

Wprowadzenie do elektromagnetycznej diagnostyki degradacji stali

Zbigniew Hilary ŻUREK

1. Wprowadzenie do badań nieniszczących w polu magnetycznym

Defekty w ciągłości geometrycznej i strukturalnej materiału są wykrywane metodami defektoskopowymi. Wśród metod defektoskopowych szczególne miejsce zajmują metody magnetyczne i magnetyczno-indukcyjne. Metody te opierają się na pośredniej kontroli przenikalności magnetycznej i przewodności elektrycznej właściwej badanego materiału. Parametry magnetyczne i elektryczne materiału są wrażliwe na procesy degradacyjne zmęczeniowe, co zapewnia możliwość diagnozowania stref powstawania pęknięć elementu z wyprzedzeniem czasowym. Współczesne rozwiązania konstrukcyjne zakładają wysokie przeciążenia mechaniczne eksploatowanych elementów (transport, energetyka, lotnictwo), dlatego wymagają szerokiego prognozowania stanu elementu, wychodząc poza defektoskopię klasyczną. Badania nad rozwojem teoretycznych podstaw procesu zmęczenia materiału i jego detekcją prowadzone są w wielu ośrodkach badawczych.

Diagnostyka zmęczenia materiału metodami magnetycznymi i indukcyjnymi wymaga określonych przedziałów poziomu magnesowania i częstotliwości z uwzględnieniem pozostałości magnetycznej i natężenia pola koercji materiału. Każdy gatunek stali reaguje odmiennie i z różną intensywnością na procesy obciążeń zmęczeniowych mechanicznych. Diagnostyka metodami magnetycznymi dla każdej ze stali powinna być poprzedzona pomiarem korelacji parametrów mechanicznych z magnetycznymi. Zmiana parametrów magnetycznych materiałów ferromagnetycznych w zakresie odkształceń sprężystych jest opisana efektem Joule'a i Villariego. Zmiany te były szczegółowo analizowane zarówno w ramach badań podstawowych [1, 10 – 12, 38] jak i badań stosowanych [3 – 8, 76 – 78, 83, 100] w zakresie diagnostyki zmęczenia mechanicznego materiału. Zmiany charakterystyki magnesowania materiału były często rozpatrywane dla zjawisk relaksacyjnych [11, 62, 106] bądź zmęczeniowych [94, 97 – 114]. W zakresie niniejszej pracy są one rozpatrywane w szczególności dla diagnostyki szyn i kół w trakcji elektrycznej oraz w energetyce [91, 95].

Badane są te parametry magnetyczne w stali, staliwie, żeliwie, stopach amorficznych, które czule są na zmiany struktury [62, 65]. Parametrami tymi są przenikalność magnetyczna (względnie podatność magnetyczna) początkowa i maksymalna, natężenie pola koercji, magnetyzacja przy niskich natężeniach pola, straty mocy na histerezę magnetyczną, straty mocy na prądy wirowe, straty mocy relaksacyjne. Proces zmian przenikalności

magnetycznej jest złożony, zależny od współczynników anizotropii, wewnętrznych naprężeń mechanicznych, współczynnika magnetostrykcji oraz stężenia elementów dyfuzyjnych (defektów strukturalnych) oddziałujących z wektorem spontanicznej magnetyzacji.

O zmianach strukturalnych zachodzących w materiałach ferromagnetycznych można wnioskować na podstawie analiz statycznych lub dynamicznych zmian pętli histerezy magnetycznej. Informacje o defektach makroskopowych materiału zawarte są w mierzonych wartościach i rozkładach magnetycznego pola rozproszenia. Badając pole rozproszenia można wykryć zmiany zachodzące w materiale magnetycznym na poziomie cząsteczkowym, o czym decyduje jedynie wymiar przetwornika. Zastosowanie metod magnetycznych do diagnozowania materiałów magnetycznych wymaga wstępnych badań laboratoryjnych dla określenia korelacji pomiędzy odpowiednimi wielkościami magnetycznymi a strukturą materiału po odkształceniach plastycznych lub po zadanym przebiegu obciążenia zmęczeniowego materiału.

W badaniach materiału ferromagnetycznego dla celów diagnostycznych rozpatrywane są zarówno zmiany parametrów magnetycznych jak i elektrycznych. Parametry elektryczne i magnetyczne materiału zmieniają się nieliniowo wraz ze wzrostem przejętych przez materiał obciążeń zmęczeniowych. Trudność przyporządkowania wykrytych zmian parametrów fizycznych (magnetycznych i elektrycznych) do oceny postępu degradacji zmęczeniowej wynika z faktu, że nie znamy poziomu odniesienia (nie ma kryteriów oceny) wartości zmiany parametrów elektrycznych bądź magnetycznych determinujących aktualny poziom zmęczenia materiału. Bardzo często wyniki pomiaru po jednej trzeciej okresu niezawodnej pracy są zbliżone do wyników uzyskanych po dwóch trzecich okresu. Właściwość tę (a nawet prawidłowość) wykazano podczas badania przewodności elektrycznej [72] jak i podczas badań własnych przeprowadzonych w Instytucie Fraunhofera. Zjawisko to opisywane jest w szeregu prac badawczych finansowanych ze środków Ministerstwa Nauki [95, 104 – 106, 109 – 114]. Skala reakcji stali ferromagnetycznych na odkształcenia (sprężyste, plastyczne, zmęczeniowe) przejawiająca się zmianą parametrów magnetycznych [26, 27, 48, 54 – 56] i elektrycznych jest związana w znacznej mierze z gatunkiem stali. Jest to uzależnione od składu chemicznego, a nawet zanieczyszczeń i ma charakter złożony. Złożoność tych zależności nie ułatwia zastosowań praktycznych w diagnostyce [39, 91, 95].

W stalach austenitycznych (paramagnetycznych) zmiany zmęczeniowe można wykrywać za pomocą metod magnetycznych [102, 103] gdyż naprężenia mechaniczne i termiczne osłabiają stabilność austenitu i zmieniają ich właściwości magnetyczne (od przemian fazowych lub relaksacyjnych). Przyrosty przenikalności magnetycznej austenitu w stosunku do przenikalności materiału magazynowego są w przypadkach nowoczesnych stopów austenitycznych nieznaczne i mieszczą się w przedziale od $0,0001\mu_r$ do $0,1\mu_r$. Zmiany te są możliwe do zarejestrowania czułymi magnetoskopami. Przedziały stabilności austenitu są uwarunkowane składem chemicznym materiału tj. procentową zawartością chromu, niklu, manganu i dodatków stabilizujących. Metody magnetyczne badań defektoskopowych bazują na detekcji braku ciągłości geometrycznej materiału, który powoduje lokalną skokową zmianę rozkładu składowych pola magnetycznego na powierzchni badanego elementu. Zakresy zmian namagnesowania materiału są zależne od sposobu obróbki termicznej, metod obróbki końcowej oraz od obciążeń eksploatacyjnych. Tradycyjne metody defektoskopowe, wykorzystywane do detekcji rozlicznych wad (i defektów) [14, 23, 24, 31] ciągłości materiału, zostały uznane za metody umożliwiające śledzenie procesów zmęczeniowych. Napotykają jednak one na przeszkody w bezpośrednim ich zastosowaniu. Przewagą metod magnetycznych jest fakt, że ich czułość jest większa niż czułość metod ultradźwiękowych. Należy

pamiętać, że najczulsze (laboratoryjne) metody detekcji procesów zmęczeniowych to metody oparte o kwadrat szerokości linii dyfrakcyjnych promieni rentgenowskich i metody neutronowe. Metody te w zakresie detekcji zmęczenia wkraczają do przemysłu. Czułość detekcji procesu zmęczenia materiału realizowana metodą magnetyczną, definiowana jest mierzalnymi technicznie zmianami: przenikalności magnetycznej, natężenia pola koercji, przewodności elektrycznej właściwej w funkcji obciążeń zmęczeniowych [3, 4, 13, 68, 85]. Pierwszym krokiem stosowania metody magnetycznej w detekcji zmęczeniowej stali austenitycznych jest jej umiejscowienie na wykresach układu Fe-C, lub Schaeffler'a, w celu wyznaczenia struktury początkowej (wyjściowej) materiału.

Znajomość struktur początkowych, a następnie ich ewolucji w procesie obciążeń mechanicznych, począwszy od mechanicznej degradacji struktury po jej przemiany fazowe, umożliwia zakwalifikowanie materiału pod kątem możliwości zastosowania badań magnetycznych (wybór metody i sposób analizy związków magnetyczno-mechanicznych).

Wyniki prowadzonych badań własnych, a także badań wynikających z tematyki realizowanych grantów [91, 95], wykazały konieczność przeprowadzenia gruntownej analizy podstaw stosowania znanych metod defektoskopowych, projektowanych pod kątem wykrywania zmian parametrów ciągłości struktury, a nie pod kątem badań degradacji struktury.

REKLAMA

W monografii przedstawiono wyniki analiz badań zmienności parametrów magnetycznych stali ferromagnetycznych i paramagnetycznych, jak i wskazano na sposoby detekcji miejsc podatnych na oddziaływania mechaniczne zmęczeniowe w elementach wykonanych z tych stali. Przypomniano także zależności fizyczne umożliwiające realizację badań diagnostycznych, począwszy od badań obciążeń sprężystych, obciążeń zmęczeniowych po uszkodzenie elementu (z lokalną utratą jego ciągliwości), do zerwania. Na kilku przykładach podano sposoby tworzenia bazy informacji o materiale, podano przykłady rozwiązań konstrukcyjnych układów pomiarowych i sposoby pomiaru do tworzenia tej bazy. Niektóre przykłady realizacji pomiaru uzupełniono symulacjami metodą elementów skończonych w programach FLUX i FEMM. Podstawowym celem monografii, oprócz prezentacji najnowszych wyników badań z zakresu diagnostyki procesów zmęczeniowych, było przedstawienie aplikacji metodyki badań w zakresie stosowania pola magnetycznego stałego i przemiennego dla diagnostyki zmęczenia materiału.

