



**Mikrostruktura
oraz procesy przemagnesowania
w magnetycznie twardych i miękkich
stopach żelaza**

Jacek Olszewski

Instytut Fizyki,

**Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki
Stosowanej**

POLITECHNIKI CZĘSTOCHOWSKIEJ

**Akademia Górniczo - Hutnicza
Kraków 19.10.2007**

Plan prezentacji

2. Cel pracy

3. Badane materiały, ich wytwarzanie i warunki obróbki

4. Mikrostruktura i procesy przemagnesowania w stopach magnetycznie twardych

- stopy wykazujące anizotropię kształtu
- stopy o dużej anizotropii magnetokrystalicznej

7. Mikrostruktura i procesy przemagnesowania w stopach magnetycznie miękkich

- stopy Fe-Si o podwyższonej zawartości krzemu
- stopy amorficzne
- stopy nanokrystaliczne

11. Podsumowanie i wnioski

Cel pracy

Celem pracy było wykazanie możliwości kreowania w realnych stopach żelaza struktur magnetycznych charakteryzujących się pożądanymi procesami przemagnesowania i wynikającymi stąd założonymi właściwościami magnetycznymi poprzez kształtowanie w tych stopach odpowiedniej mikrostruktury.

Zbadano

- skład fazowy próbek
- morfologię wydzieleni faz i ich wzajemne ułożenie
- pole koercji i jego kątową zależność od pola pomiarowego
- podatność magnetyczną i jej dezakomodację
- zależności magnetyzacji od natężenia pola pomiarowego i temperatury pomiaru
- straty z histerezy rotacyjnej.

Metody badań mikrostruktury

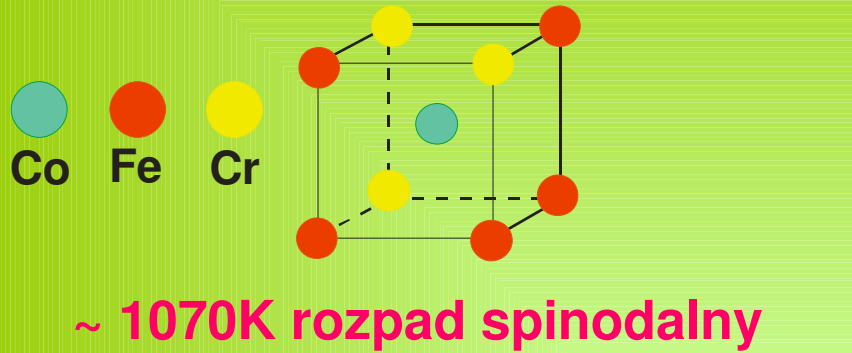
- spektroskopia mössbauerowska,
- dyfrakcja promieniowania rentgenowskiego,
- transmisyjna mikroskopia elektronowa.

Metody badań właściwości magnetycznych

- magnetometr wibracyjny
- anizometr
- waga magnetyczna
- układ do pomiaru podatności magnetycznej i jej dezakomodacji metodą transformatorową

