

## Influence of boron and silicon on the magnetic properties of iron-based alloys

### Wpływ boru i krzemu na własności magnetycznych stopów na bazie żelaza

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań struktury i wybranych własności magnetycznych szkieł metalicznych na osnowie żelaza. Próbkę do badań w postaci taśm wytworzono metodą "melt spinning". W ramach badań własności magnetycznych wyznaczono indukcyjność nasycenia oraz natężenie pola koercyjnego i wartość namagnesowania. Zakładając, że namagnesowanie można podobnie zdefiniować jak w przypadku paramagnetyków (klasyczna teoria ferromagnetyzmu wykorzystująca model pola molekularnego – pola Weissa) opracowano metodę opisu własności magnetycznych dla badanych stopów amorficznych. Ilościowy wpływ pierwiastków stopowych (B, Si) na własności magnetyczne badanych materiałów pozwolił określić wartość współczynnika mocy wpływu  $\beta$ , której wielkość zastępuje stałą pola molekularnego. **Słowa kluczowe:** szkło metaliczne, stopy amorficzne na osnowie Fe, własności magnetyczne, pole Weiss

#### Abstract

The paper presents the results of structural and magnetic properties of selected iron-based metallic glasses. The samples in the form of tapes were prepared by "melt spinning". The study of the magnetic properties were determined saturation induction, magnetic coercivity and value of the magnetization. Taking advantage of the fact that the magnetization is defined similarly as in the case of paramagnetics (a classic theory of ferromagnetism that uses molecular field model – Weiss field) description model of the magnetic properties of amorphous material. Quantitative impact of alloying elements (B, Si) on the magnetic properties of the material allowed to determine the effect of power factor  $\beta$ , which replaces the fixed constant of molecular field.

**Keywords:** metallic glass, amorphous alloys Fe-based, magnetic properties, Weiss field

## 1. Wprowadzenie

Problem strat energii w sieciach energetycznych staje się coraz bardziej aktualny z uwagi na: rosnące normy emisji CO<sub>2</sub>, przewidywany deficyt mocy

---

<sup>1</sup>adrian-radon@wp.pl, Studenckie Koło Naukowe Materiałów Magnetycznych i Kompozytowych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska w Gliwicach, www. http://mt.polsl.pl/

<sup>2</sup>wojtek.lonski@gmail.com, Studenckie Koło Naukowe Materiałów Magnetycznych i Kompozytowych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska w Gliwicach, www. http://mt.polsl.pl/

<sup>3</sup>rafal.babilas@polsl.pl, Zakład Materiałów Nanokrystalicznych i Funkcjonalnych oraz Zrównoważonych Technologii Proekologicznych, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska w Gliwicach, www. http://mt.polsl.pl/

wytwórczych energii elektrycznej oraz wysokie ceny surowców energetycznych. Zastosowanie materiałów zmniejszających starty energii warunkuje więc zwiększenie opłacalności jej produkcji i dystrybucji. Wymiana tradycyjnego transformatora na urządzenie posiadające rdzeń amorficzny zwraca się zależnie od warunków w przedziale 8-15 lat, trzeba jednak pamiętać że transformator jest urządzeniem pracującym powyżej 20 lat. Można więc łatwo dostrzec duże korzyści płynące z wymiany tradycyjnych transformatorów na te wyposażone w rdzenie amorficzne [1].

Jednym z kluczowych elementów infrastruktury przesyłu energii elektrycznej są transformatory. Znajdują one zastosowanie przy elektrowniach zwiększając napięcie w sieci ograniczając tym samym straty przy przesyłach energii, a następnie w pobliżu odbiorców prądu obniżając napięcie do poziomu użytecznego dla odbiorców energii elektrycznej. Straty podczas zmiany napięcia prądu są powiązane z koercją magnetyczną materiału rdzenia transformatora - im jest ona mniejsza tym materiał jest bardziej miękki magnetycznie i maleją również starty energii.

Koercję magnetyczną określa się wartość zewnętrznego pola magnetycznego jaką trzeba przyłożyć do ferromagnetyka, aby pozostałość magnetyczną była równa zero. Można ją odczytać z zależności indukcji magnetycznej od natężenia pola dla danego materiału. Przedstawiana jest jako wielkość obszaru zawartego wewnątrz pętli histerezy [2].

Metalowe materiały amorficzne charakteryzują się stosunkowo niewielką wartością natężenia pola koercji wynoszącą zazwyczaj od 0,004 do 0,02kA/m [3], natomiast dla stali krzemowych wartość koercji mieści się w zakresie od ok. 0,032 do 0,072 kA/m [4]. Dane te wskazują, że stopy amorficzne mogą być potencjalnymi kandydatami do zastąpienia obecnie stosowanych na rdzenie transformatorów konwencjonalnych stali krzemowych.

Jednym z najczęściej stosowanych pierwiastków stopowych w szklach metalicznych na osnowie żelaza jest bor. Bor wpływa jednak niekorzystnie na własności ferromagnetyczne stopów żelaza. Wynika to z faktu, iż jest on pierwiastkiem diamagnetycznym, a więc pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego wytwarza własne pole przeciwnie skierowane do zewnętrznego. Powoduje to zmniejszenie pola "docierającego" do uzwojenia i zmniejszenie wydajności transformatora [2].