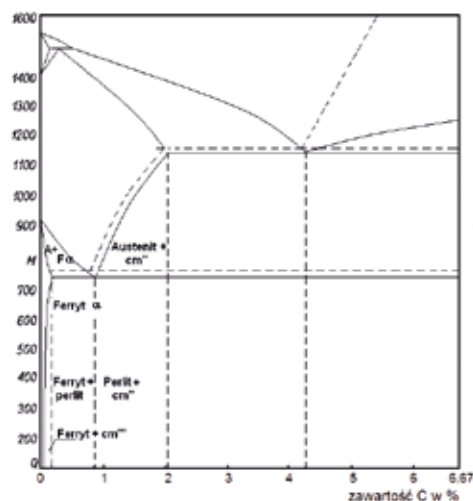
2. Magnetyczne wielkości charakterystyczne

Ferromagnetyk opisany jest szeregiem parametrów magnetycznych i wielkości charakterystycznych. Proces produkcji sprawia, że nie jest jednorodny chemicznie i strukturalnie. Powoduje to zróżnicowanie jego parametrów magnetycznych. Przykładem mogą być stopy żelaza w danej grupie stali. Niektóre parametry magnetyczne są charakterystyczne ze względu na ich stałość. Magnetyzacja nasycenia żelaza przy różnych stanach strukturalnych ma wartość stałą. Zmiany magnetyzacji są widoczne przy niższych wartościach pola magnetycznego, najczęściej poniżej 1 kA/m. Zanieczyszczenia stali przy stałości składu chemicznego są istotne ze względu na ich znaczący wpływ na wartość współczynnika magnetostrykcji. Współczynnik magnetostrykcji odgrywa znaczącą rolę w diagnostyce sprężystych stanów naprężeń a także naprężeń własnych elementu wprowadzonych do materiału w procesie produkcji. Początkowa (różna od zerowej) wartość przenikalności magnetycznej w początku wykresu krzywej magnesowania jest także odmienna dla każdego ferromagnetyka. Wielkościami magnetycznymi materiału są:

- przenikalność magnetyczna początkowa i maksymalna,
- magnetyzacja nasycenia,
- remanencja magnetyczna,
- temperatura punktu Curie,
- współczynnik magnetostrykcji,
- natężenie pola koercyjnego,
- straty mocy na histerezę magnetyczną,
- straty mocy na prądy wirowe,
- straty mocy relaksacyjne.

Istotnym parametrem jest przenikalność odwracalna, wykorzystywana przy wyznaczaniu krzywych motylkowych [67]. Przenikalność ta jest graniczną (rewersyjną) wartością zmian przenikalności od dodatkowego, przemiennego pola magnetycznego, jakie może być nałożone na stałe pole od magnesowania [67].

Na wielkości magnetyczne ferromagnetyków wpływają



Rys. 2.1. Układ fazowy stopów Fe-C

w różnym stopniu takie czynniki jak: skład chemiczny [11, 33, 34, 46, 48, 49], zanieczyszczenia [56, 63 – 65, 67], naprężenia sprężyste [1, 36] i plastyczne [11], uporządkowanie kryształów [11], temperatura, odmagnesowanie, częstotliwość przemagnesowania materiału. Zmienność parametrów magnetycznych materiału od temperatury jest istotna, gdyż obok naprężeń, temperatura jest najważniejszym czynnikiem wpływającym na parametry materiału [11]. Zmienność przenikalności materiału w danej ustalonej temperaturze może być wywołana między innymi przez [59, 62]:

- proces obróbki plastycznej,
- proces obróbki cieplnej,
- szybkość chłodzenia,
- czynniki chłodzące,
- relaksację naprężeń,
- czas starzenia,
- obciążenia sprężyste i zmęczeniowe,
- pełzanie nisko- i wysokotemperaturowe.

Pomimo złożoności zjawisk magnetycznych w ferromagnetykach, pole magnetyczne (metody magnetyczne) można stosować do analizy struktury rzeczywistej, faz w stopach żelaza, naprężeń sprężystych, a także degradacji zmęczeniowej. Istnieje wiele odmian metod diagnostycznych, w których wykorzystuje się odpowiednią wielkość fizyczną lub jej przebieg podczas obserwowanego zjawiska. Stosowane są urządzenia oparte na pomiarze:

- przenikalności magnetycznej,
- magnetyzacji nasycenia ($J_s = B_r - H\mu_0$),
- magnetycznego pola rozproszenia,
- stratności,
- natężenia koercyjnego.

Złożona zależność przenikalności magnetycznej ferromagnetyka od wielu czynników wewnętrznych i zewnętrznych nie wyklucza magnetycznych metod badania materiałów.

Przenikalność magnetyczna względna w materiałach

magnetycznych o anizotropii magnetycznej (stal), opisana jest zależnością [28, 39, 47, 53, 55, 62 – 64]:

$$\mu_r = \frac{12J_s^2 \delta k_B T}{24\mu_0 k_B T \left[K_{ef} + \frac{3}{2} \lambda_{ef} \sigma \right] + p w^2 c l \left[1 - e^{-l/\tau} \right]}, \quad (2.1)$$

gdzie:

- J_s – magnetyzacja nasycenia,
- T – temperatura termodynamiczna,
- k_B – stała Boltzmanna,
- δ – grubość efektywnej ścianki domenowej,
- l – szerokość domeny,
- μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni,
- K_{ef} – efektywna stała anizotropii magnetokrystalicznej,
- λ_{ef} – efektywny współczynnik magnetostrykcji,
- σ – naprężenie mechaniczne,
- p – parametr zależny od rodzaju ścianki domenowej,
- c – stężenie elementów oddziałujących z wektorem spontanicznej magnetyzacji (mogą to być atomy międzywęzłowe węgla, azotu, tlenu),
- w – stała oddziaływania danego elementu z wektorem magnetyzacji spontanicznej,
- t – czas liczony od momentu rozmagnesowania (redystrybucji elementów porządkujących się kierunkowo),
- τ – czas relaksacji dojścia do stanu równowagi.

Dla czytającego powyższy wzór może być niezrozumiałą, jednak podano go, aby wskazać jak wiele czynników wpływa na wartość przenikalności magnetycznej materiału. Głównymi składnikami wzoru są: anizotropia magnetokrystaliczna, wymiary domeny magnetycznej, współczynnik magnetostrykcji i czynniki relaksacyjne. W opisanych w dalszych rozdziałach monografii stalach węglowych (ferromagnetycznych), zawartość węgla nie przekracza 0,6%. Wraz ze stosowanym dodatkiem manganu (ferryto – twórczym) mamy do czynienia ze stałą ferrytyczno – perlityczną o pomniejszonej zawartości perlitu, jak to wynika z udziałów pokazanych na wykresie fazowym Fe-C (rys. 2.1).

Opisane w dalszych rozdziałach stale niskostopowe (stosowane w kolejnictwie) mają strukturę dwufazową ferrytyczno-perlityczną. Podstawowe własności magnetyczne stali ferrytyczno-perlitycznej są określone składem stopowym i sposobem wytwarzania. Dodatkowe zmiany parametrów magnetycznych występują od zewnętrznych czynników mechanicznych (w granicach odkształceń sprężystych), powodujących degradację struktury wejściowej. Zachodzące przemiany fazowe mogą być powodowane obciążeniami zmęczeniowymi procesu eksploatacji elementu, w wyniku działania temperatury i naprężeń. Zakładane zakresy zmian przenikalności magnetycznej materiału i natężenia koercji mogą zostać zakłócone lokalnymi degradacjami struktury jak i przemianami fazowymi (struktury martenzytyczne), zmieniającymi diametralnie namagnesowanie.

Pojawienie się fazy martenzytycznej w materiale ferrytyczno – perlitycznym jest jednym z czynników informujących o postępującym procesie degradacji materiału wskutek oddziaływania

obciążeń mechanicznych i temperatury. Diametralnie różne parametry mechaniczne stref martenzytycznych w sąsiedztwie innych struktur (np. ferrytyczno – perlitycznych) w eksploatacyjnym elemencie są przyczyną jego pęknięcia podczas eksploatacji. Zjawisko to występuje często w materiale warstw wierzchnich kół, czy obręczy tocznych kolejowych zestawów kołowych.

W materiałach ferromagnetycznych, a także w stalach konstrukcyjnych istnieje związek pomiędzy podatnością magnetyczną ($\chi_r = \mu_r - 1$) a natężeniem pola koercji (natężeniem powściągającym). Związek ten jest dla danego materiału wielkością stałą [48, 49]:

$$\chi H_{jc} = \text{const}. \quad (2.2)$$

Należy rozróżnić natężenie koercji H_{Bc} wyznaczone z krzywej pętli histerezy magnetycznej $B(H)$ i natężenie koercji H_{jc} , wyznaczone z pętli histerezy magnetyzacji $J(H)$. Dla materiałów ferromagnetycznych $H_{jc} > H_{Bc}$, natomiast dla metali austenitycznych, niemagnetycznych (paramagnetycznych) $H_{jc} \approx H_{Bc}$. Dla stali paramagnetycznych opisanych w monografii nie rozróżnia się H_{jc} i H_{Bc} , przyjmując $H_c = H_{jc} = H_{Bc}$. Wartość magnetyzacji nasycenia J_s stali elektrotechnicznych uzyskiwana jest przy niewielkich natężeniach pola magnetycznego w porównaniu ze stalami ferromagnetycznymi stosowanymi w budowie maszyn, dla których nasycenie osiągamy przy wartościach sięgających setek kA/m. Stale paramagnetyczne badamy w polu o natężeniu od 2 kA/m do 200 kA/m.

Jeżeli uwzględnimy istotny wpływ struktury domenowej poprzez efektywną grubość ścianek domenowych – δ i średnią szerokość domen – l , to zależność (2.2) przyjmuje postać podaną w [49]:

$$\mu_0 \chi H_{jc} \leq J_s \frac{\delta}{l}. \quad (2.3)$$

Zależność ta może być wyznacznikiem procesu zmęczenia, gdyż wraz z procesem zmęczenia wartość iloczynu χ i H_c ulega zmianie. W badaniach przemysłowych podatność magnetyzacji χ można kontrolować pośrednio poprzez pomiar zmian namagnesowania. Do oceny stopnia zmęczenia materiału zaproponowano parametr D_M , jako modyfikację zależności (2.2 – 2.3) w postaci wzoru:

$$D_M = k_D \frac{\mu_w}{H_{jc}} = f\left(\varepsilon_{(\sigma)} L_{(\sigma)}\right), \quad (2.4)$$

gdzie:

- $\varepsilon_{(\sigma)}$ – odkształcenia plastyczne,
- $L_{(\sigma)}$ – liczba cykli zmęczeniowych,
- k_D – współczynnik proporcjonalności,
- μ_w – przenikalność magnetyczna względna.

Przedstawiona zależność (2.4) umożliwi interpretację zmęczenia materiału, ułatwiającej badanie aktualnego stanu elementu i przewidywania jego trwałości. Wartość D_M opisuje proces zmęczenia z większą dokładnością aniżeli parametr przenikalności magnetycznej μ_w , ma jednak głównie zastosowanie laboratoryjne.

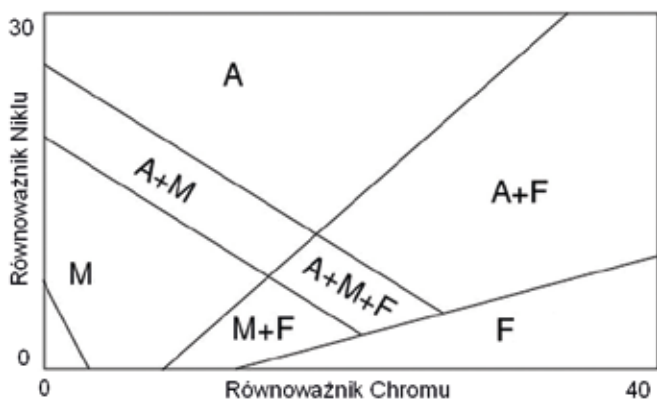
Znacznie dokładniej proces zmęczenia opisują zmiany łączne

przenikalności i przewodności właściwej. Współczesne techniki cyfrowe umożliwiają szybkie bezpośrednie przetworzenie zmian impedancji indukcyjnej sondy wiropądowej na lokalne wartości przenikalności magnetycznej zespolonej μ , skutecznej μ_{sk} , względnej μ_w i przewodności elektrycznej σ materiału badanego, którym najczęściej jest stal ferromagnetyczna a nawet paramagnetyczna przy wysokiej stabilności parametrycznej elektrycznej i magnetycznej.