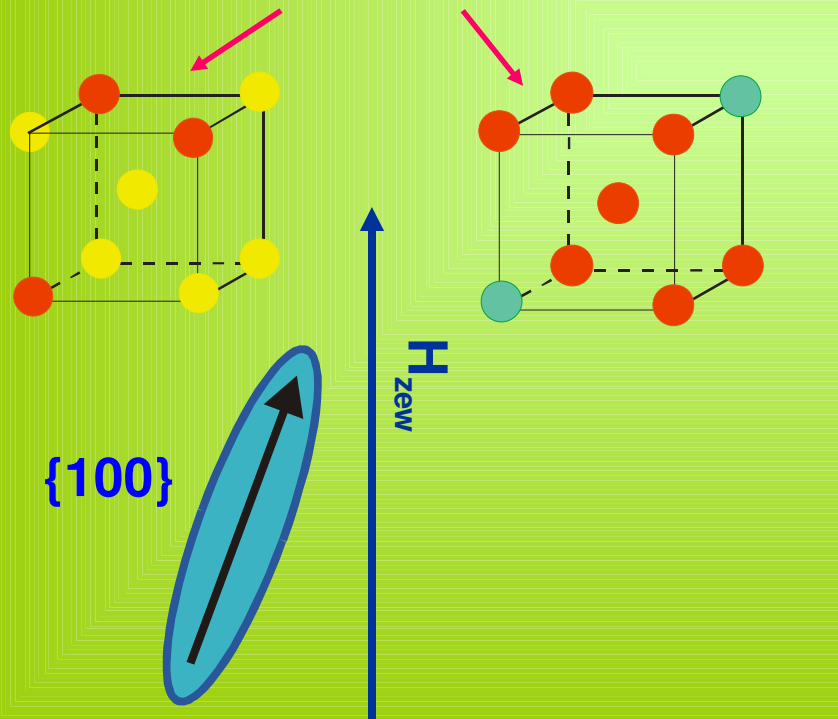
Badane materiały

Stopy magnetycznie twarde stopy Fe – Cr – Co wykazujące anizotropię kształtu



brak opisu

- budowy faz
- ewolucji struktury w trakcie obróbki stopów

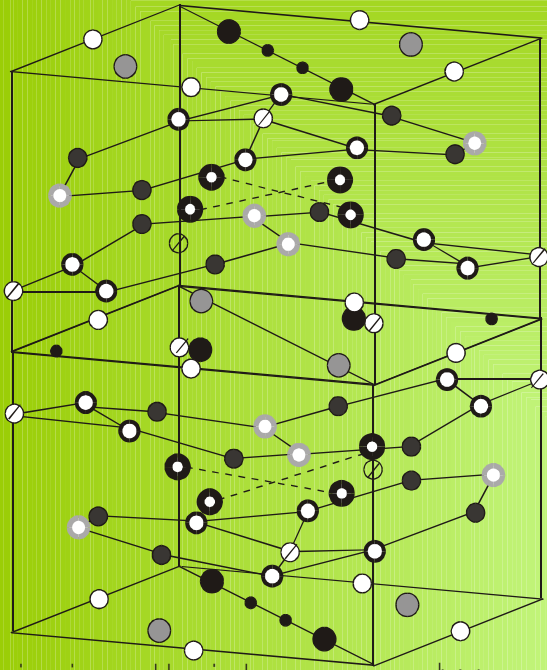


Skład chemiczny stopów

Fe – Cr – Co (% at.)

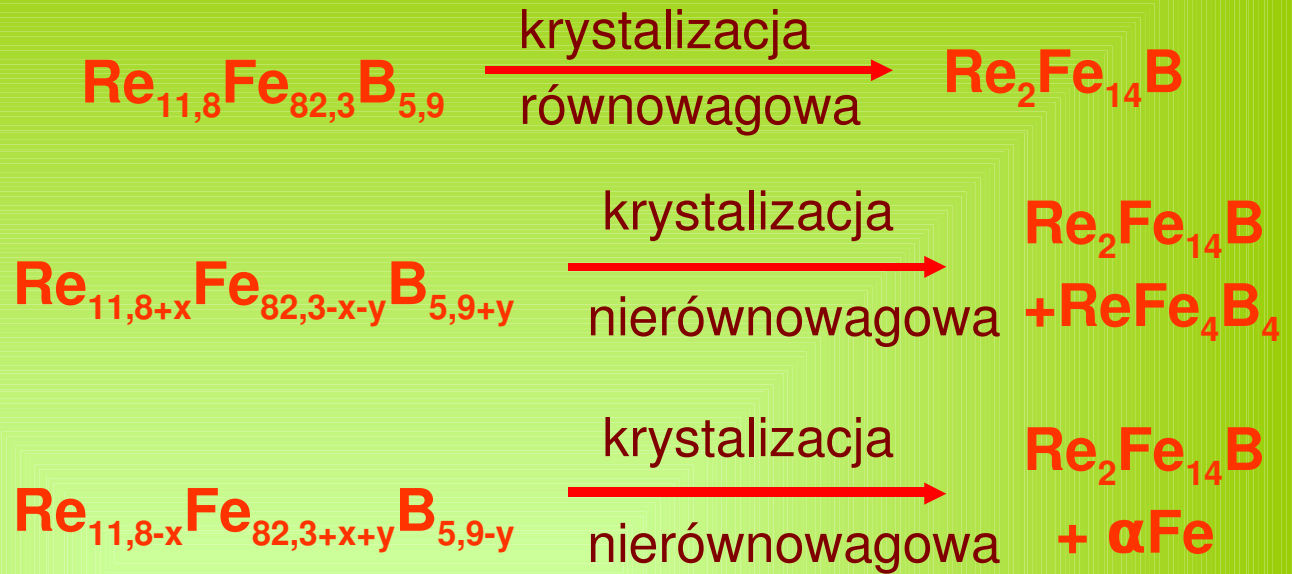
| | | |
|-------|-------|-------|
| Co | 8,75 | 11,85 |
| Cr | 29,4 | 29,4 |
| Fe | 60,35 | 57,28 |
| Si+Ti | 1,5 | 1,5 |

stopy wykazujące dużą anizotropię magnetykryystaliczną



ziemia rzadka żelazo bor
 ● 4g ○ 4c ⊗ 4e ● 4g
 ● 4f ○ 16k₁ ● 16k₂
 ● 8j₁ ● 8j₂

*Tetragonalna komórka
 elementarna związków
 Re₂Fe₁₄B*



dla otrzymania magnesów stałych
– metalurgia proszków

Skład chemiczny stopów Nd – Fe – B (% at.)
synteza mechaniczna

| | | | |
|----|----|----|----|
| Fe | 88 | 83 | 76 |
| Nd | 6 | 11 | 18 |
| B | 6 | 6 | 6 |

Stopy magnetycznie miękkie

Stopy Fe – Si

wzrost zawartości krzemu

zmniejszenie

- anizotropii magnetokrystalicznej
- magnetostrykcji
- przewodnictwa elektrycznego

pojawienie się

- dodatkowych pasm dezakomodacji podatności magnetycznej
- uporządkowania atomowego