## 2. Cel pracy

Celem niniejszej pracy jest określenie wpływu poszczególnych pierwiastków stopowych na własności ferromagnetyczne stopów amorficznych (szkieł metalicznych) na osnowie żelaza. Badania przeprowadzono na trzech stopach  $Fe_{80}B_{20}$ ,  $Fe_{75}Si_{15}B_{10}$ ,  $Fe_{95}B_3Si_2$  odlanych w postaci taśm o składzie

chemicznym wyrażonym w procentach atomowych. Własności magnetyczne szkieł metalicznych na osnowie żelaza zależą od stężenia metaloidów (B, Si), których udział w stopie decyduje o zdolności do zeszklenia danego materiału. Krzem, podobnie jak bor, jest diamagnetykiem, ale dużo słabszym co pozwala sądzić, że stopy, w których zastąpiono bor krzemem będą posiadać lepsze własności ferromagnetyczne [5].

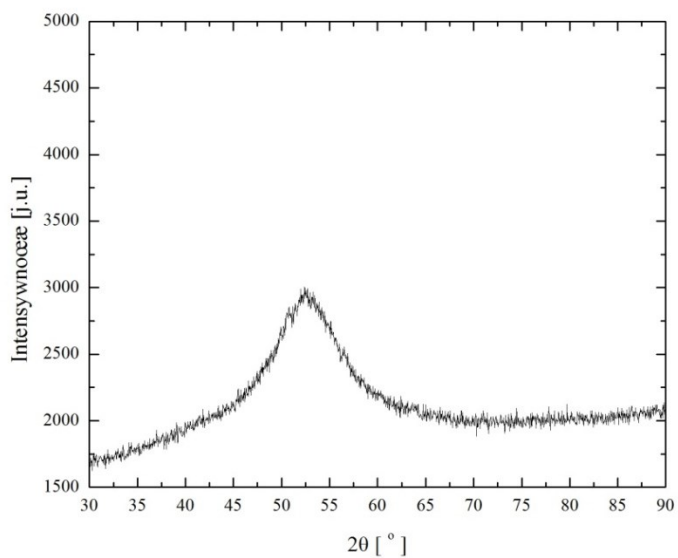
### 3. Materiał do badań

Materiał do badań wytworzono dwuetapowo. Pierwszym etapem było wytworzenie stopu wstępnego uzyskanego w procesie indukcyjnego topienia składników stopowych. Drugi etap obejmował odlanie szkieł metalicznych w postaci taśm za pomocą metody *melt spinning*. Metoda *melt spinning* polega na odlaniu cieczy metalicznej na powierzchnię wirującego, miedzianego bębna w próżni lub atmosferze ochronnej (np. argonu). W procesie tym uzyskano próbki w postaci taśm o grubości 0,1 mm oraz szerokości 10 mm przy zastosowaniu prędkości liniowej bębna wynoszącej 30 m/s.

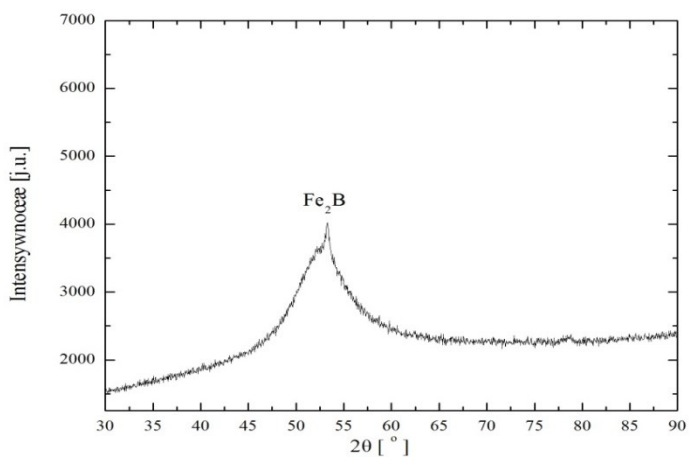
Badania rentgenograficzne analizowanych szkieł metalicznych w postaci taśm w stanie bezpośrednio po odlaniu przeprowadzono przy użyciu dyfraktometru wyposażonego w lampę o anodzie kobaltowej ( $\lambda_{CoK\alpha} = 1.74178 \text{ \AA}$ ). Rejestracji linii dyfrakcyjnych dokonano metodą „step-scanningu” w zakresie kątowym  $2\theta$  od  $30^\circ$  do  $90^\circ$ .

Rentgenowskie badania dyfrakcyjne stopu  $Fe_{80}B_{20}$  oraz  $Fe_{75}Si_{15}B_{10}$  w stanie po odlaniu wykazują, że badane materiały posiadają strukturę amorficzną.

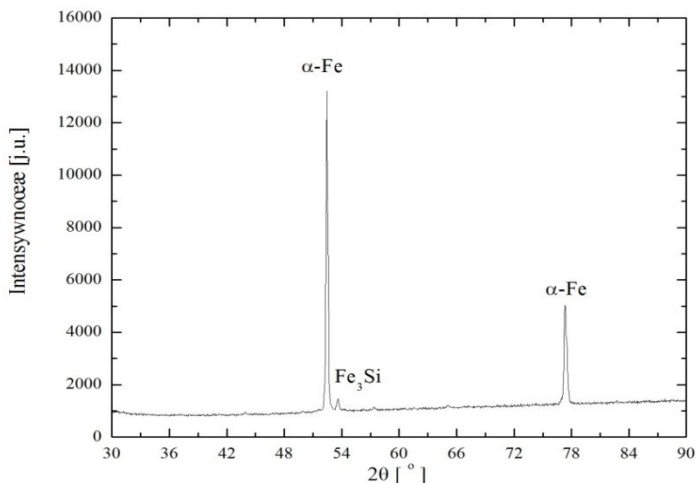
Na dyfraktogramie szkła metalicznego  $Fe_{80}B_{20}$  odlanego w postaci taśm (Rysunek 1) stwierdzono szerokie, rozmyte widmo charakterystyczne dla struktury amorficznej stopów żelaza. W przypadku dyfraktogramu stopu  $Fe_{75}Si_{15}B_{10}$  na tle amorficznego widma zidentyfikowano pik o małej intensywności pochodzący od fazy krystalicznej  $Fe_2B$  (Rysunek 2). Wynik ten może świadczyć o niewielkim udziale krystalitów fazy  $Fe_2B$  w amorficznej osnowie. Badania dyfrakcyjne stopu  $Fe_{95}B_3Si_2$  wykazały krystaliczną strukturę badanego materiału. Na dyfraktogramie zidentyfikowano linie dyfrakcyjne o dużej intensywności pochodzące od krystalicznej fazy  $\alpha$ -Fe oraz  $Fe_3Si$  (Rysunek 3).