Obróbka plastyczna (walcowanie), a także inne odkształcenia plastyczne wpływają zasadniczo na oba wymienione parametry magnetyczne. W miarę rozwoju procesu zmęczenia mechanicznego najczęściej natężenie koercji wzrasta, a przenikalność materiału maleje. W niektórych materiałach proces ten może przebiegać odwrotnie, np. w instalacjach parowych energetyki. Dla każdego gatunku stali (materiału ferromagnetycznego) procesy te przebiegają w sposób charakterystyczny, zależny od typu obciążeń zmęczeniowych.

Istotnym parametrem magnetycznym umożliwiającym badanie stali konstrukcyjnych jest natężenie koercji. Wzrost natężenia koercji związany jest zazwyczaj ze spadkiem przenikalności magnetycznej materiału. Natężenie koercji ma związek z mikrostrukturą materiału i strukturą domenową.

Badania magnetyczne możemy stosować także w ocenie stopnia zużycia stali paramagnetycznych (austenitycznych). W stalach paramagnetycznych austenitycznych chromowych lub niklowych dochodzi często do przemian strukturalnych powodowanych temperaturą lub obciążeniami mechanicznymi. Stopowe dodatki stabilizujące proces przemian strukturalnych mogą znacznie spowolnić przemiany w austenicie. Parametry magnetyczne zależą od składu chemicznego [11, 65], struktury realnej, temperatury i obróbki cieplnej. Na przykład skład chemiczny w stopach Fe-Cr-Ni silnie wpływa na ich skład fazowy (rys. 2.2). Na wykresie podano oznaczenia dla austenitu -A, martenzytu -M i ferrytu -F.



Rys. 2.2. Skład fazowy (Schaeffler'a) stopów Fe-Cr-Ni

W praktyce najczęściej przyjmuje się następujące zależności:

- równoważnik chromu

$$Cr_E = 1 \times \%Cr + 1 \times \%Mo + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times Nb + \dots (\%Ti, W, Ta, Al), \quad (2.5)$$

- równoważnik niklu

$$Ni_E = 1 \times \%Ni + 30 \times \%C + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Mn + \dots (\%Co, N). \quad (2.6)$$

Wykresy do wyznaczania składu fazowego stopów austenitu zostały opracowane także przez spawalników i są znane pod nazwą WRC 1992 (Welding Research Council constitution diagram). W wykresie WRC zmodyfikowano wzór De Long'a, rozbudowując wzór (2.6) o zmienione udziały niklu i azotu w wymiarze 0,3x(%). Przeprowadzone przez De Long'a i przez WRC modyfikacje, precyzują wpływ azotu na właściwości ferrytowe austenitu. Procentową zawartość ferrytu k_f w stopach austenitycznych można wyznaczyć na drodze analitycznej dokonując pomiaru objętości materiału V_p i wyznaczając na wadze magnetycznej dipolowy moment magnetyczny j_w z następującego wzoru:

$$k_f = \frac{j_w - J_{sa}}{J_{sf} - J_{sa}}, \quad (2.7)$$

gdzie:

- J_{sa} – magnetyzacja nasycenia austenitu,
- V_p – objętość materiału,
- J_{sf} – magnetyzacja ferrytu,
- j_w – dipolowy moment magnetyczny.

Magnetyzacja nasycenia ferrytu wyznaczana jest z teoretycznej zależności:

$$J_{sf} = 2,16 - 0,32x(\%C) - 0,41x(\%N) - 0,077x(\%Si) - 0,03x(\%Mo) - 0,02x(\%Mn) - 0,04x(\%Cr) - 0,034x(\%Ni) - 0,18x(\%W) - 0,16x(\%Ti). \quad (2.8)$$

Średnia magnetyzacja nasycenia austenitu J_{sc} jest niewielka i wynosi $2,31 \cdot 10^{-4}$ T. Magnetyzację nasycenia ferrytu J_{sf} wyznaczono dla składu chemicznego stali: G18H18, 321, 316. Ze względu na proporcje składu chemicznego, przyjęła kolejno następujące wartości: 0,730 T, 0,775 T i 0,833 T. Teoretyczny skład fazowy stali austenitycznych omawianych w monografii plasuje się w obszarze austenitu A (stal 316) lub austenitu i ferrytu A+F (stal 321, G18H18).

Zawartość ferrytu w stali austenitycznej ma silny wpływ na jej plastyczność i na namagnesowanie. Obciążenia zmęczeniowe materiału, a także obciążenia zmęczeniowe od współpracujących powierzchni mogą być przyczyną osłabienia stabilności fazy austenitu, która wpływa na właściwości mechaniczne oraz magnetyczne materiału [11, 65].

Zmienność parametrów magnetycznych austenitów chromowo niklowych to wynik niestabilności struktury paramagnetycznego austenitu. W strukturach „ α ”, pierwiastkami powodującymi obniżenie temperatury przemiany ($\gamma \rightarrow \alpha$), są mangan i nikiel. Działanie austenitujące manganu jest znacznie silniejsze niż niklu. Stabilność austenitu manganowego (G18H18) jest znacznie wyższa niż niklowego. W przeciętnym składzie chemicznym austenitycznej stali manganowej jest ok. 12,5% Mn (stal Hadfielda). Czynnikiem powodującym rozpad

austenitu w tej stali jest powolne chłodzenie i wygrzewanie. Nagrzewanie tej stali zwiększa jej przenikalność magnetyczną, osiągającą maksimum w 400°C. Odształcenia plastyczne jak i naprężenia mechaniczne wpływają na rozpad austenitu, zarówno w stalach manganowych, manganowo-niklowych jak i niklowych, jednak z różną intensywnością. W stali chromowo-niklowej rozpad austenitu następuje przy ochłodzeniu do temperatury poniżej -20°C. Stosowanie do celów elektrotechnicznych kwasowej stali austenitycznej chromowo-niklowej uzasadnione jest jedynie jej odpornością na korozję. W stali tej, po zgnioście lub wygrzewaniu, następuje wydzielanie węglików i częściowa przemiana ($\gamma \rightarrow \alpha$), zmieniająca parametry magnetyczne. Trwałość austenitu regulowana jest między innymi dodatkiem tytanu i chromu [56]. Powyższe właściwości austenitu sprawiają, że stale paramagnetyczne i elementy z nich wykonane mogą być diagnozowane na podstawie zmian magnesowania.

2.1. Czynniki wpływające na parametry magnetyczne

W poprzednim punkcie rozdziału wskazano na wpływ składu chemicznego na zmiany parametrów magnetycznych stali. W tym punkcie wykażemy, że na zmianę parametrów magnetycznych stali wpływają także procesy mechaniczne, związane z wykonaniem elementu jak i jego eksploatacją. Pełne rozpoznanie właściwości magnetycznych materiałów czułych i nieczułych na oddziaływanie wewnętrzne (skład chemiczny, zanieczyszczenia, struktura) i zewnętrzne od wpływu obciążeń mechanicznych, zarówno sprężystych jak i plastycznych, umożliwia zastosowanie diagnostyki magnetycznej [11 – 14, 67]. Występujące zależności przedstawiono w tabeli 2.1.

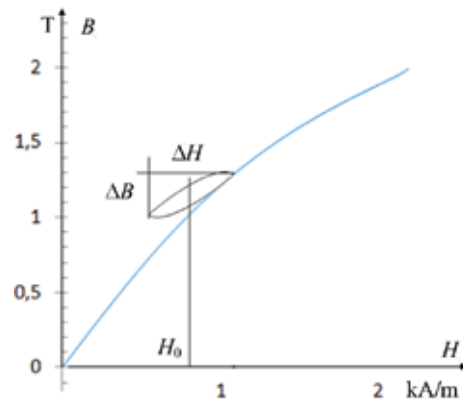
Tabela 2.1. Charakterystyka czułości parametrów magnetycznych

Charakterystyka czynnika	Parametry charakterystyczne				
	$\mu_{\text{pocz.}}$	$\mu_{\text{max.}}$	J_s	B_r	H_c
Skład chemiczny	±	±	±	±	±
Zanieczyszczenia	-	-	0	+	+
Odształcenia sprężyste $\lambda > 0$	-	+	0	+	-
Odształcenia sprężyste $\lambda < 0$	-	-	0	-	+
Odształcenia plastyczne $\lambda > 0$	-	-	0	-	+
Odształcenia plastyczne $\lambda < 0$	-	+	0	+	+
Anizotropia kryształów	±	±	0	+	-
Pelzanie wysokotemperaturowe	+	+	0	-	-
Czeszotliwość	-	-	-	+	+
Podmagnesowanie	-	-	-	-	-
Temperatura	±	±	-	-	-

Objaśnienia oznaczeń:
 „0” - brak reakcji, „+” - wzrost wartości, „-” - spadek wartości, „±” - brak stałej reakcji

Wartość magnetyzacji nasycenia materiałów ferromagnetycznych jest wielkością niezależną od zewnętrznych czynników oddziaływujących. Graniczną wartość poziomu nasycenia magnetycznego, szczególnie w grupie ferromagnetyków tzw. twardych, uzyskuje się w polu magnetycznym o natężeniu większym od tysiąca kA/m. Skład chemiczny materiału wpływa na końcową wartość nasycenia magnetycznego. Magnetyzacja nasycenia maleje liniowo wraz z procentowym wzrostem udziału składnika metalu niemagnetycznego. Wpływ składu chemicznego jest tak zróżnicowany, że każdy materiał o określonym składzie chemicznym musi być niezależnie analizowany.

Zanieczyszczenia materiałem niemagnetycznym pogarszają



Rys. 2.3. Małe wartości diagnostycznego pola przemiennego ΔH przy stałej wartości pola magnesującego H_0 wynikającego z pozostałości magnetycznej

w zasadzie parametry magnetyczne materiału magnetycznego. Zmiany te są szczególnie istotne w badaniach nieniszczących i wiążą się z koniecznością badania zmian parametrów materiałów nawet w tej samej grupie katalogowej stali produkowanej przez innego producenta. Znaczny wpływ odgrywają domieszki niemetaliczne, jak węgiel, azot i siarka. W materiałach magnetycznie miękkich, jak na przykład czyste żelazo, wartość maksymalna przenikalności magnetycznej może ulegać znaczącej zmianie. Wpływ naprężeń mechanicznych wywołanych czynnikami zewnętrznymi (kształtowanie materiału, obróbka cieplna, zanieczyszczenia, magnetostrykcja spontaniczna) na parametry magnetyczne materiału nie jest jednakowy dla wszystkich gatunków stali. Każdy gatunek stali wymaga niezależnych badań zmienności parametrów magnetycznych zachodzących pod wpływem zmęczenia.