wzrost

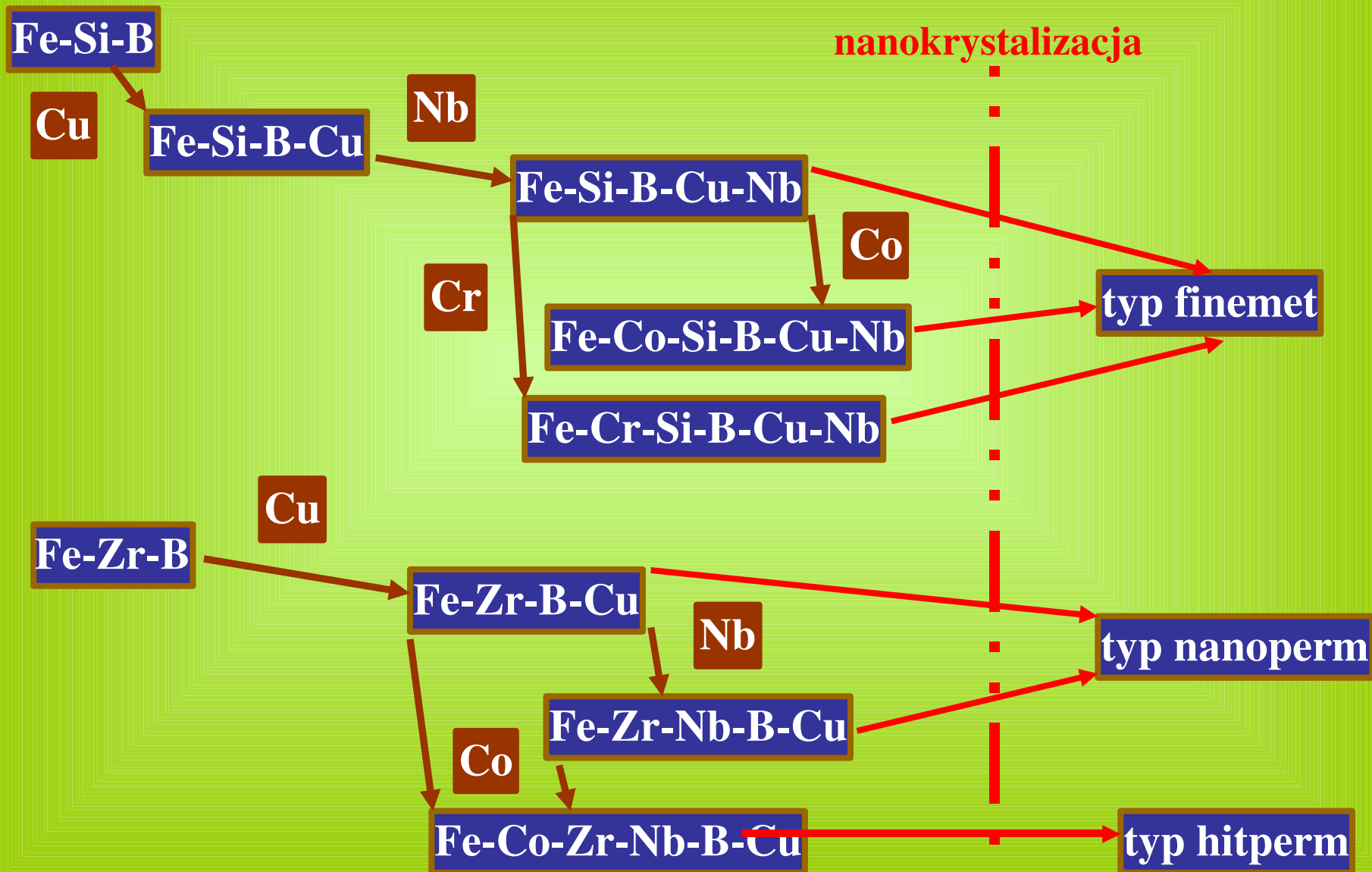
twardości i kruchości

skład chemiczny stopów (w %at.)

| stop | szybkie chłodzenie (mikrokrystaliczny) | metoda CVD |
|------------------|-------------------------------------------|------------|
| Fe | 88.0 | 88,1 |
| Si | 11,7 | 11,6 |
| zanieczyszczenia | < 0,3 | |

Stopy amorficzne i nanokrystaliczne

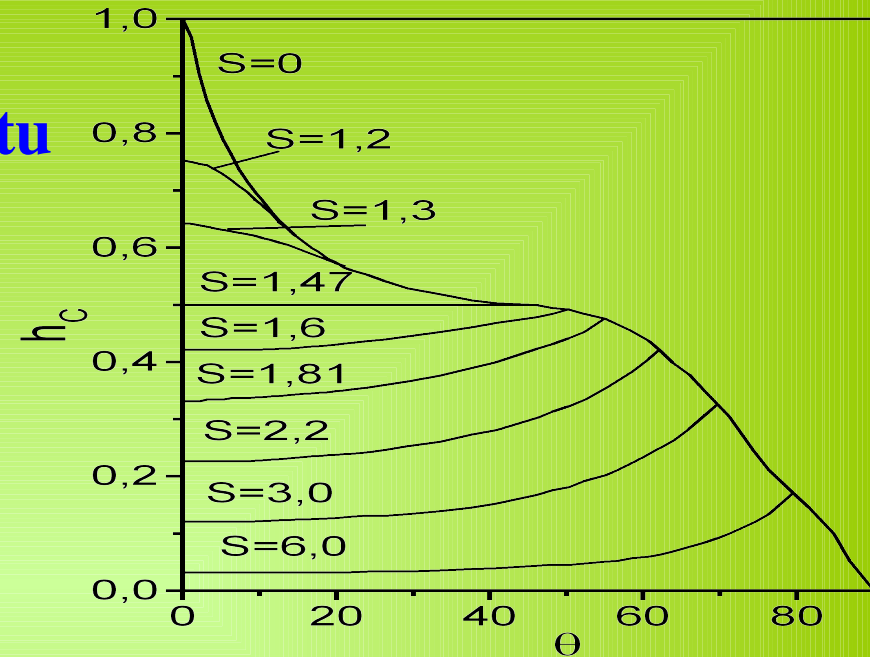
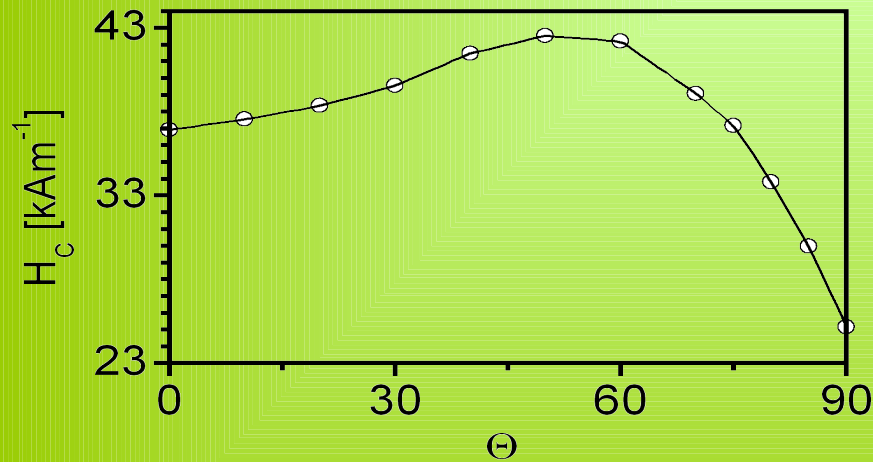
skład chemiczny stopów