Rysunek 1. Dyfraktogram rentgenowski stopu  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$  w postaci taśmy w stanie po odlaniu [opracowanie własne]



Rysunek 2. Dyfraktogram rentgenowski stopu  $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$  w postaci taśmy w stanie po odlaniu [opracowanie własne]



Rysunek 3. Dyfraktogram rentgenowski stopu  $\text{Fe}_{95}\text{B}_3\text{Si}_2$  w postaci taśmy w stanie po odłaniu [opracowanie własne]

## 4. Podstawy teoretyczne wpływu składu pierwiastkowego na właściwości magnetyczne materiału

### 4.1. Całkowity moment pędu atomu

W przypadku analizy pewnych zjawisk (np. rozpatrując własności magnetyczne materii) atom można traktować jako zamknięty obiekt. Znając konfiguracje elektronowe poszczególnych pierwiastków można wyznaczyć całkowity moment pędu danego atomu ( $J$ ). W przypadku atomów wieloelektronowych do wyznaczenia tej wielkości rozpatruje się jeden z dwóch przypadków:

- sprzężenie j-j (bezpośrednie), kiedy to oddziaływanie relatywistyczne jest wkładem dominującym, a wkład korelacyjno-wymienny jest zaniedbywalny;
- sprzężenie LS (Russella-Saundersa), w którym to sprzężenie spin-orbita jest niewielkie w porównaniu z wkładem korelacyjno-wymiennym [6].

Zarówno w przypadku boru, żelaza jak i krzemu sprzężenie spin-orbita (s-o) okazuje się być dominujące. Wynika to z mniejszej od 42 liczby atomowej wymienionych pierwiastków [2, 7].

Dla sprzężenia bezpośredniego całkowity moment pędu atomu określa wzór (1):

$$\hat{J} = \sum_i \hat{j}_i \quad (1)$$

gdzie:  $\hat{j}_i$  – całkowity moment pędu poszczególnych elektronów z niezależnych podpowłok.

W przypadku podpowłok zapełnionych całkowicie zarówno wypadkowy spin, jak i orbitalny moment pędu są równe zero. Parametry określające podstawowy stan atomu możliwe są do wyznaczenia przy zastosowaniu reguł Hunda:

- elektrony w atomie obsadzają podpowłoki w taki sposób, aby uzyskany w ten sposób wypadkowy spinowy moment pędu był maksymalny (przy zachowaniu zakazu Pauliego),
- elektrony obsadzają podpowłoki tak, aby przy zachowaniu reguły pierwszej uzyskać maksymalną orbitalną liczbę kwantową,
- multiplety podstawowe niezapełnionych podpowłok zależą od ich obsadzenia [2].

W Tabeli 1. zebrano podstawowe wartości wielkości charakteryzujących atomy pierwiastków wchodzących w skład badanego materiału.

Tabela 1. Konfiguracja elektronowa i wartości liczb kwantowych dla pierwiastków wchodzących w skład badanych stopów

Pierwiastek	Konfiguracja elektronowa	Wypadkowy spinowy moment pędu $S$	Wypadkowy orbitalny moment pędu $L$	Całkowity moment pędu atomu $J$
Fe	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^6$	2	2	4
B	$1s^2 2s^2 2p^1$	1/2	1	1/2
Si	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$	1	1	2

Źródło: Opracowanie własne

## 4.2. Funkcja Brillouina i czynnik Landego

Funkcja Brillouina (2) wraz z funkcją Langevina (3) stanowią podstawowe funkcje służące do opisu zarówno paramagnetyzmu jak i ferro-, antyferro-, czy ferrimagnetyzmu. Funkcja Brillouina wraz ze wzrostem wartości całkowitego momentu pędu atomu dąży do funkcji Langevina ( $J \rightarrow \infty$ ) co przedstawiono na rysunku 4. Sam przebieg funkcji Brillouina dla słabych pól magnetycznych ( $y \approx 0$ ) jest trudny do zobrazowania z powodu jej charakteru – jest ona równa różnicy dwóch wyrazów rozbieżnych do nieskończoności. Jednak dla  $J = \frac{1}{2}$  jak i  $J > \frac{1}{2}$  zobrazować można ją poprzez tangens hiperboliczny (rysunek 4.) [2].