Temperatura jest na tyle znaczącym czynnikiem wpływającym na zmianę właściwości magnetycznych materiału, że została szczególnie omówiona w publikacji Ferromagnetyzm [1]. Oddziaływanie to jest silniejsze w grupie materiałów magnetycznie miękkich. Właściwość tę wykorzystuje się w diagnostyce magnetycznej. Diagnostyka materiałów magnetycznie miękkich jest opisana szczegółowo w wielu pozycjach literaturowych [11 – 14, 67]. Informacje literaturowe dotyczące diagnostyki magnetycznej materiałów magnetycznie twardych są znikome ze względu na brak zainteresowania tymi materiałami w elektrotechnice. Wyniki zamieszczone w monografii pochodzą z badań własnych autora.

Z punktu widzenia diagnostyki magnetycznej istotny jest, z uwagi na pętlę histerezy, stan wstępnego magnesowania, związany z przeszłością magnetyczną lub trwającym odmagnezowaniem. Na ferromagnetyk działa pole odmagnezowujące i właściwe pole pracy. Parametr przenikalności magnetycznej odwracalnej $\mu_{\text{rev.}} = f(H_0)$ (rys. 2.3) materiału odmagnezowanego jest uznawany jako parametr diagnostyczny, ponieważ odnosi się do wartości pola magnesowania H_0 , które można elektrodynamicznie kontrolować.

Krzywe „motylkowe” przenikalności odwracalnej przy znanej

wartości odmagnesowania są powszechnie stosowane w diagnostyce (3 MA). Badając element ferromagnetyczny należy znać jego przeszłość magnetyczną. Wiele gatunków stali w sposób naturalny ulega namagnesowaniu od wpływu czynników zewnętrznych (np. uderzenia – problem spawania namagnesowanych szyn kolejowych), w naturalnym polu ziemskim, w polu sieci trakcyjnej, bądź w polu linii elektroenergetycznych.

Fakt występowania zjawiska pozostałości magnetycznej utrudnia proces magnetycznego badania materiału, dlatego stan pozostałości magnetycznej powinien być dobrze znany. Wnioskowanie na podstawie poziomu pozostałości magnetycznej [11, 12, 67] o stanie materiału dla celów diagnostycznych, związanych z wykrywaniem procesów zmęzeniowych, może prowadzić do mylnych wyników. Sprawdza się natomiast w badaniu austenitów.

2.2. Ferromagnetyk w polu magnetycznym stałym

W obwodach magnetycznych maszyn i urządzeń elektrycznych mamy do czynienia z magnetykami miękkimi. Rozpatrywane obwody magnetyczne są głównie obwodami zamkniętymi ze szczeliną powietrzną. Teoretyczne związki pomiędzy magnetyzacją a natężeniem pola magnetycznego są najczęściej rozpatrywane w przypadku magnesowania rdzenia pierścieniowego. Magnesowanie elementu otwartego w zakresie teoretycznym [2, 57, 65, 66, 77], a z takimi mamy do czynienia w diagnostyce elementów konstrukcyjnych [84, 86 – 90, 98, 108], dla osiągnięcia określonego poziomu magnesowania wymaga znacznie większej energii.

Dla materiałów paramagnetycznych podatność magnetyczna χ , przy założonej temperaturze jest wielkością stałą. Zależność pomiędzy magnetyzacją a natężeniem pola magnetycznego czy indukcją przyjmuje postać linii prostej. Przypomnienie to jest niezwykle istotne ze względu na możliwość badania paramagnetyków w polu magnetycznym ziemskim lub dodatkowym, zewnętrznym magnetycznym polu testującym.

W temperaturze otoczenia namagnesowanie elementu paramagnetycznego jest istotnym i stałym parametrem oceny elementu austenitycznego, w którym podczas obciążeń zmęzeniowych następują przemiany strukturalne. Pomiar namagnesowania czy pomiar przenikalności magnetycznej jest pomiarem powtarzalnym (przy zachowaniu niezmienniej historii obciążeń zmęzeniowych elementu).

Związek pomiędzy magnetyzacją a natężeniem pola uwarunkowany jest geometrycznym charakterem współczynnika odmagnesowania [31]. Ponieważ w diagnostyce magnetycznej stan elementu ocenia się na podstawie zmian wartości składowej stycznej pola magnetycznego, musimy pamiętać o zależności pomiędzy magnetyzacją J , a natężeniem wewnątrz próbki H , współczynnikiem odmagnesowania N i podatnością magnetyczną χ :

$$J = \mu_0 H \frac{\chi}{1 + \chi N}, \quad (2.9)$$

$$H_i = H \frac{\chi}{1 + \chi N}. \quad (2.10)$$

Obraz pola magnetycznego w ferromagnetyku umieszczonym w polu magnetycznym zależy od kształtu i wymiaru próbki (szczególnie długości) i kierunku ułożenia (od 0° do 90°) w stosunku do przebiegu linii sił pola magnetycznego.

Książka jest przeznaczona dla osób zgłębiających metody badań nieniszczących, w tym szczególnie metody magnetyczne. Badania nieniszczące wymagają nie tylko odpowiednich urządzeń, ale i intuicyjnego postrzegania badanego elementu tak na poziomie remanencji magnetycznej w polu magnetycznym ziemskim, jak i od przyłożenia zewnętrznego pola magnetycznego.

Ważne jest rozdzielenie pola magnetycznego elementu od pola defektu w tym elemencie, wpływu kształtu, proporcji, rozmiaru, jak i kierunku pola zewnętrznej magnetyzacji. Zagadnienie to przedstawiono na przykładzie płaskowników o różnej długości i przekroju, jak i dla przypadku pierścieni zamkniętych i otwartych, w których szczelina powietrzna usytuowana jest prostopadle, a następnie równoległe do linii sił pola magnetycznego.

Zagadnienia wykrywania defektów nieciągłości geometrycznej, jak i strukturalnej można z powodzeniem analizować za pomocą metod elementów skończonych dla obwodów magnetycznych. W monografii zastosowano oprogramowanie Flux 8.1 i FEMM 3.4. Programy te korzystają z równań Maxwella dla małych częstotliwości, w których pomija się prądy przesunięcia.

Makroskopowe własności pola magnetycznego opisuje się za pomocą wektora indukcji magnetycznej \vec{B} i siły wzajemnego oddziaływania $d\vec{F}$ liniowego elementu prądu $I \cdot d\vec{l}$ zdefiniowanej w oparciu o prawo Ampera [2, 28, 57, 69].

$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \times \vec{B}. \quad (2.11)$$

Wektor natężenia namagnesowania jest definiowany przez momenty magnetyczne jednostki objętości ośrodka, w którym powstało pole magnetyczne oraz wektor natężenia pola magnetycznego określany ze związku:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{M}. \quad (2.12)$$

Wektor natężenia magnesowania jest związany z natężeniem pola magnetycznego zależnością [28, 57]:

$$\vec{M} = \chi \vec{H}, \quad (2.13)$$

gdzie χ – podatność magnetyczna ośrodka. Ze wzorów (2.12) i (2.13) otrzymamy zależność:

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H}. \quad (2.14)$$

Dla ośrodków izotropowych μ i χ są skalarami, a w ośrodkach anizotropowych tensorami. W ośrodku jednorodnym μ i χ nie zależą od położenia rozważanego punktu pola. Dla ferromagnetyków, dla których zależność \vec{B} do \vec{H} jest nieliniowa, przenikalność ośrodka nie jest stała, lecz zależy od \vec{H} .

W środowiskach anizotropowych zależność pomiędzy wektorami B i H można przedstawić za pomocą macierzy:

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Przykładem środowisk nieliniowych są ciała ferromagnetyczne jak żelazo, nikiel czy kobalt.

Równania Maxwella w postaci różniczkowej, gdzie \vec{j} jest powierzchniową gęstością prądu w przewodniku o przekroju S , są następujące:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j}, \quad (2.16)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2.17)$$

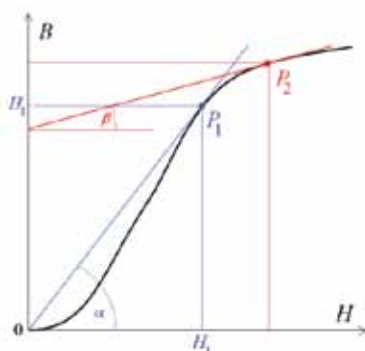
Związek między \vec{B} i \vec{H} dla materiału izotropowego liniowego i w badaniach magnetycznych jest uproszczony:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}.$$

Powyższa postać wzoru jest uwzględniana w badaniach magnetycznych w polu stałym. W polu przemiennym operujemy pojęciem przenikalności dynamicznej. Jeżeli uwzględnimy, że materiał ferromagnetyczny jest nieliniowy, wówczas $B=f(H)$, to pojęcie przenikalności względnej nie ma zastosowania, dlatego wprowadzono pojęcie przenikalności względnej stycznej μ_{st} , związanej z punktem pracy P_1 , która jest proporcjonalna do siecznej wystawionej z początku układu do punktu pracy, jak pokazano na rysunku 2.4. Natomiast z pochodną dB_A/dH_A wokół punktu pracy jest związana z przenikalnością dynamiczną μ_d . Przenikalność dynamiczna jest proporcjonalna do stycznej w punkcie pracy P_2 (rys. 2.4).

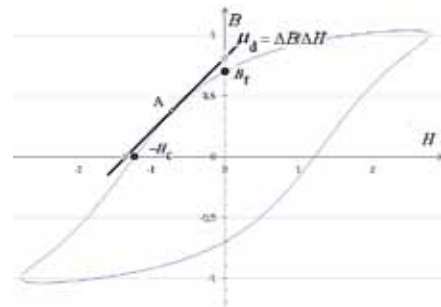
$$\mu_{st} = \frac{B_{P1}}{H_{P1}} = \text{tg} \alpha. \quad (2.19)$$

$$\mu_d = \left. \frac{\Delta B}{\Delta H} \right|_{P2} = \text{tg} \beta. \quad (2.20)$$



Rys.2.4. Schemat do definicji przenikalności magnetycznej materiału

Dla magnesu trwałego sposób wyznaczania przenikalności dynamicznej przedstawia rysunek 2.5.