Mikrostruktura i procesy przemagnesowania w stopach magnetycznie twardej

Stopy wykazujące anizotropię kształtu

Zależność pola koercji od kąta pomiędzy kierunkiem jednoosiowej anizotropii magnetycznej w próbce a przyłożonym polem magnetycznym (a) dla stopu $Fe_{61,85}Cr_{29,4}Co_{8,75}$ po całkowitej obróbce cieplnej w polu magnetycznym.



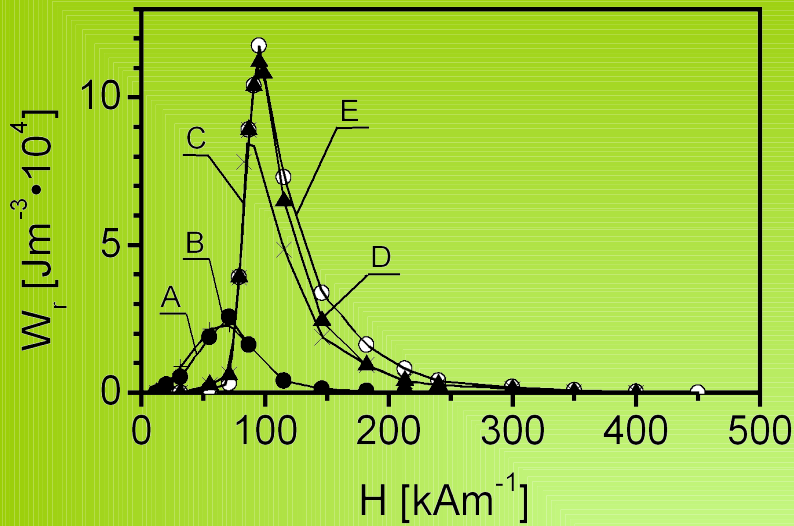
Zredukowane pole koercji dla zbioru jednodomenowych cząstek w kształcie nieskończone długich, równoległych i nieoddziałujących ze sobą walców w funkcji kąta Θ pomiędzy kierunkiem zewnętrznego pola magnetycznego a osią walca. Parametrem jest zredukowany promień walca S (S. Shtrikman, D. Treves)

$$S = \frac{r}{r_0} \quad h_c = \frac{H_c}{H_K} \quad H_K = \frac{2K}{M_s}$$

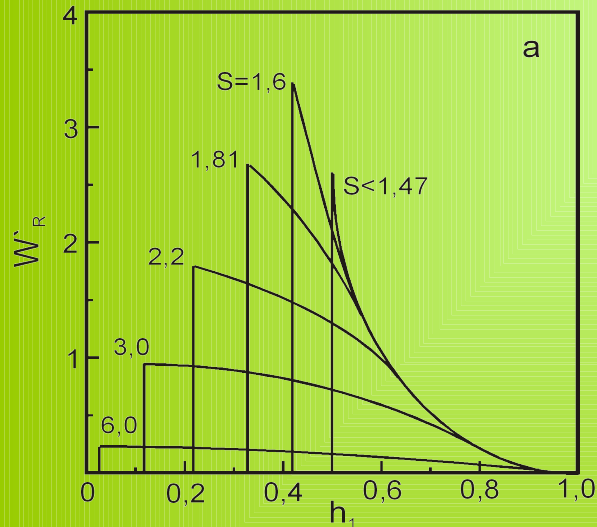
$$r_0 = (A^{1/2}) / M_s$$

$$h_c = 1,08S^{-2}(1 - 1,08S^{-2})[(1,08S^{-2})^2 + (1 - 2,16S^{-2})\cos^2\Theta]^{-1/2}$$

Straty z histerezy rotacyjnej (W_R) w zależności od przyłożonego pola (H) (b) dla stopu $Fe_{58,75}Cr_{29,4}Co_{11,85}$ po różnych stadiach obróbki cieplnej w polu magnetycznym.