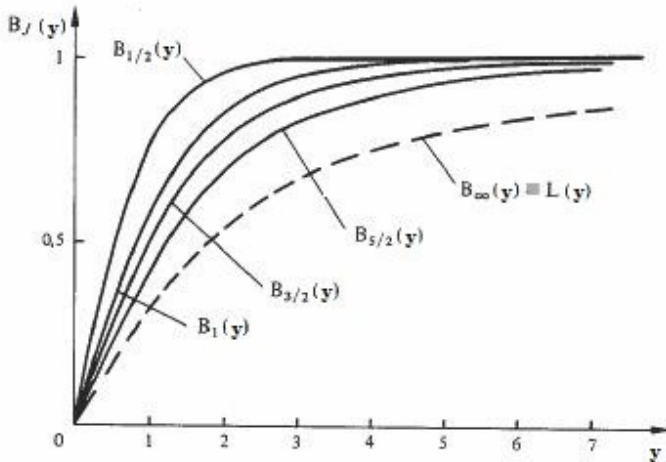
$$B_j(y) = \frac{2J+1}{2J} \operatorname{ctgh} \left( \frac{2J+1}{2J} y \right) - \frac{1}{2J} \operatorname{ctgh} \left( \frac{1}{2J} y \right) \quad (2)$$

$$L_j(y) = ctgh(y) - \frac{1}{y} \quad (3)$$

gdzie:  $J$  – całkowity moment pędu cząstki,  $y$  – moc pola magnetycznego (4)

$$y = \frac{g_j \mu_B B J}{k_B T}, \quad (4)$$

gdzie:  $g_j$  – czynnik Landego,  $\mu_B$  – magneton Bohra,  $B$  – indukcja,  $J$  – całkowity moment pędu cząstki,  $k_B$  – stała Boltzmanna,  $T$  – temperatura.



Rysunek 4. Funkcja Brillouina dla różnych wartości parametru  $J$  (linia przerywana określa funkcję Langevina) [8]

Dokonując oszacowania stałej pola molekularnego oraz współczynnika mocy wpływu poszczególnych pierwiastków na własności ferromagnetyczne materiału należy rozwiązać funkcje Brillouina (2) dla rozpatrywanych atomów oraz wyznaczyć wartość czynnika Landego  $g_j$  (5), który zależy zarówno od całkowitego momentu pędu atomu ( $J$ ), orbitalnego momentu pędu ( $L$ ) i spinowego momentu pędu [2].

$$g_j = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (5)$$

Otrzymane wartości czynnika Landego ( $g_j$ ) i funkcji Brillouina ( $B_j(y)$ ) zestawiono w Tabeli 2.

Tabela 2. Wartości czynnika Landego i rozwiązania funkcji Brillouina dla poszczególnych pierwiastków wchodzących w skład analizowanych materiałów

Pierwiastek	Wartość czynnika Landego $g_j$	Wartość funkcji Brillouina $B_j(y)$
Fe	1.50	3.77E-04
B	0.67	5.03E-05
Si	1.50	2.26E-04

Źródło: Opracowanie własne

### 4.3. Model pola molekularnego

Ferromagnetykami określa się materiały, w których momenty magnetyczne jednego rodzaju dążą do równoległego uporządkowania. W rezultacie w tego typu materiałach poniżej temperatury Curie występuje namagnesowanie, mimo iż na materiał nie działa zewnętrzne pole magnetyczne. Najlepszymi przykładami ferromagnetyków są metale przejściowe tj. żelazo, kobalt, nikiel, a także metale ziem rzadkich: neodym czy gadolin [2,9].

W przypadku opisu ferromagnetyzmu stosuje się głównie dwa modele: pasmowy model ferromagnetyzmu opracowany przez Slatera i Stonera oraz model oparty na klasycznej teorii ferromagnetyzmu bazującej na przybliżeniu pola Weissa. W przypadku opisu własności magnetycznych i termicznych stopów żelaza najczęściej stosowany jest drugi model – z uwagi na lepszą zgodność wyników teoretycznych z eksperymentalnymi. Stosując przybliżenie pola molekularnego namagnesowanie ferromagnetyka wyznaczyć można jako namagnesowanie paramagnetycznego materiału w polu efektywnym (6) (polu będącym wektorową sumą pola zewnętrznego i pola molekularnego). Samo pole molekularne jest proporcjonalne do namagnesowania, a współczynnikiem proporcjonalności jest tzw. stała pola molekularnego (stała Weissa) zdefiniowana równaniem (7) [2].

$$M(B, T) = M_s B_J \left( \frac{g_j \mu_B (B + \lambda M) J}{k_B T} \right) \quad (6)$$

gdzie:  $B$  – indukcja,  $T$  – temperatura,  $M_s$  – magnetyzacja nasycenia,  $B_J$  – funkcja Brillouina,  $g_j$  – czynnik Landego,  $\mu_B$  – magneton Bohra,  $\lambda$  – stała Weissa,  $M$  – magnetyzacja,  $J$  – całkowity moment pędu cząstki,  $k_B$  – stała Boltzmanna.

$$\lambda = \frac{2Jz_j V}{g^2 \mu_B^2 N} \quad (7)$$



gdzie:  $J$  – całkowity moment pędu cząstki,  $z_i$  – ilość najbliższych sąsiadów rozpatrywanego atomu,  $V$  – objętość zajmowana przez  $N$  cząstek,  $g$  – stała równa 2,  $\mu_B$  – magneton Bohra,  $N$  – ilość cząstek.

Model pola molekularnego jest przybliżeniem wynikającym z trudności zdiagonalizowania hamiltonianów (zarówno w formie hamiltonianu Heisenberga jak i Isinga) opisujących oddziaływanie w układach z silnymi, krótko-zasięgowymi oddziaływaniami wymiany. Hamiltonian w przybliżeniu pola molekularnego przyjmuje postać wyrażoną równaniem (8). W przypadku analizy wielkości magnetycznych drugi składnik hamiltonianu często pomija się, a jego znaczenie uwidacznia się podczas analizy entropii lub ciepła właściwego [2].

$$\hat{H}^{MF} = \sum_j g\mu_B \hat{S}_j \cdot [\mathbf{B} + \lambda \mathbf{M}] + \frac{1}{2} \mathbf{M} \cdot \lambda \mathbf{M} V \quad (8)$$

gdzie:  $g$  – stała równa 2,  $\mu_B$  – magneton Bohra,  $\hat{S}_j$  – operator całkowitego spinu cząstki  $j$ ,  $\mathbf{B}$  – wektor indukcji pola magnetycznego,  $\lambda$  – stała Weissa,  $\mathbf{M}$  – moment magnetyczny jednostki objętości (9),  $V$  – objętość układu.

$$\mathbf{M} = -\frac{N}{V} g\mu_B \langle \mathbf{S}_j \rangle \quad (9)$$

gdzie:  $N$  – ilość cząstek,  $V$  – objętość zajmowana przez  $N$  cząstek,  $g$  – stała równa 2,  $\mu_B$  – magneton Bohra,  $\mathbf{S}_j$  – całkowity spin cząstki  $j$ .