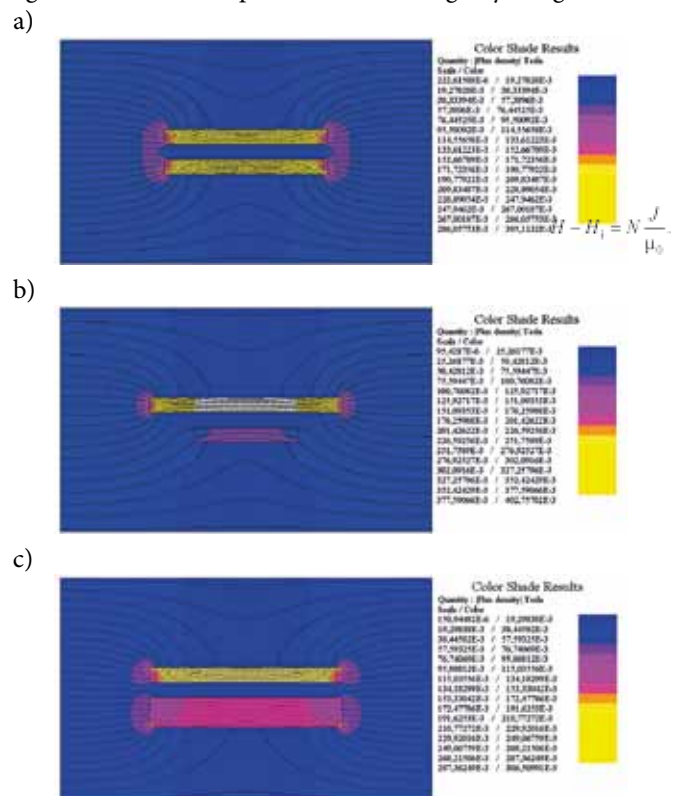
Rys. 2.5. Sposób definiowania przenikalności dynamicznej magnesu

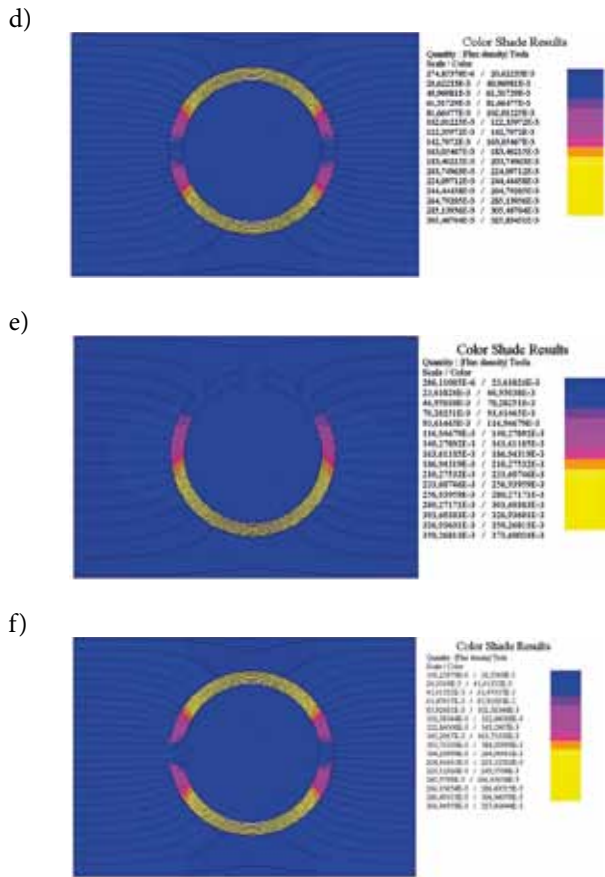
Ogólnie dla elementu nieliniowego zależność B i H możemy zapisać:

$$H_A = \frac{B_A}{\mu(B_A) \mu_0}. \quad (2.21)$$

W diagnostyce materiałów posługujemy się uproszczeniami w zagadnieniach jednorodności magnetycznej (μ) i elektrycznej (σ) materiału.

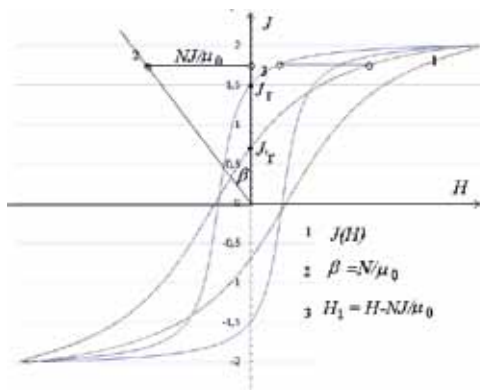
W programie FLUX 8.2 porównano numerycznie (rys. 2.6) rozkład indukcji magnetycznej obwodów magnetycznych otwartych (a-c) i obwodów magnetycznych (e-f) ze szczeliną powietrzną, umieszczonych w stałych zewnętrznych polach magnetycznych (magneśnicy). Na rysunkach 2.6 (a-c) obserwujemy wpływ zmian długości i przekroju obwodu magnetycznego na współczynnik magnesowania. Na rysunkach 2.6 (d-f) obserwujemy związek kierunku linii sił pola magnetycznego i geometrii elementu pierścienia ferromagnetycznego.





Rys. 2.6. Przykłady namagnesowania elementów w zależności od kształtu, wymiaru i kierunku pola magnetycznego

Współczynnik odmagnesowania N uzależniony jest od geometrii elementu [28, 31, 68, 85]. Pętla histerezy magnetycznej materiału próbki otwartej – (3), wprowadzonej w pole magnetyczne zostaje pochylona, jak pokazano na rys. 2.7. Oznaczenie namagnesowania przez $J = B - \mu_0 H$ jest najczęściej stosowane do opisu osi pętli histerezy.



(2.22)

Rys. 2.7. Wpływ geometrii na odchylenie pętli histerezy magnetycznej

Istotnym faktem z punktu widzenia diagnostyki magnetycznej jest niezmienność wartości natężenia koercji magnetyzacji. Charakterystyczna wartość strat mocy na histerezę (pole objęte krzywą histerezy magnetycznej) pozostaje także bez zmian.

Zmianie ulega wartość pozostałości magnetycznej. Przyjmuje ona nową wartość, nazwaną pozorną pozostałością magnetyczną. Przenikalność pozorna jest pomniejszona w stosunku do wartości rzeczywistej, zgodnie z zależnością:

$$\mu' = \frac{1}{\frac{1}{\mu} + N}, \mu = \mu_w \mu_0, \quad (2.23)$$

gdzie: μ_w jest przenikalnością względną.

O przenikalności magnetycznej pozornej decyduje głównie współczynnik odmagnesowania. Wpływ przenikalności magnetycznej na współczynnik odmagnesowania maleje ze spadkiem przenikalności magnetycznej materiału (elementy konstrukcyjne ferromagnetyczne).

W każdym przypadku pomiar pola magnetycznego dla celów diagnostycznych przebiega na granicy ośrodków, tj. powietrza i ferromagnetyka (materiału badanego elementu). Zasady pomiaru składowych pola magnetycznego na granicy ośrodków oparte są na prawach magnetyzmu. Jeżeli przenikalności magnetyczne na granicy ośrodków wynoszą odpowiednio μ_1 i μ_2 , to moduły i kierunki wektorów indukcji oraz natężenia pola magnetycznego ulegają zmianie [31, 66], natomiast bez zmian pozostają:

składowe normalne indukcji magnetycznej

$$B_{1n} = B_{2n}, \quad (2.24)$$

oraz składowe styczne natężenia pola magnetycznego

$$H_{1t} = H_{2t}. \quad (2.25)$$

Linie pola magnetycznego przechodząc z jednego ośrodka do drugiego ulegają załamaniu, a tangensy kątów z obu stron granicy ośrodków spełniają równość:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2}. \quad (2.26)$$

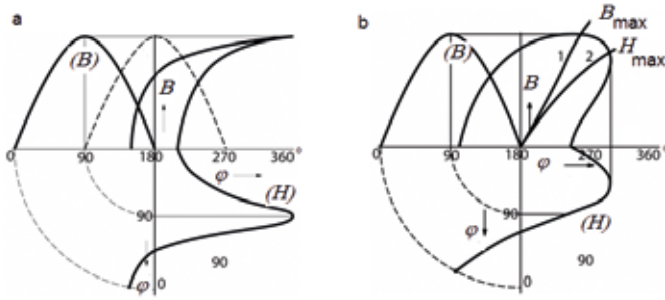
Jak wspomniano, w rozpatrywanych przypadkach ośrodkami są powietrze (μ_1) i materiał ferromagnetyczny (ferromagnetyk – μ_2), zatem:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 \ll \operatorname{tg} \alpha_2. \quad (2.27)$$

Zasadę ciągłości składowych normalnych indukcji magnetycznej i składowych stycznych natężenia pola magnetycznego na granicy ośrodków o przenikalności magnetycznej μ_1 i μ_2 przedstawiono na rysunku 2.8.



Rys. 2.8. Składowe pola magnetycznego na granicy dwóch ośrodków 1 i 2



Rys. 2.9. Rozbieżność wartości B_{max} i H_{max} w teoretycznej pętli histerezy (a) i pomierzonej pętli histerezy (b)

Do pomiaru składowej stycznej magnetycznego pola rozproszenia stosuje się przetworniki magnetorezystancyjne (MR, GMR) lub Halla. Konstrukcja struktury scalonej przetwornika MR powoduje, że przetwarza on natężenie składowej stycznej zewnętrznego pola, na proporcjonalne napięcie wyjściowe. Reguła ciągłości składowej stycznej natężenia pola magnetycznego rozproszenia zapewnia, że natężenie pola magnetycznego rozproszenia przy powierzchni elementu jest równe natężeniu w warstwie powierzchniowej materiału.

Pomiar za pomocą MR jest zakłócony określonym udziałem składowej ortogonalnej natężenia pola magnetycznego. Prawo ciągłości składowej stycznej umożliwia korelację wyników pomiaru natężenia pola magnetycznego przy powierzchni, spowodowane zmianami magnetomechanicznymi magnesowanego materiału. Taką zasadę pomiarową zastosowano w pomiarach sił i naprężeń w ferromagnetykach, oraz w szeroko rozumianej diagnostyce technicznej [29, 30, 36 – 39].

2.2.2. Ferromagnetyk w polu harmonicznym

Podczas magnesowania metali (przewodność elektryczna właściwa $\sigma > 0$) prądem przemiennym obserwujemy zjawisko prądów wirowych. Przemiennie pole magnetyczne wzbudzone prądami wirowymi wypiera z wnętrza próbki pole magnesujące, „zmniejszając” skuteczny przekrój próbki. Częstotliwość, przy której następuje spadek skutecznej przenikalności magnetycznej

do poziomu równego 0,7 wartości początkowej nazywa się częstotliwością graniczną. Metody indukcyjne lub prądów wirowych polegają na wykrywaniu różnic parametrów magnetycznych i elektrycznych materiału związanych z właściwościami fizycznymi materiału. Najpełniejszym wyznacznikiem zmian jest statyczna lub dynamiczna pętla histerezy magnetycznej materiału. Istotnym zagadnieniem jest stałość geometrii i warunków magnetycznych pomiaru. Częstotliwość badań można ograniczyć do częstotliwości zbliżonych do przemysłowych. Zalecana jest częstotliwość 60 Hz. Dobre wyniki uzyskiwano również przy częstotliwości przemysłowej 50 Hz, jak i częstotliwościach bardzo niskich 0,1 Hz, przy których prądy wirowe można pomijać.

