniki wykorzystano do wyznaczenia rozkładu odkształcenia w każdym punkcie, a te z kolei zgodnie z regułą opisaną wzorem (2) posłużyły do wyznaczenia kierunków osi głównych odkształcenia.

$$\varepsilon_{\varphi} = \varepsilon_Y + (\varepsilon_X - \varepsilon_Y) \cos^2(\varphi - \alpha) \quad (2)$$

Następnym etapem było wyznaczenie wielkości naprężenia w kierunkach osi sondy układu pomiarowego, zakładając wartość modułu Younga na $E=210\text{GPa}$ oraz współczynnika Poisson 'a $\nu=0,3$. Ostatni etap wyznaczania rozkładu naprężenia polegał na, zgodnie z wyrażeniem (3), na wyliczeniu wielkości naprężenia w kierunkach osi głównych zgodnych z wyznaczonym kierunkiem osi głównej odkształcenia.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x \cos^2 \alpha - \sigma_y \sin^2 \alpha}{\cos 2\alpha} \quad \sigma_2 = \frac{\sigma_y \cos^2 \alpha - \sigma_x \sin^2 \alpha}{\cos 2\alpha} \quad (3)$$

Taki komplet wyników umożliwił uzyskanie końcowych rezultatów, które zostały zaprezentowane w dwóch formach: jako wykresy pod postacią map intensywności prezentującymi rozkład naprężenia dla dwóch osi głównych zgodnych z orientacją sondy pomiarowej oraz w formie wektorowym, który prezentuje wartość naprężeń głównych wraz z ich kierunkiem względem badanego materiału, który również jest kierunkiem orientacji głowicy pomiarowej. Pewnym problemem formalnym związanym z wykorzystaniem wzoru (3) jest jego nieoznaczoność dla kąta anizotropii odkształcenia

równego 45° . W artykule zaproponowano algorytm postępowania mający na celu również uwzględnienie takiego kierunku osi odkształcenia w rachunkach obliczeniowych naprężenia. Ze względu, iż nie jestem autorem pomysłu algorytmu obliczeniowego pominę dokładniejszą analizę tej części artykułu. Ostatnim elementem prezentowanym w artykule, było porównanie tak uzyskanych wyników dla jednego punktu pomiarowego z wynikami pomiaru wykorzystującymi dyfrakcję rentgenowską. Uzyskano wysoką zgodność pomiędzy metodami. Podsumowując, prezentowany układ pomiarowy wykorzystujący sondę z prostopadłym układem magnesującym, umożliwił wraz z zaproponowanym algorytmem obliczeniowym uzyskanie jednoznacznego i kompleksowego opisu naprężeniowego badanego materiału. Urządzenie wraz z wbudowanym algorytmem może w sposób nieniszczący, skutecznie i praktycznie automatycznie podołać zadaniu szybkiego wyznaczenia wielkości naprężenia.

Publikacją prezentującą wysoką efektywność wykorzystania mojego rozwiązania systemu pomiarowego kąтового pomiaru efektu Barkhausena jest artykuł prezentujący wyniki jego testowania w przypadku badania fragmentów rurociągów, czyli na zakrzywionych i nieregularnych powierzchniach. Zadaniem w tym projekcie było określenie rozkładu i wielkości naprężenia w przypadku, kiedy taki element poddany został obróbce spawania. W artykule prezentującym techniczne rozwiązanie układu pomiarowego, zamieszczono również wyniki pomiarów oraz obliczeń, mających na celu wyznaczenie rozkładu naprężenia dla zespawanego rurociągu. Dla potrzeb tego eksperymentu wykonano pomiary rozkładu kąтового natężenia efektu Barkhausena dla całego fragmentu rurociągu, następnie fragment ten został przecięty w połowie i zespawany. Pomiary kąтового rozkładu natężenia efektu Barkhausena zostały powtórzone dla zespawanego rurociągu. Wyniki określające wielkość i rozkład naprężenia powstającego w wyniku procesu spawania uzyskano przez odjęcie stanu początkowego, zmierzonego przed cięciem od stanu po zespawaniu, zmierzonych rozkładów kątowych natężenia efektu Barkhausena. Zgodnie z oczekiwaniem, uzyskano wyniki rozkładu naprężenia wskazujące na powstawanie naprężenia rozciągającego, prostopadłego do kierunku spoiny, w bezpośrednim jej sąsiedztwie. Przeprowadzone w ten sposób badania, udowodniły skuteczność działania mojego układu pomiarowego na trudnych, zakrzywionych powierzchniach umożliwiając tym samym zastosowanie takiego systemu do określania wielkości naprężenia występującego w rurach.

Podsumowując, w przeciągu mojej kariery naukowej udało mi się opracować i skonstruować szereg autorskich rozwiązań urządzeń pomiarowych, które zostały przebadane w szerokim zakresie materiałów testowych, wykazując tym samym przydatność w zakresie szeroko pojętej nieniszczącej charakterystyki strukturalnej oraz naprężeniowej materiałów konstrukcyjnych. W zakresie treści przedstawionych w przewodniku wykazałem, że efekt Barkhausena można skutecznie zastosować w dziedzinie badań materiałowych. Nadmienię tutaj, że na dzień dzisiejszy uzyskaliśmy uznanie

Polskiego Rejestru Statków w zakresie wykorzystanie pomiarów natężenia efektu Barkhausena wykonanych za pomocą zaprojektowanego i skonstruowanego przeze mnie urządzenia MEB2C do celów wyznaczenia wielkości naprężenia.

6. Krótki opis pozostałych dziedzin badań prowadzonych przez autora przewodnika.

Zaprezentowany powyżej zakres tematów badawczych i rozwojowych stanowi tylko niewielki fragment całego wachlarza zagadnień z zakresu badania właściwości materiałów, które były i są przedmiotem mojego zainteresowania. Prowadzę badania w zakresie wykorzystania techniki pomiarów prądów wirowych, w zakresie zaawansowanego diagnozowania materiałów przewodzących nie tylko ze względu na możliwość wystąpienia defektów powierzchniowych ale również w zakresie nieniszczącego określenia jakości ich struktury. Do tego celu skonstruowałem i skutecznie przetestowałem autorski pomysł różnicowej głowicy wiropądowej, możliwej do zastosowania w obu opisanych powyżej sferach, dla bardzo szerokiej grupy materiałów przewodzących w tym również przewodzących ferromagnetycznych. Rozwijam technikę wykorzystania impulsów magnetostrykcyjnych w zakresie daleko zasięgowej diagnostyki rurociągów i lin stalowych, gdzie również jestem autorem pomysłu i rozwiązania konstrukcyjnego doświadczalnego systemu pomiarowego, wykorzystywanego w ramach laboratorium studenckiego na uczelni. W tym zakresie prowadzę również badania w zakresie generowania prowadzonych, kierunkowych impulsów ultradźwiękowych. Prowadzę również badania w zakresie wykorzystania technik hybrydowych w zakresie badań materiałowych, wykorzystując jako jeden ze składników systemów pomiarowych bolometryczne urządzenia termowizyjne.

Marcel Amieleski