## 5. Charakterystyka magnetyczna badanych materiałów

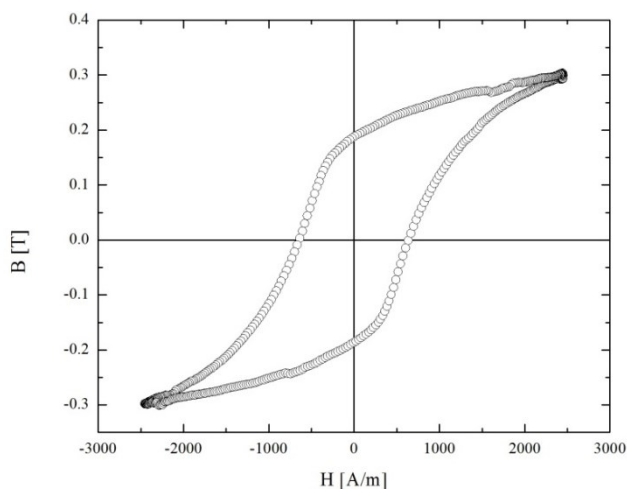
Badania magnetyczne wybranych stopów na osnowie żelaza w postaci taśm przeprowadzono na stanowisku przeznaczonym do wyznaczania pętli histerezy magnetycznej – Ferrometrze. W celu wyznaczenia pętli histerezy magnetycznej badane próbki zwinięto w krążki, a następnie nawinięto na nie kable prądowe w celu namagnesowania materiału. Zabieg taki jest opisany w normie DIN 54 130 jako jedna z metod namagnesowania poprzez przepływ prądu przy użyciu cewek formowanych z kabli prądowych [10]. Analiza pętli histerezy magnetycznej potwierdziła, że badane materiały charakteryzują się własnościami ferromagnetycznymi. Dodatkowo stwierdzono istotny wpływ struktury i składu chemicznego na własności magnetyczne. Analiza pętli histerezy pozwoliła także określić, który z materiałów jest materiałem o najlepszych własnościach magnetycznie miękkich (charakteryzuje się najmniejszą koercją -  $H_c$ ), a także wyznaczyć indukcję nasycenia -  $B_s$  i namagnesowanie -  $M_s$  (Tabela 3.)

Tabela 3. Wartości wybranych parametrów charakteryzujących własności magnetyczne badanego materiału

stop	indukcja nasycenia [T]	namagnesowanie [A/m]
Fe <sub>80</sub> B <sub>20</sub>	0.25999	204746
Fe <sub>75</sub> Si <sub>15</sub> B <sub>10</sub>	0.34428	271503.2
Fe <sub>95</sub> B <sub>3</sub> Si <sub>2</sub>	0.30325	238883.9

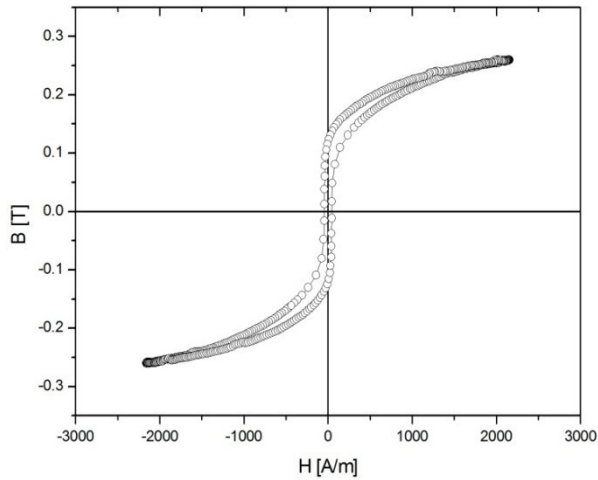
Źródło: Opracowanie własne

Największym natężeniem pola koercji charakteryzuje się stop Fe<sub>95</sub>B<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> ( $H_c = 576.1$  A/m), którego pętla została przedstawiona na Rysunku 5.



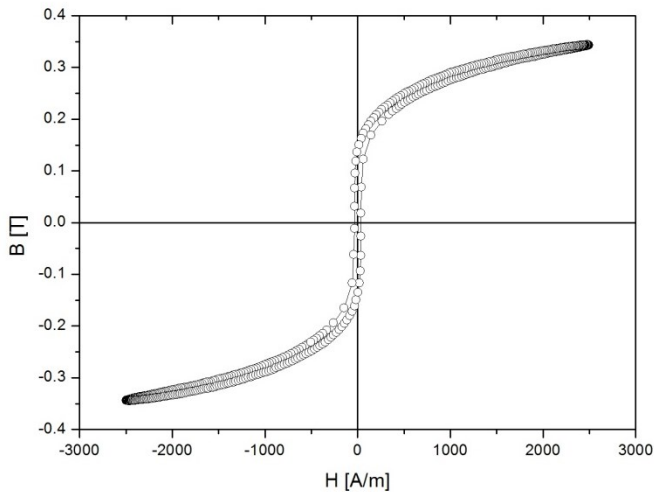
Rysunek 5. Pętla histerezy magnetycznej stopu Fe<sub>95</sub>B<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> w postaci taśmy w stanie po odłaniu [opracowanie własne]

Stop Fe<sub>80</sub>B<sub>20</sub> charakteryzuje się mniejszą wartością natężenia pola koercji ( $H_c = 40.45$  A/m). Pętla histerezy magnetycznej jest wąska (Rysunek 6), natomiast zastosowanie tego materiału na rdzenie transformatorów może skutkować zmniejszeniem strat mocy czynnej w czasie ich pracy.