Poznanie zmian własności magnetycznych materiału jest głównie związane z wyznaczaniem zależności indukcji od zewnętrznego pola magnetycznego. Należy przy tym zaznaczyć, że uzyskane w tych przypadkach wartości nie muszą odpowiadać właściwym parametrom materiału. Wartości dla prądu zmiennego są w tym przypadku zależne od kształtu badanych elementów. W celu zmierzenia wartości funkcjonalnych dla częstotliwości 60 Hz umieszcza się próbki w obwodzie zamkniętym. Próbki te są następnie cyklicznie przemagnesowywane przez uzwojenie magnesujące. Uzyskuje się w ten sposób dynamiczne pętle histerezy magnetycznej.

Odczytane wartości pozostałości magnetycznej i natężenia powściągającego nie odpowiadają wartościom uzyskanym w przypadku prądu stałego, czyli parametrom materiałowym, lecz wykazują większe wartości wskutek poszerzenia pętli, wynikające z prądów wirowych. Na kolejnych rysunkach (rys. 2.9a i rys. 2.9b) pokazano teoretyczne i rzeczywiste przebiegi pętli histerezy [67].

Powierzchnia pętli histerezy odpowiada całkowitym stratom przemagnesowania, a zatem sumie strat na histerezę i na prądy wirowe. Porównywanie powierzchni pętli histerezy jest jednym ze sposobów oceny zmian, zachodzących w materiale od obciążeń mechanicznych. Różnicę w magnesowaniu elementu ferromagnetycznego w polu przemiennym i stałym przedstawiono za pomocą analizy numerycznej obwodu magnetycznego wykonanego dla celów dydaktycznych, jak pokazano na fotografii (rys. 2.10). Zworę omawianego obwodu stanowi płaskownik z przewężeniem w środkowej jego części.

reklama

REKLAMA



Rys. 2.10. Obwód magnetyczny ze zwojnicą

Ważnym zagadnieniem podczas badania materiału polem magnetycznym jest prawidłowe rozmagnesowanie obwodu. Detekcja zmian indukcji magnetycznej, powodowana zmianą przekroju, wykrywana jest poprzez zmiany namagnesowania.

Jeżeli pole magnetyczne jest zmienne w czasie (pole harmoniczne), to w materiale mogą indukować się prądy wirowe, wówczas w analizie należy uwzględnić także równania pola elektrycznego. Równania Maxwella pola elektrycznego [28, 31, 57] wiążące natężenie pola elektrycznego \vec{E} , przewodność właściwą σ i gęstość prądu \vec{j} (różniczkowe prawo Ohma):

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (2.28)$$

Jedno z równań Maxwella opisuje pole elektryczne i pole magnetyczne:

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.29)$$

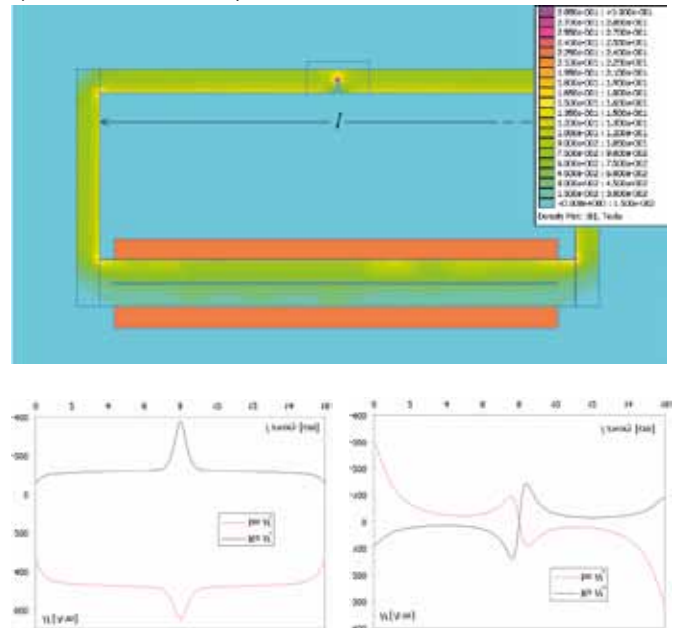
Program FEMM [57] umożliwia wprowadzenie szeregu danych zależnych od częstotliwości, co pomaga w modelowaniu materiałów zbudowanych z cienkich warstw jak i materiałów z efektami histerezy.

Program FEMM umożliwia analizowanie zagadnień dla trzech warunków brzegowych granicy obszaru jak i elementu:

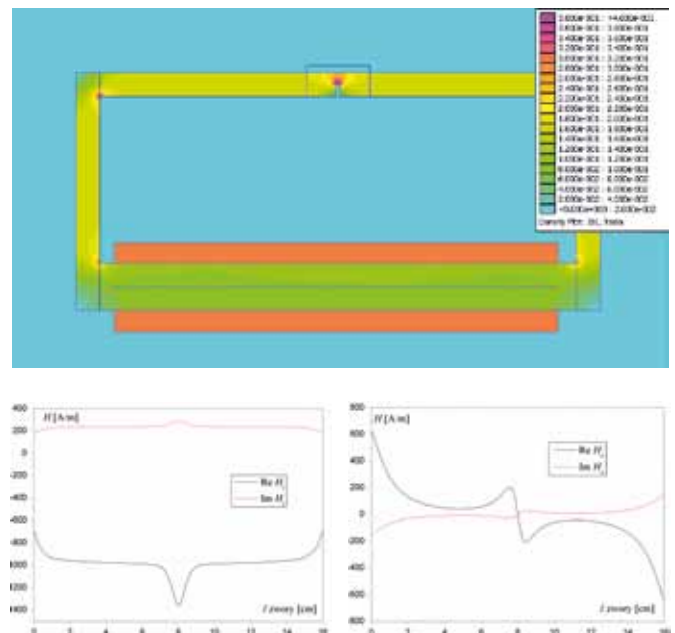
- Dirichleta – zdefiniowanego przez $A = 0$ tj. aby strumień magnetyczny nie przechodził przez granicę dwóch ośrodków,
- Neumanna – zdefiniowanego jako pochodna normalna potencjału A wzdłuż granicy $\partial A / \partial n = 0$, strumień przechodzi przez granicę pod kątem 90° ,
- Robina – zdefiniowanego jako $\frac{\partial A}{\partial n} = c_1 A = 0$ (dla rozwiązywania zagadnień z prądami wirowymi).

Za pomocą programu FEMM wyznaczono rozkłady indukcji magnetycznej w materiale obwodu magnetycznego (rys. 2.8). Zmieniono wymiar i lokalizację wycięcia w środkowej części zwory. Symulacje prowadzono dla magnesującego pola stałego oraz przemiennego o częstotliwości 60 Hz i 6 Hz. Oceniano rozkład magnetycznego pola rozproszenia oraz jego składowych dla zwory z materiału ferromagnetycznego i paramagnetycznego. W stalach paramagnetycznych obwód pola magnetycznego zamknięty zworą ze stali austenitycznej zachowuje się jakby tej zwory nie było (obwód otwarty). Zmiana parametrów magnetycznych materiału w miejscu przewężenia zwory (nacięcie) uwidacznia się w zmianie rozkładu zewnętrznego pola magnetycznego, sięgającego poza

obszar nacięcia. Obserwacje te w wielu przypadkach ułatwiają zrozumienie związków pola magnetycznego obiektu z defektem, z polem magnetycznym obiektu bez wad. Przedstawione symulacje zamieszczono na rysunkach 2.11 do 2.16.



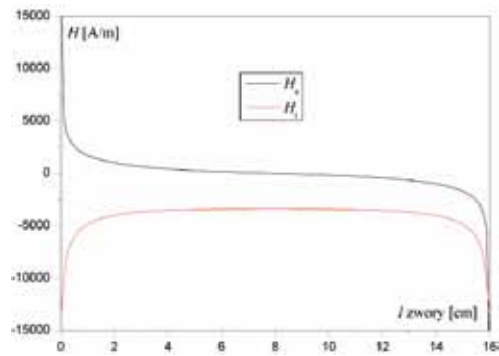
Rys. 2.11. Mapa indukcji magnetycznej w materiale zwory oraz rozkład składowych natężenia pola magnetycznego na długości zwory dla częstotliwości 50 Hz



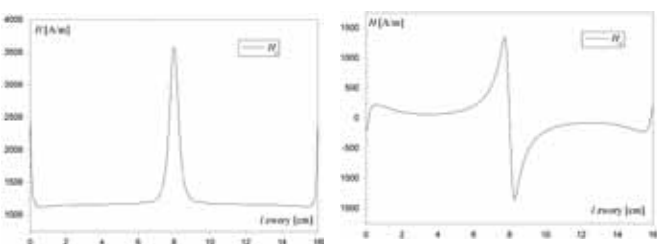
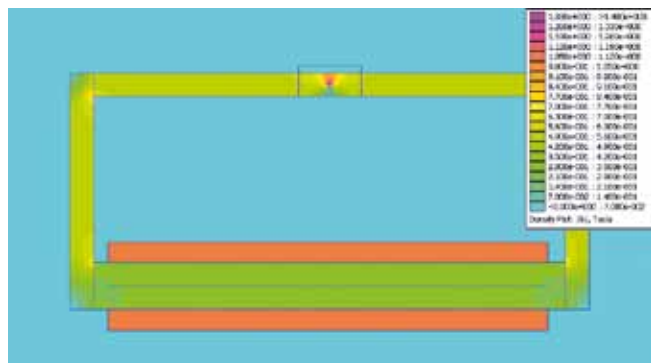
Rys. 2.12. Mapa indukcji magnetycznej w materiale zwory oraz rozkład składowych natężenia pola magnetycznego na długości zwory dla częstotliwości 6 Hz



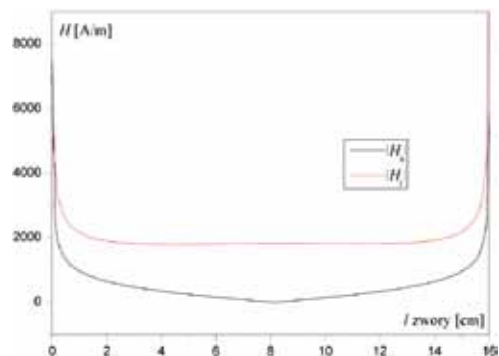
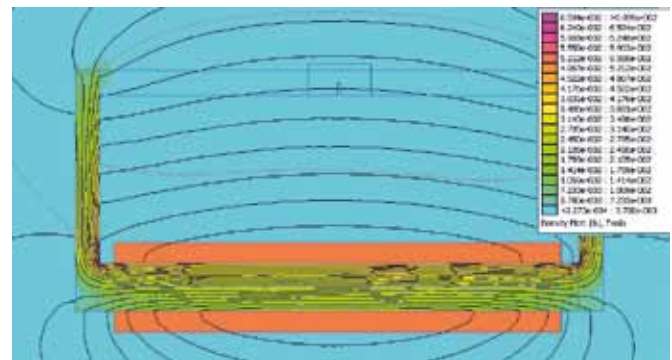
Rys. 2.13. Przykład wykrywania defektu podpowierzchniowego proszkiem magnetycznym fluorescencyjnym (materiał ferromagnetyczny, częstotliwość magnesowania 50 Hz)