$$W_R(H) = \int_0^{2\pi} T(H, \Theta) d\Theta$$

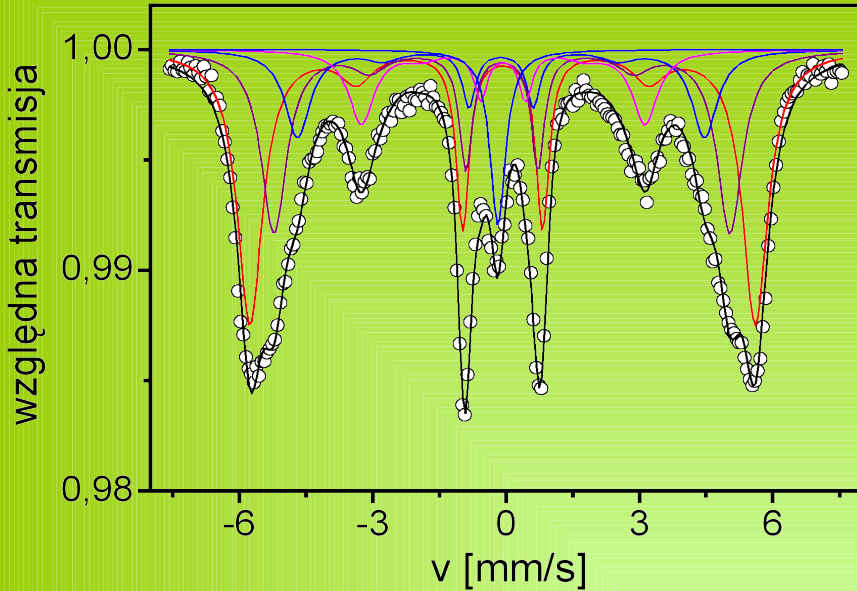


Zredukowane straty energii na histerezę rotacyjną W'_R dla zbioru nieoddziałujących ze sobą cząstek w kształcie nieskończenie długich, równoległych walców w funkcji zredukowanego zewnętrznego pola magnetycznego h . Parametrem jest zredukowany promień walca S .

$$W'_R = 4W_R / \mu_0 M_S^2$$

Dla modelu wydzieleń o skończonych wymiarach

$$c = b/a = 6$$



Przykładowe widmo mössbauerowskie dla stopu $Fe_{58,75}Cr_{29,4}Co_{11,85}$ po całkowitej obróbce cieplnej w polu magnetycznym

$$A_{2,5}^{\perp} = 3,3 \div 3,5$$

$$A_{2,5}^{\parallel} = 0,3 \div 0,5$$

Teksturę fazy α_1 można wyrazić za pomocą funkcji $f(\alpha) = C(n) \cos^n \alpha$

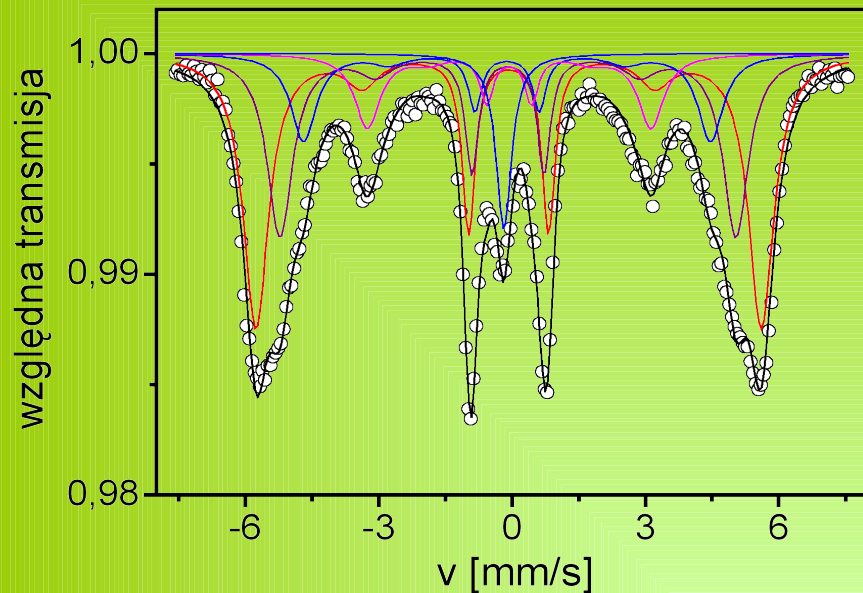
α – kąt pomiędzy osiami wydzielen fazy α_1 a osią makroskopowej anizotropii, $C(n)$ – czynnik normalizujący, a n – parametr rozkładu.