Rysunek 6. Pętla histerezy magnetycznej stopu  $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$  w postaci taśmy w stanie po odłaniu [opracowanie własne]

Stop z dodatkiem Si charakteryzuje się najniższym natężeniem pola koercji. Pętla histerezy magnetycznej wyznaczona dla szkła metalicznego  $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$  jest wąska (Rysunek 7). Charakter pętli histerezy magnetycznej może świadczyć, że dodatek Si w badanym stopie wpływa korzystnie na własności ferromagnetyczne.



Rysunek 7. Pętla histerezy magnetycznej stopu  $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$  w postaci taśmy w stanie po odłaniu [opracowanie własne]

## 6. Analiza wyników badań

W przypadku wyznaczenia stałej pola molekularnego dla stopów amorficznych należy wykonać założenia umożliwiające określenie rodzaju atomu sąsiadującego z atomem rozpatrywanym. Z powodu amorficznej struktury stopu w materiale nie występują periodycznie powtarzające się komórki elementarne, więc prawdopodobieństwo wystąpienia atomu  $x$  ( $x = \text{Fe}, \text{B}, \text{Si}$ ) przyjmowane jest jako proporcjonalne do składu atomowego badanej próbki. Dodatkowo w celu określenia wpływu pierwiastków wchodzących w skład badanego materiału na własności ferromagnetyczne w rozważaniach stałą pola molekularnego zastąpiono współczynnikiem mocy wpływu ( $\beta$ ). Pozwolił on na określenie negatywnego wpływu diamagnetycznego boru przy stałych, doświadczalnie wyznaczonych wartościach ( $M_s$ ) i ( $B_s$ ). Średnia mocy wpływu wyznaczona dla poszczególnych stopów jest średnią ważoną mocy wpływu wszystkich pierwiastków wchodzących w skład danego materiału, która uwzględnia prawdopodobieństwa znalezienia poszczególnych atomów ( $x$ ) w otoczeniu atomu rozpatrywanego.

### 6.1. Stała pola molekularnego $\lambda$ a moc wpływu $\beta$

W celu określenia wpływu poszczególnych pierwiastków na własności ferromagnetyczne amorficznych stopów na bazie żelaza w równaniu (6) stałą pola molekularnego charakteryzującą dany materiał zastąpiono zmienną zależną od konfiguracji pierwiastka wchodzącego w skład badanego materiału. Zabieg taki umożliwił określenie, który z diamagnetycznych składników stopu: bor czy krzem wpływa na pogorszenie własności magnetycznych. Pierwiastki diamagnetyczne wytwarzają pole magnetyczne skierowane przeciwnie w stosunku do pola zewnętrznego, co w efekcie skutkuje osłabieniem sumarycznego pola magnetycznego wytwarzanego przez materiał ferromagnetyczny, w którego skład wchodzi [11]. Wyznaczono również średnią moc wpływu, która charakteryzuje cały badany materiał i pozwala określić, który ze stopów ma najlepsze własności ferromagnetyczne. Materiały charakteryzujące się dużą wartością średniej mocy wpływu posiadają gorsze własności ferromagnetyczne, co najczęściej wynika ze składu stopu, z którego zostały wykonane.

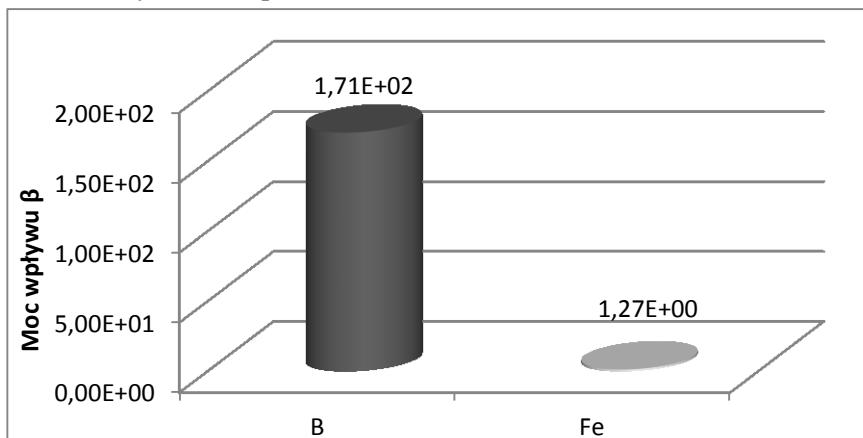
Wyznaczając współczynnik mocy wpływu ( $\beta$ ) dla poszczególnych materiałów posłużono się wartościami odczytanymi z pętli histerezy magnetycznej. Wiedząc, że indukcję nasycenia można wyrazić równaniem (10) wyznaczono magnetyzację nasycenia, a następnie korzystając z przekształconego równania (2) określono współczynnik mocy wpływu ( $\beta$ ) (11). Wyniki dla poszczególnych stopów przedstawiono na wykresach 1-3.