Rys. 2.15. Przykład obwodu magnetycznego, w którym zwora jarmza wykonana jest ze stali austenitycznej (0 Hz)



Rys. 2.14. Mapa indukcji magnetycznej w materiale zwory oraz rozkład składowych natężenia pola magnetycznego na długości zwory dla pola stałego

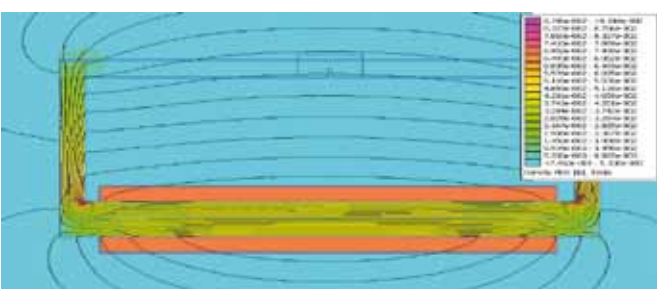


Rys. 2.16. Przykład obwodu magnetycznego, w którym zwora jarmza wykonana jest ze stali austenitycznej (60 Hz)

Defekt w materiale paramagnetycznym nie jest widoczny w polu magnetycznym stałym (i w polach o niskiej częstotliwości), co pokazano na wykresie (rys. 2.15).

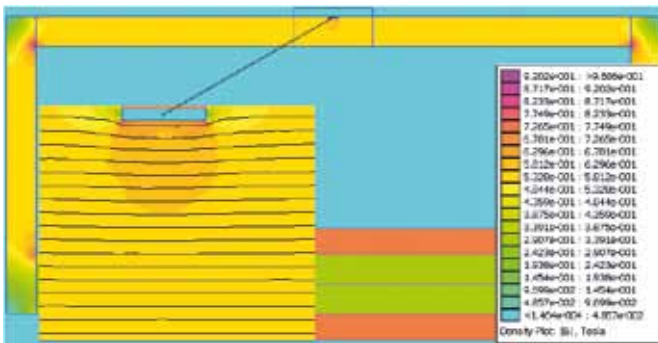
Defekty w stalach paramagnetycznych są wykrywalne, jeżeli związane są z przemianami fazowymi generującymi rozpad austenitu w martenzyt lub przemianami fazowymi. Przemiany te mogą być wynikiem odkształceń plastycznych, obciążeń zmęczeniowych czy termicznych. Powstałe defekty są wykrywalne, tak jak inne defekty w materiałach ferromagnetycznych. Odnosnie stali ferromagnetycznych należy pamiętać, że możliwość detekcji wad jest ograniczona głębokością ich zalegania oraz kształtem przedmiotu.

Możliwości badań austenitów są ograniczone ich założoną stabilnością. Stosowane w energetyce stale konstrukcyjne (kołpaki wirników generatorów i bandaże czoł uzwojeń silników) wykazują wysoką stabilność austenitu.

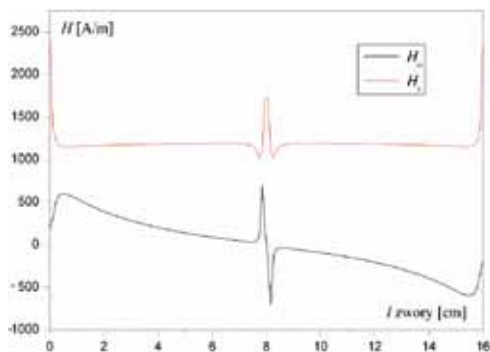


2.3. Pole magnetyczne elementu i defektu. Obrazowanie defektu

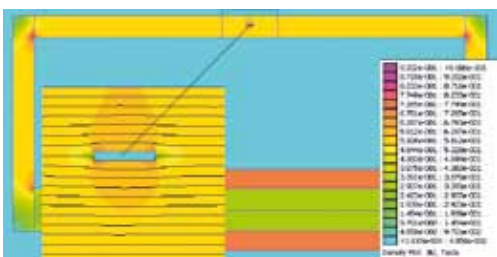
Wykrywanie defektów nieciągłości geometrycznej lub strukturalnej za pomocą metod pomiarowych wymaga znajomości podstawowych zasad dotyczących magnesowania, pola magnetycznego obiektu, jak i zakłócenia pola obiektu od defektu. Skokowa zmiana przekroju pokazana na rysunkach 2.17 do 2.21 jest widoczna w zewnętrznym polu magnetycznym, ze względu na znaczne zmiany wartości strumienia magnetycznego i indukcji magnetycznej. Defekt, którego wymiar jest ułamkiem części przekroju badanego elementu wpływa słabiej na rozkład pola magnetycznego. Dla zilustrowania zagadnienia posłużono [58, 76, 80, 81, 84, 88] się modelem symulacyjnym 2D z rysunku 2.10 wprowadzając defekt podpowierzchniowy „I”, zakłócający przepływ strumienia magnetycznego tuż pod powierzchnią próbki, jak pokazano na rysunku 2.17. Pole magnetyczne obwodu wzbudzone jest przepływem prądu stałego.



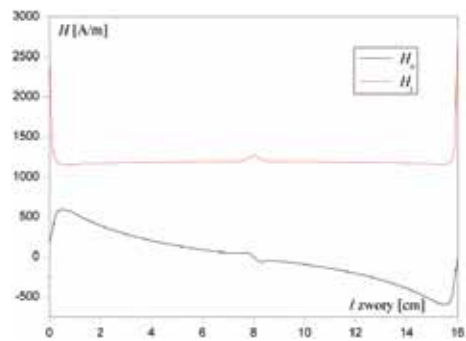
Rys. 2.17. Defekt podpowierzchniowy „I” oraz rozkład indukcji magnetycznej



Rys. 2.18. Składowe normalne i styczne natężenia pola magnetycznego defektu podpowierzchniowego „I”



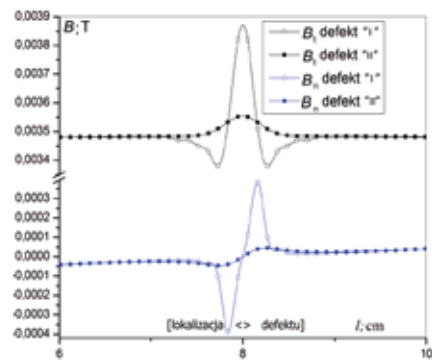
Rys. 2.19. Kolejna lokalizacja defektu podpowierzchniowego „II” oraz rozkład indukcji magnetycznej



Rys. 2.20. Składowe normalne i styczne natężenia pola magnetycznego defektu „II”

Głębokość zalegania defektu decyduje o możliwości jego detekcji. Dla defektów zlokalizowanych głębiej pod powierzchnią „II”, zaburzenie pola zewnętrznego próbki jest wielokrotnie mniejsze w stosunku do wartości maksymalnych pola danego elementu. Dla takiego defektu (zlokalizowanego na 1/3 grubości elementu) pole magnetyczne defektu w proporcji do pola magnetycznego całego elementu jest znikome, jak pokazano na poniższych rysunkach (rys. 2.19 do rys. 2.21)

Analizując rozkłady indukcji magnetycznej w środkowej części zwory (+10 mm -10 mm) stwierdzamy osłabienie udziału pola magnetycznego rozproszenia od defektu zalegającego głębiej w materiale – „II” o rząd wielkości w stosunku do wady zalegającej pod powierzchnią – „I”. Na rysunku 2.21 pokazano rozkłady składowych pola magnetycznego powierzchni zwory w środkowej jej części.



Rys. 2.21. Rozkłady składowych Bn oraz Bt indukcji pola magnetycznego na długości 4 cm w części środkowej zwory, dla defektu „I” i „II”

Stosunek wartości indukcji zewnętrznego pola magnetycznego przy powierzchni elementu kształtuje się w proporcji 10:1. Metody defektoskopowe rozróżniają metodyki badań ze względu na głębokość zalegania defektów. Dla głębokości do 10 mm stosowane są metody wiropądowe, dla wad głębiej zalegających stosowane są metody ultradźwiękowe. O wykrywalności decyduje także wymiar wady. Znane są przypadki inicjacji pęknięcia od defektu długości 250 nm (osie kolejowych zestawów kołowych).

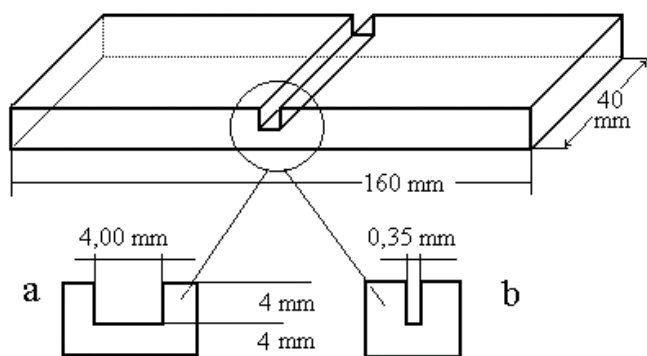
2.4. Metoda „pseudo-superpozycji” w zastosowaniu do analizy obrazów magnetyczno - proszkowych defektu

Rzeczywisty obraz defektu można uzyskać po analizie magnetycznego pola wektorowego rozpatrywanego defektu złożonego,

stosując metodę superpozycji. Przybliżoną ocenę struktury przestrzennej mniej złożonych defektów można przeprowadzić, analizując obrazy magnetycznej struktury domenowej, uzyskanej za pomocą proszku magnetycznego (doświadczenie autora). Przyspieszoną ocenę uzyskamy na drodze symulacji numerycznej, natomiast symulacja analityczna jest dość uciążliwa. W większości przypadków o przydatności elementu decyduje rozmiar defektu, a nie jego kształt oraz głębokość zalegania. W przypadku wałów napędowych lub osi pojazdów szynowych decydujące są defekty powierzchniowe i podpowierzchniowe (działanie karbu). Przedstawione poniżej doświadczenie badawcze przybliża możliwość uzyskania opisu rozkładu pola magnetycznego nad defektem za pomocą analizy oddziaływania dipoli magnetycznych (fragmentów powierzchni namagnesowanej). Dla zobrazowania działania analitycznego przyjęto wymiary defektu powierzchniowego o szerokości 0,35 mm lub 4,0 mm i głębokości 4 mm. Wykonano także model fizyczny. Rowki wycięto w środkowej części zwory obwodu magnetycznego, jak pokazano na rysunkach 2.22 i 2.23 [58].