$$A_{2,5} = \frac{4 \sin^2 \beta}{1 + \cos^2 \beta} \quad \beta \text{ – kąt pomiędzy wektorem indukcji nadsubtelnego pola magnetycznego i kierunkiem rozchodzenia się promieniowania}$$

$$A_{2,5}^{\perp} = \frac{4(n+2)}{n+4} \quad i \quad A_{2,5}^{\parallel} = \frac{4}{n+2} \quad \frac{M_r}{M_s} = \frac{n+1}{n+2}$$

$$6 < n < 12$$

$$n = 8,5$$



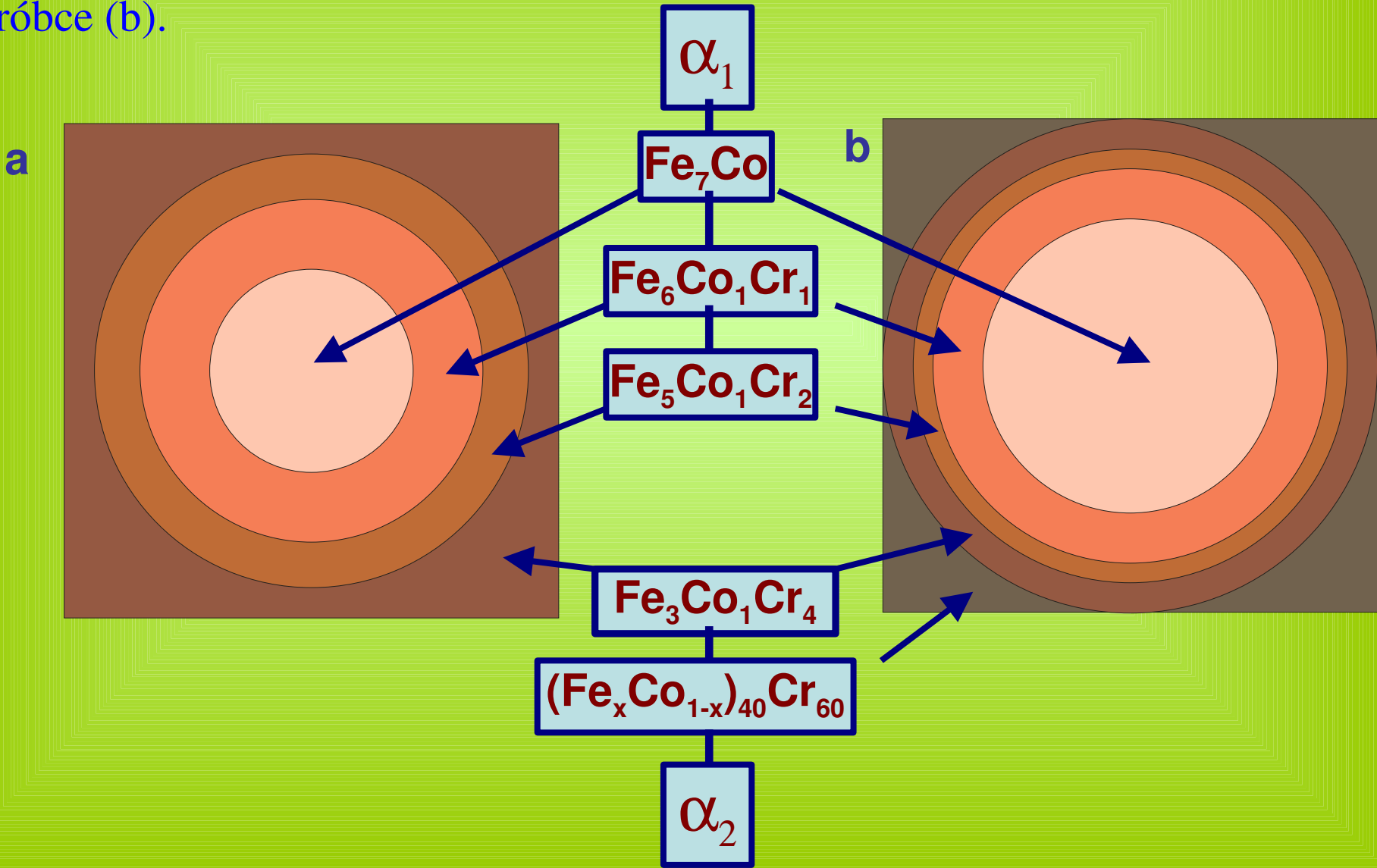
Przykładowe widmo mössbauerowskie dla stopu $Fe_{58,75}Cr_{29,4}Co_{11,85}$ po całkowitej obróbce cieplnej w polu magnetycznym

Parametry mössbauerowskie widm elementarnych dla stopu $Fe_{58,75}Cr_{29,4}Co_{11,85}$.

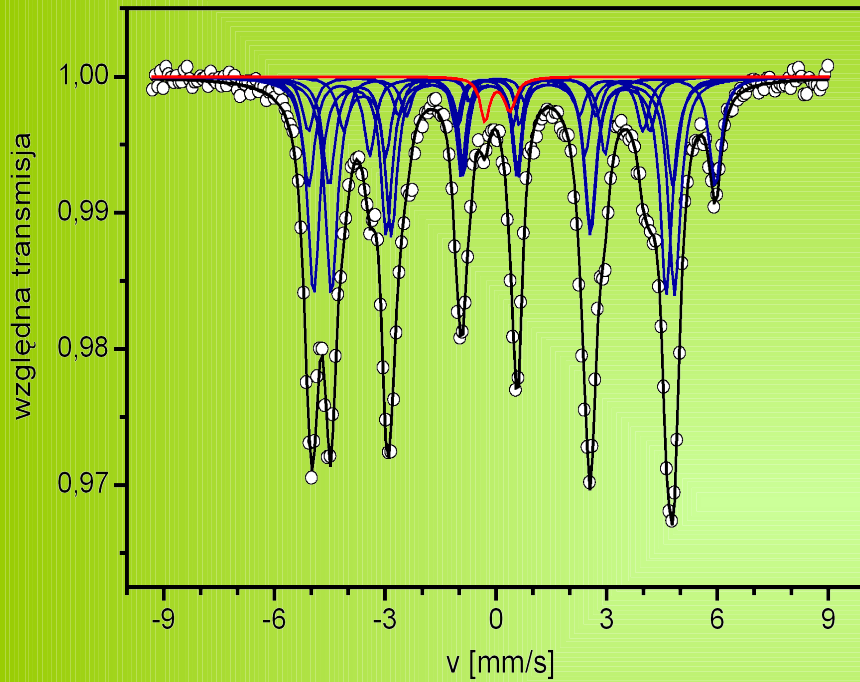
| sektet | I | II | III | IV | V |
|-----------|------------|----------------|----------------|----------------|------------------------------|
| B_n [T] | 35,2 | 31,7 | 28,2 | 20,8 | 16,0 |
| IS [mm/s] | 0,02 | 0,007 | -0,007 | -0,035 | -0,053 |
| | Fe_7Co_1 | $Fe_6Co_1Cr_1$ | $Fe_5Co_1Cr_2$ | $Fe_3Co_1Cr_4$ | $(Fe_xCo_{1-x})_{40}Cr_{60}$ |