$$B = \mu_0(H + M) \quad (10)$$

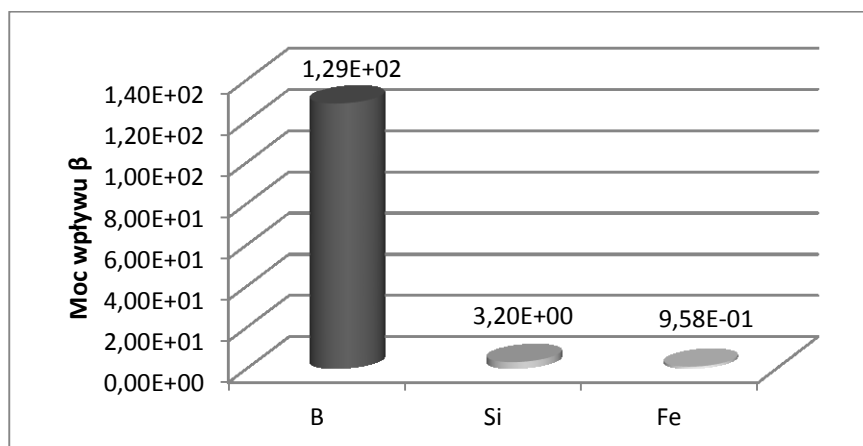
gdzie:  $B$  – indukcja,  $\mu_0$  – przenikalność magnetyczna próżni,  $H$  – natężenie pola zewnętrznego,  $M$  – magnetyzacja

$$\beta = \frac{k_B T}{M_s J B_j g_j \mu_B} - \frac{B_s}{M_s} \quad (11)$$

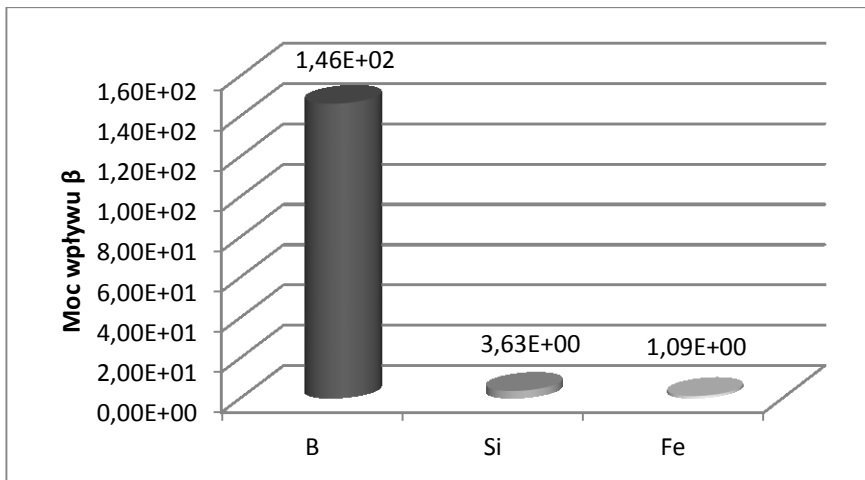
gdzie:  $\beta$  – współczynnik mocy wpływu,  $k_B$  – stała Boltzmana,  $T$  – temperatura,  $B_s$  – indukcja nasycenia,  $M_s$  – magnetyzacja nasycenia,  $B_j$  – funkcja Brillouina,  $g_j$  – czynnik Landego,  $\mu_B$  – magneton Bohra,  $J$  – całkowity moment pędu cząstki.



Rysunek 8. Wartość mocy wpływu  $\beta$  dla poszczególnych pierwiastków wchodzących w skład amorficznego stopu  $Fe_{80}B_{20}$  [opracowanie własne]



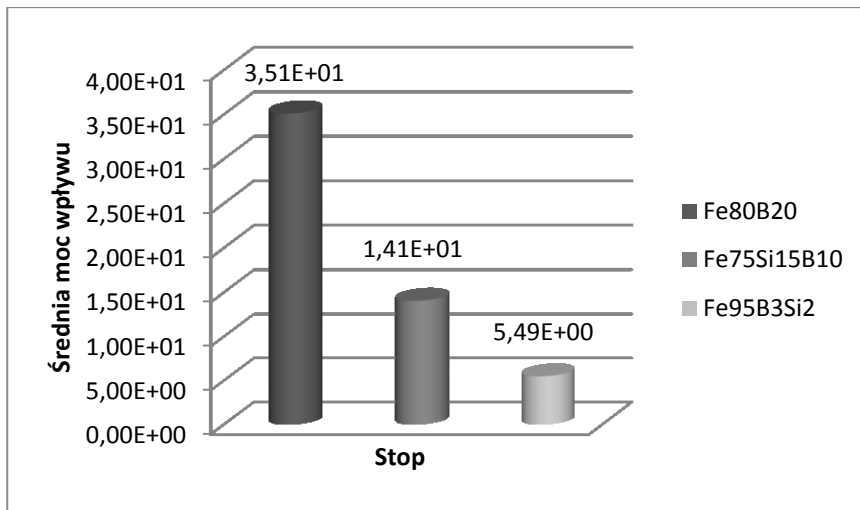
Rysunek 9. Wartość mocy wpływu  $\beta$  dla poszczególnych pierwiastków wchodzących w skład amorficznego stopu  $Fe_{75}Si_{15}B_{10}$  [opracowanie własne]



Rysunek 10. Wartość mocy wpływu  $\beta$  dla poszczególnych pierwiastków wchodzących w skład krystalicznego stopu  $Fe_{95}B_3Si_2$  [opracowanie własne]

W celu oszacowania średniej mocy wpływu ( $\bar{\beta}$ ) przyjęto, że zależy ona od pierwiastków budujących badany materiał oraz od ich ilości w rozpatrywanych taśmach szkła metalicznego. Z braku możliwości określenia najbliższych sąsiadów rozpatrywanego atomu ( $x$ ) (budowa amorficzna, brak możliwości rozpatrywania periodycznie powtarzających się komórek elementarnych) określono jej wartość uwzględniając zawartość atomową poszczególnych pierwiastków.