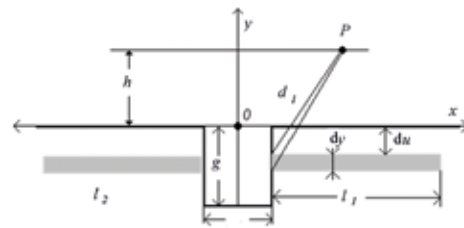


Rys. 2.22. Analizowany wycinek obwodu magnetycznego



Rys. 2.23. Kształty defektu

Sposób rozpatrywania oddziaływania dwóch dipoli l_1 i l_2 prowadzono według schematu pokazanego na rysunku 2.24. Dwa zastępcze dipole o grubości dy przemieszczają się od powierzchni na głębokość g z krokiem du . Badane jest oddziaływanie końców dipoli bliższych defektowi na kolejne punkty P zlokalizowane wzdłuż wycinka powierzchni na wysokości h .



Rys. 2.24. Schemat do obliczeń analitycznych

Napięcie magnetyczne, natężenie pola magnetycznego od założonej geometrii rowka jednego z dipoli, przedstawiono w kolejnych wzorach 2.30 do 2.32 [58]:

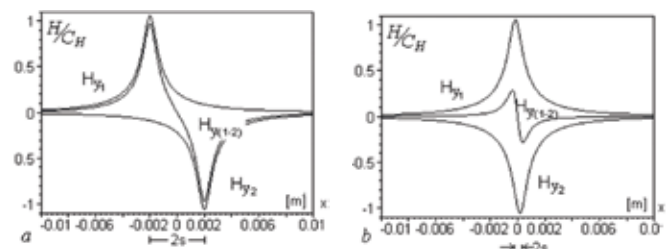
$$U_{H_1} = \frac{J \cdot V}{4\pi\mu_0\mu_v d_1^2} = \frac{C_H}{d_1^2}, \quad (2.30)$$

$$H_{y_1} = \frac{-\partial U_{H_1}}{\partial y}, \quad (2.31)$$

$$d_1^2 = (x-s)^2 + (y+g)^2. \quad (2.32)$$

Analizując pole magnetyczne bliższych biegunów obu dipoli uzyskano natężenie pola magnetycznego nad defektem, jak pokazano na rysunku 2.25 [46]:

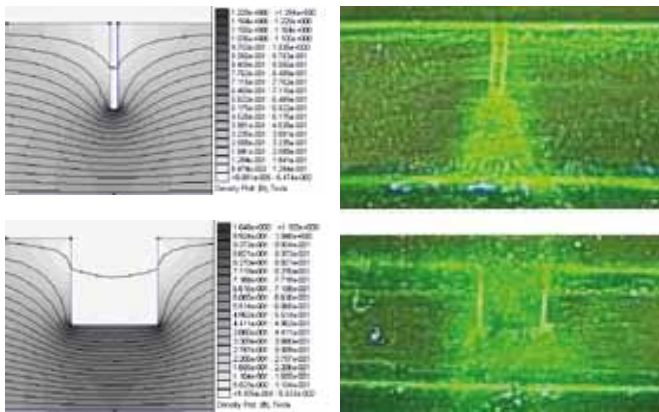
$$H_y = C_{H1} \int_0^s \frac{x-s}{((x-s)^2 + (y+u)^2)^{3/2}} du - C_{H1} \int_0^s \frac{x+s}{((x+s)^2 + (y+u)^2)^{3/2}} du. \quad (2.33)$$



Rys. 2.25. Jakościowy rozkład natężenia pola magnetycznego dla obu szerokości rowka 2s

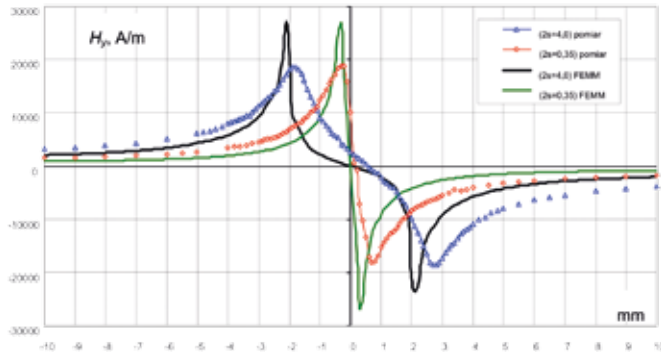
Przestrzenny rozkład zmian natężenia pola magnetycznego można także uzyskać rozpatrując szerokość próbki i umieszczając układ współrzędnych w jej środku geometrycznym. Szczegółową analizę tego zagadnienia przedstawiono w artykule czasopisma NDT&E [58]. Temat ten analizowano teoretycznie w Instytucie Technologii Pękania na Uniwersytecie Tohoku w Japonii.

W powyższych rozważaniach całkowicie pomijane są parametry magnetyczne materiału. Wpływ przenikalności materiału oraz przebieg krzywej pierwszego magnesowania odzwierciedla współczynnik CH, który należy dobierać na drodze doświadczalnej i to za każdym razem dla nowo badanego materiału ferromagnetycznego. Na rysunku 2.26 pokazano rozkłady indukcji magnetycznej na powierzchni bocznej w okolicy rowka, zarejestrowane magnetycznym proszkiem fluorescencyjnym.



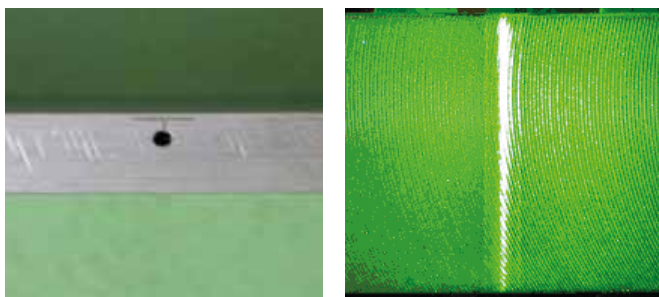
Rys. 2.26. Symulacja rozkładu indukcji magnetycznej w okolicy defektu i faktyczny obraz rozkładu indukcji magnetycznej uzyskany za pomocą fluorescencyjnego proszku magnetycznego

Wykonano także pomiar natężenia pola magnetycznego nad defektami. Widoczne na rysunku 2.27 przesunięcia składowych natężenia pola magnetycznego są wynikiem ograniczeń wynikających z budowy mikrostruktury pomiarowej mostka magneto-rezystancyjnego KMZ10A-C [37, 79, 80, 87] w stosunku do rzeczywistego wymiaru rowka.



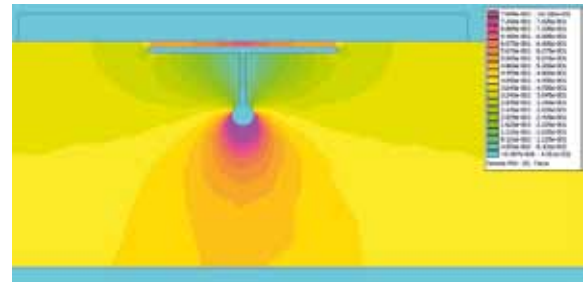
Rys. 2.27. Wynik symulacji i pomiaru składowej H_n nad defektem

Na rysunku 2.28 zilustrowano defekt podpowierzchniowy, będący zamierzonym wynikiem oddziaływania defektów skierowanych prostopadle i równoległe do kierunku strumienia magnetycznego.



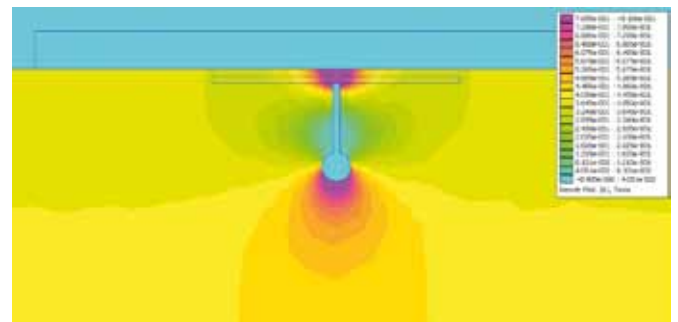
Rys. 2.28. Widok boczny defektu podpowierzchniowego oraz obraz magnetofluorescencyjny powierzchni

Otwór wywiercony u podstawy nacięcia w kształcie litery T wykonano w celu wprowadzenia drutu elektrodrażarki. Uzyskany obraz fluorescencyjny, magnetyczno-proszkowy, składa się z równoległego pasma o podwyższonej kumulacji proszku i linii biegnącej przez środek o zwiokrotnionej luminescencji. Świadczy to, że elementy składowe defektu znajdują się płytko pod powierzchnią. Szerokość defektów składowych jest skorelowana ze skalą rzeczywistą. Zmiany indukcji magnetycznej w okolicy wycięcia pokazano na rysunku 2.29.

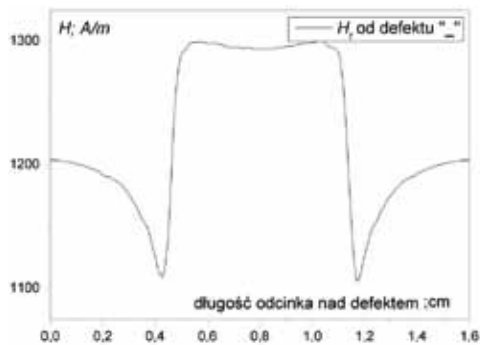


Rys. 2.29. Mapa indukcji magnetycznej oraz składowa styczna natężenia pola magnetycznego nad defektem

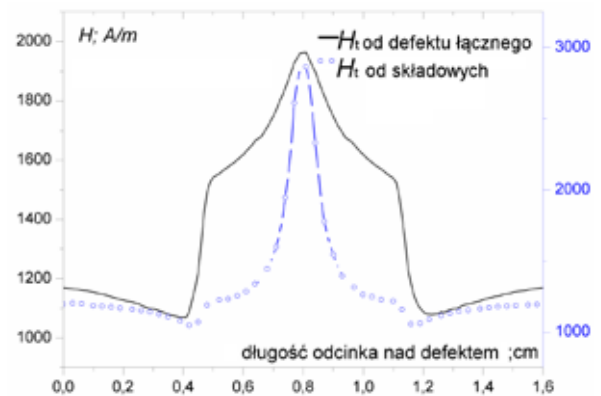
Składowe natężenia pola magnetycznego nad defektem zamieszczono na rysunkach 2.30 do 2.32.



Rys. 2.30. Mapa indukcji magnetycznej oraz przebiegi składowej stycznej natężenia pola magnetycznego nad składową defektu „I”



Rys. 2.31. Mapa indukcji magnetycznej oraz przebiegi składowej stycznej natężenia pola magnetycznego nad składową defektu „_”



Rys. 2.32. Porównanie składowych stycznych natężenia pola magnetycznego

Zewnętrzny obraz defektu będący wynikiem zmian skupienia ferromagnetycznych cząstek fluorescencyjnych nad defektem wydrążenia elektroiskrowego o kształcie „T” (rys. 2.28) jest zależny od składników defektów części pionowej i poziomej wydrążenia.