Linia lorentzowska IS [mm/s] = -0,071 $(Fe_xCo_{1-x})_{25}Cr_{75}$

Schemat przekroju poprzecznego wydzielenia fazy α_1 zanurzonego w osnowie fazy α_2 w stanie po chłodzeniu w polu magnetycznym (a) i po całkowitej obróbce (b).



Materiały magnetyczne o dużej anizotropii magnetokrystalicznej.



Parametry mössbauerowskie faz zidentyfikowanych w stopach Nd-Fe-B

| Faza | Względne natężenie | IS [mm/s] | B_n [T] | QS [mm/s] |
|------------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| α - Fe | - | 0 | 33,0 | 0 |
| $Nd_2Fe_{14}B$ | 1 (4e) | -0,12 | 28,4 | 0,45 |
| | 1 (4c) | -0,04 | 26,0 | 0,10 |
| | 2 (8j ₁) | 0,01 | 28,9 | 0,11 |
| | 2 (8j ₂) | 0,08 | 34,1 | 0,32 |
| | 4 (16k ₁) | -0,02 | 28,8 | 0,28 |
| | 4 (16k ₂) | -0,18 | 29,6 | 0,02 |
| faza | 1 | -0,17 | 29,5 | 0,06 |
| Nd_2Fe_{17} | 3 | -0,07 | 26,8 | 0,06 |
| $Nd_{1+\delta}Fe_4B_4$ | - | 0,03 | - | 0,65 |

Przykładowe widmo mössbauerowskie wraz z rozkładem na składowe elementarne dla stopu $Nd_{18}Fe_{76}B_6$.

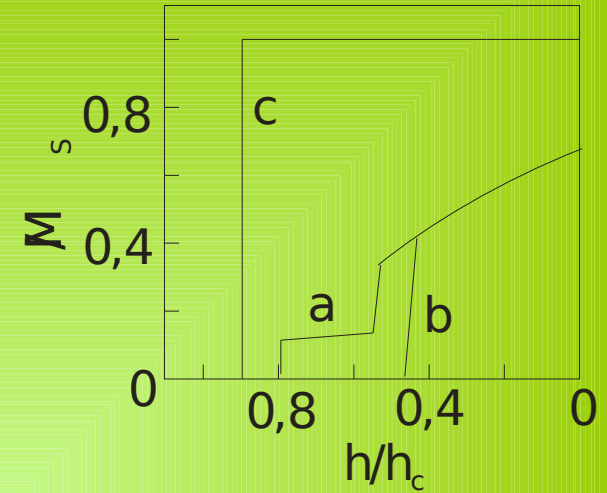
| Faza | 923 K/20 min | | | 1123 K/20min | | |
|---------------------------------------------|--------------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| | x = 6 | x = 11 | x = 18 | x = 6 | x = 11 | x = 18 |
| α - Fe | 0,57 | 0,21 | 0 | 0,62 | 0,22 | 0 |
| $\text{Nd}_2\text{Fe}_{17}$ | 0,41 | 0 | 0 | 0,32 | 0 | 0 |
| $\text{Nd}_{1+\delta}\text{Fe}_4\text{B}_4$ | 0,02 | 0 | 0,10 | 0,06 | 0,05 | 0,02 |
| $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ | 0 | 0,79 | 0,90 | 0 | 0,73 | 0,98 |

Względna zawartość faz w stopach $\text{Nd}_x\text{Fe}_{94-x}\text{B}_6$ ($x = 6, 11, 18$) po różnych obróbkach cieplnych

| Za war tość Nd | H_c [kAm ⁻¹] | | B_r [T] | | $(BH)_{\max}$ [kJm ⁻³] | |
|-------------------------|-------------------------------|-----------|--------------|-----------|---------------------------------------|-----------|
| | 923 K | 1123 K | 923 K | 1123 K | 923 K | 1123 K |
| | 6 | 11 | 18 | 6 | 11 | 18 |
| 6 | 175 | 37,5 | 1,07 | 1,02 | 90 | 83 |
| 11 | 260 | 220 | 0,89 | 0,79 | 63 | 50 |
| 18 | 1000 | 350 | 0,61 | 0,54 | 28 | 22 |