Przyjmując, że na 100 atomów próbki I ( $Fe_{80}B_{20}$ ) przypada 80 atomów żelaza i 20 atomów boru średnią moc wpływu wyznaczono, jako średnią ważoną mocy wpływu poszczególnych pierwiastków. Przyjęto, że prawdopodobieństwo wystąpienia w sąsiedztwie atomu ( $x$ ) atomu żelaza lub atomu boru jest proporcjonalne do składu atomowego materiału i wynosi odpowiednio 0,8 i 0,2. Podobne rozważania przeprowadzone dla dwóch pozostałych materiałów: amorficznego materiału  $Fe_{75}Si_{15}B_{10}$  oraz dla próbki krystalicznej  $Fe_{95}B_3Si_2$ . Uzyskane wyniki przedstawiono na Rysunku 11.



Rysunek 11. Porównanie średniej mocy wpływu dla badanych materiałów o budowie amorficznej i krystalicznej [opracowanie własne]

## 7. Podsumowanie

W niniejszej pracy przedstawiono rozważania dotyczące określenia wpływu pierwiastków stopowych na własności ferromagnetyczne stopów amorficznych na bazie żelaza. Zastosowany model klasycznej teorii ferromagnetyzmu pozwolił na wyznaczenie średniej mocy wpływu dla każdego z badanych materiałów. Maksymalną wartość uzyskano dla stopu, którego skład chemiczny zawierał największe stężenie boru, który jest pierwiastkiem diamagnetycznym. Modyfikacja równania (2) i zastąpienie stałej pola molekularnego wielkością nazwaną mocą wpływu umożliwiło opisanie niekorzystnego wpływu boru na własności ferromagnetyczne badanych próbek. W przypadku krzemu, który również cechuje się własnościami diamagnetycznymi negatywny wpływ na własności magnetyczne jest mniejszy.

## 8. Wnioski

W przypadku doboru materiału na rdzenie transformatorów należy kierować się nie tylko wielkością pola koercji, które wyznaczyć można z pętli histerezy magnetycznej, ale również zwracać uwagę na własności ferromagnetyczne materiału. W celu zminimalizowania strat energii na transformatorach aktualnie stosuje się rdzenie wykonane z materiałów amorficznych, które zastępują popularną stal transformatorową zawierającą duże ilości krzemu. Stopy te zaliczane są do materiałów magnetycznie miękkich stosowanych w urządzeniach elektrycznych pracujących przy dużych częstotliwościach dochodzących do kilkuset herców [12].

Zaprezentowany model określający średnią moc wpływu pozwala na weryfikację materiałów pod kątem własności ferromagnetycznych oraz klasyfikacji materiałów magnetycznie miękkich lub twardych.

Należy pamiętać, że zbyt mały udział boru w stopie uniemożliwia jego zeszklenie przy zadanych szybkościach chłodzenia, co potwierdzają próby wytworzenia amorficznego stopu  $\text{Fe}_{95}\text{B}_3\text{Si}_2$ .

## Literatura

1. <http://new.abb.com/pl/zielone-transformatory/amorficzna-przyszlosc-energetyki>
2. Szewczyk A., Wiśniewski A., Puźniak R., Szymczak H. *Magnetyzm i nadprzewodnictwo*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
3. [http://ir.library.tohoku.ac.jp/re/bitstream/10097/52214/1/1345-9678-44\(10\)-2020.pdf](http://ir.library.tohoku.ac.jp/re/bitstream/10097/52214/1/1345-9678-44(10)-2020.pdf)
4. [http://en.wikipedia.org/wiki/Coercivity#cite\\_note-6](http://en.wikipedia.org/wiki/Coercivity#cite_note-6)
5. Herzer G. *Amorphous and nanocrystalline soft magnets*, Series E: Applied Sciences vol. 338, 1997
6. Moore K. T., Wall M. A., Schwartz A. J., Chung B. W., Shuh D. K., Schulze R. K. and Tobin J. G. *Failure of Russell-Saunders Coupling in the 5f States of Plutonium*, Physical Review Letters, 19, 90, 2003
7. [https://sage2.icse.us.edu.pl/home/pub/149/termy\\_calosc.pdf](https://sage2.icse.us.edu.pl/home/pub/149/termy_calosc.pdf)
8. [http://www.garmanage.com/atelier/index.cgi?path=public&B&Teaching&B&EPFL&B&3\\_Magnetisme&B&2\\_Para&&id=psyitefg](http://www.garmanage.com/atelier/index.cgi?path=public&B&Teaching&B&EPFL&B&3_Magnetisme&B&2_Para&&id=psyitefg)
9. Tsymbal E. Y. *Section 16: Magnetic properties of materials (continued)* [w:] *Physics 927*, s.1-19
10. Lewińska-Romicka A. *Badania Magnetyczne, Podręcznik, Tom I*, Biuro Gamma, Warszawa, 1998
11. Kittel C. *Wstęp do fizyki ciała stałego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2012
12. [http://www.elhand.pl/pub/File/Aktualnosc/Z-prasy/Transformatory\\_z\\_rdzemiami\\_amorficznymi\\_produkcyj\\_ELHAND\\_Transformatory.pdf?pid=pdf/amorficzne.pdf](http://www.elhand.pl/pub/File/Aktualnosc/Z-prasy/Transformatory_z_rdzemiami_amorficznymi_produkcyj_ELHAND_Transformatory.pdf?pid=pdf/amorficzne.pdf)