

**Procesy magnesowania i straty magnetyczne
w amorficznych materiałach magnetycznie miękkich
na bazie żelaza**

Zbigniew Stokłosa

**Procesy magnesowania
i straty magnetyczne
w amorficznych materiałach
magnetycznie miękkich
na bazie żelaza**



Uniwersytet Śląski



OFICyna WYDAWNICZA

Katowice 2012

Recenzent: prof. dr hab. inż. Danuta Szewieczek

ISBN 978-83-60743-64-5

Copyright © 2012 by Uniwersytet Śląski

Wydawca:
Oficyna Wydawnicza Wacław Walasek
Katowice, ul. Mieszka I 15
wacek@oficynaww.pl

Projekt okładki:
Ireneusz Olsza

Wydanie I

Spis treści

1. Wstęp	7
2. Materiały amorficzne na bazie żelaza	9
3. Procesy magnesowania w materiałach magnetycznie miękkich	12
3.1. Wielkości charakteryzujące materiały magnetycznie miękkie	16
3.1.1. Przenikalność magnetyczna	21
3.1.2. Magnesowanie w słabych polach magnetycznych	21
3.2. Procesy magnesowania w materiałach amorficznych magnetycznie miękkich	23
3.3. Relaksacja strukturalna w stopach amorficznych	26
3.4. Efekty wywołane przez lepkość magnetyczną	32
4. Straty magnetyczne	37
5. Teza i cel pracy	43
6. Materiał badań	44
7. Techniki eksperymentalne i metody opracowania wyników	46
7.1. Wyznaczanie parametrów magnetycznych w otwartym obwodzie magnetycznym	49
7.2. Pomiary magnesowania i strat magnetycznych za pomocą PPMS	52
7.3. Pomiary strat magnetycznych za pomocą precyzyjnego mostka RLC	52
8. Wyniki pomiarów	53
8.1. Badania strukturalne	53
8.2. Przenikalność magnetyczna	55
8.3. Dezakomodacja przenikalności magnetycznej	59
8.4. Współczynnik magnetostrykcji podłużnej	64
8.5. Procesy magnesowania	68
8.6. Temperaturowe zależności namagnesowania	73
8.7. Plastyczność	75
8.8. Energia stabilizacji	79
8.9. Straty magnetyczne całkowite	80
8.10. Straty magnetyczne i ich rozdział	85
9. Dyskusja wyników	88

10. Wnioski	96
11. Literatura	97
12. Wykaz ważniejszych oznaczeń	104
13. Streszczenie	108
14. Summary	109

1. Wstęp

Wśród materiałów magnetycznych, na uwagę zasługują materiały magnetycznie miękkie, z powodu ich szerokiego zastosowania w elektrotechnice, energetyce, elektronice, telekomunikacji, do wytwarzania pola magnetycznego, ekranowania pól elektromagnetycznych i magnetycznych w praktyce. Szeroko stosowane są stale krzemowe ze względu na to, iż krzem jako dodatek stopowy zmniejsza straty magnetyczne i ułatwia procesy magnesowania w żelazie technicznym. Lepsze właściwości magnetycznie miękkie posiadają stopy typu permalloy (stopy żelazo-nikiel), jednak ze względu na wysoki koszt produkcji są stosowane jedynie w specjalnych obwodach magnetycznych.

Nową grupę materiałów magnetycznie miękkich stanowią materiały amorficzne na bazie żelaza, kobaltu i niklu tzw. szkła metaliczne, otrzymane metodą szybkiego chłodzenia z fazy ciekłej [1–13]. Spośród nich ciekawe właściwości magnetycznie miękkie posiadają stopy na bazie żelaza. Można tu wyodrębnić trzy grupy stopów: FINEMET (stopy typu Fe-X-Si-B) [4], NANOPERM (Fe-X-B) [6–8] oraz HITPERM zawierające dodatkowo kobalt [6–8]. Stopy te są szeroko badane w ośrodkach badawczych i omawiane w literaturze naukowej [14–26].

W Zakładzie Materiałów Amorficznych i Nanokrystalicznych Instytutu Nauki o Materiałach Uniwersytetu Śląskiego badania stopów amorficznych na bazie żelaza, realizowano w ramach badań statutowych oraz projektów badawczych, Wyniki badań opublikowano w kilkudziesięciu publikacjach, między innymi w pracach [27–39].

Ważnymi parametrami charakteryzującymi materiały magnetycznie miękkie są wielkości określające procesy ich magnesowania oraz, z ekonomicznego punktu widzenia, straty magnetyczne. Materiały magnetycznie miękkie winny charakteryzować się dużą indukcją magnetyczną nasycenia (magnetyzacją, polaryzacją magnetyczną), wysoką przenikalnością magnetyczną oraz niskimi stratami energii przy przemagnesowaniu przemiennym polem magnetycznym [3, 8–11, 24–26]. Straty magnetyczne można podzielić na: straty na histerezę magnetyczną (związane z procesami magnesowania), straty wiropądowe (związane z magnesowaniem polem magnetycznym przemiennym), straty dodatkowe związane ze zjawiskami relaksacyjnymi oraz wibracyjnym i rotacyjnym ruchem atomów bądź cząstek zawartych w materiale.

Wyjaśnienie mechanizmów rządzących procesami magnesowania w szklach metalicznych ma znaczenie z poznawczego punktu widzenia. Natomiast badanie strat magnetycznych i ich rozdzielanie ma znaczenie użytkowe. Warto podkreślić, że wielkość strat magnetycznych zależy od zmian energii podczas procesów magnesowania.

W rozdziale 2 niniejszej pracy omówiono ogólne materiały amorficzne oraz magnetyczne materiały amorficzne na bazie żelaza. Rozdział 3 niniejszej pracy dotyczy procesów magnesowania w materiałach magnetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem ferromagnetycznych materiałów amorficznych. W rozdziale tym omówiono energie wchodzące do całkowitej energii swobodnej podczas magnesowania materiałów magnetycznych. Szerzej omówiono te przyczynki do energii całkowitej, które decydują o magnesowaniu materiałów amorficznych. Rozdział 4 zawiera metody wyznaczania strat magnetycznych w badanych materiałach. W rozdziale 6 przedstawiono materiał badań oraz technologię produkcji badanych stopów. Metodologię pomiarów i opracowania wyników zawiera rozdział 7. W rozdziale 8 zawarto wyniki pomiarów, których omówienie przedstawiono w rozdziale 9. Wnioski z badań zestawiono w 10 rozdziale pracy.

13. Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań stopów amorficznych na bazie żelaza z grupy NANOPERM typu $Fe_{98-x}Nb_2B_x$ ($x=16, 18, 20$) oraz z grupy FINEMET o składach chemicznych $Fe_76Cr_2Si_{13}B_9$, $Fe_{75}Cu_1Nb_2Si_{13}B_9$ i $Fe_{76-x}Ag_xNb_2Si_{13}B_9$ ($x=0,5; 0,75; 1,00$). Właściwości fizyczne stopów badano w temperaturze pokojowej w stanie wyjściowym oraz po jednogodzinnych wygrzewaniach w przedziale temperatur 300–900 K (z krokiem 25 K). Magnetyzację oraz elektryczny opór właściwy dla próbek w stanie wyjściowym badano w funkcji temperatury *in situ* dla różnych prędkości grzania. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że właściwości magnetyczne miękkie badanych stopów drastycznie rosną (przenikalność magnetyczna rośnie od kilku do kilkunastu razy) poprzez zastosowanie kontrolowanej obróbki cieplnej oraz dobór dodatków stopowych w odpowiedniej ilości.

W pracy szczegółowo badano straty magnetyczne w słabych zmiennych polach magnetycznych oraz przeprowadzono rozdział strat na straty histerezowe, straty wiroprądowe oraz straty dodatkowe (relaksacyjne). Stwierdzono, że wygrzewanie w temperaturze T_{op} (temperatura optymalizacji) powoduje spadek strat na histerezę magnetyczną, wzrost strat na prądy wirowe (związany ze wzrostem przenikalności magnetycznej), oraz drastyczny spadek strat dodatkowych. Straty dodatkowe są związane z obecnością relaksatorów (mikropustek). Otrzymane wyniki wskazują, że badane stopy po wygrzewaniu w temperaturze T_{op} są bardzo dobrymi materiałami magnetycznie miękkimi i mogą być stosowane w wielu gałęziach przemysłu.

14. Summary

In the present work, a detailed examinations of amorphous alloys based on iron of NANOPERM ($Fe_{98-x}Nb_2B_x$ ($x=16, 18, 20$)) and FINEMET ($Fe_76Cr_2Si_{13}B_9$, $Fe_{75}Cu_1Nb_2Si_{13}B_9$, $Fe_{76-x}Ag_xNb_2Si_{13}B_9$ ($x=0,5; 0,75; 1,00$)) type were presented and discussed. Physical properties of these alloys were measured at room temperature for samples in the as quenched state and annealed for one-hour at temperatures from the range 300–900 K (step 25 K). Magnetization and resistivity of the as quenched samples were also measured versus temperature with different heating rates. Based on the obtained experimental results it was concluded that soft magnetic properties of these materials can be drastically improved (permeability increases at least a few times) by applying a suitable heat treatment which depends on alloying additions. Special attention was paid to determine magnetic losses in AC weak magnetic field. The separation of total magnetic losses on hysteresis losses, eddy current losses and additional (relaxation) losses was carried out. It was shown, that annealing at temperature T_{op} (the so-called one-hour optimization temperature) causes a decrease of the hysteresis losses, an increase of the eddy current losses (due to increase of permeability) and a drastic decrease of the relaxation losses. These results indicate that the examined amorphous alloys annealed at T_{op} are very good soft magnets and can be applied in many different branches of industry.