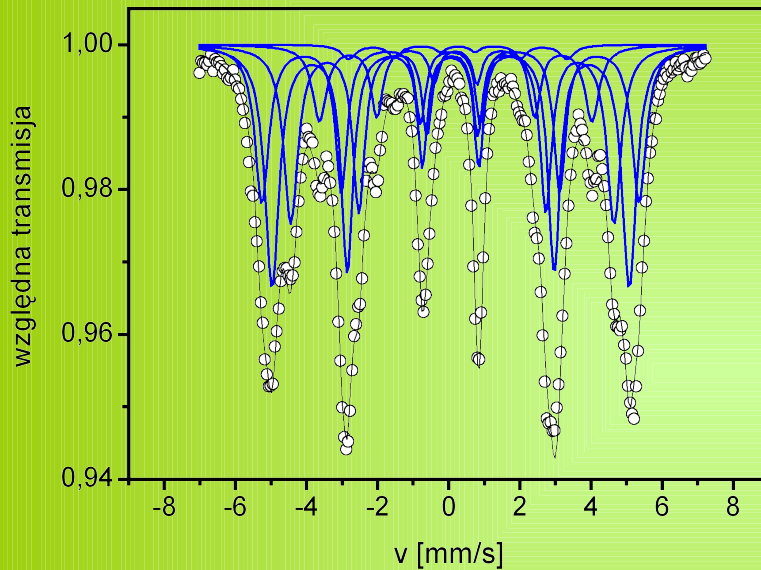
Wartości pola koercji (H_c), remanencji (B_r) i maksymalnej gęstości energii $(BH)_{\max}$ dla stopów $\text{Nd}_x\text{Fe}_{94-x}\text{B}_6$ ($x = 6, 11, 18$).

*Krzywe odmagiesowania dla dwóch ziaren sprzężonych oddziaływaniem dipolowym (a), wymiennym (b) z osiami pod kątem 65° w stosunku do pola magnetycznego. Krzywa (c) odpowiada izolowanemu ziarnu.
(H. Kronmüller)*



Mikrostruktura i procesy przemagnesowania w stopach magnetycznie miękkich

Stopy Fe-Si o podwyższonej zawartości krzemu



Widmo mössbauerowskie wraz z rozkładem na składowe elementarne dla stopu $Fe_{88}Si_{12}$ uzyskanego metodą CVD.

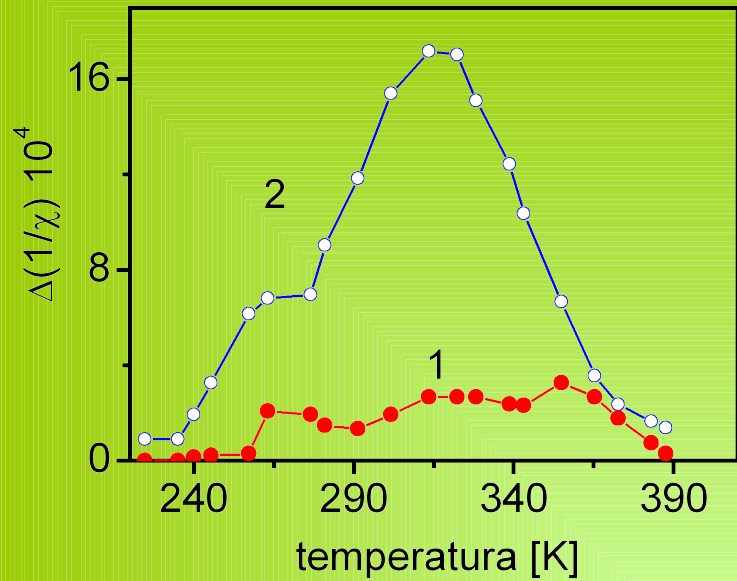
$$A_{2,5} = 2,3$$

Parametry mössbauerowskie widm

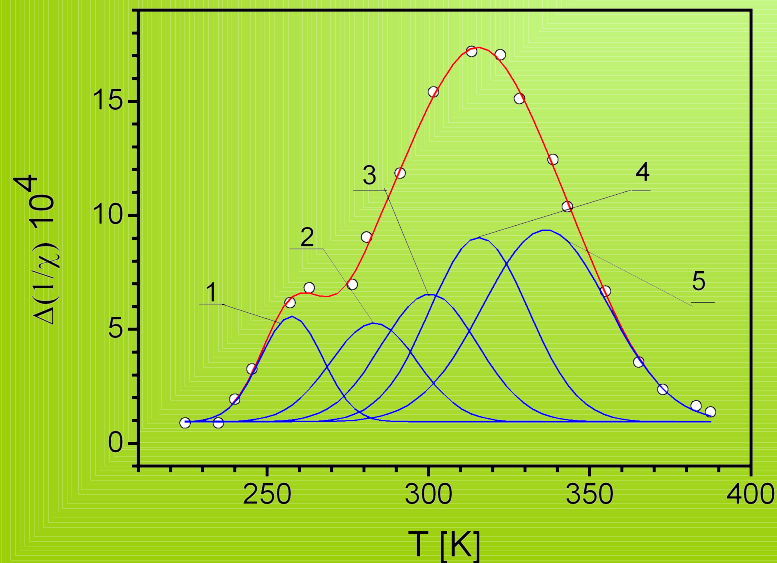
| | Sektet | | | | |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|
| | I | II | III | IV | V |
| B_n [T] | 33,00 | 31,00 | 28,40 | 24,40 | 19,50 |
| IS [mm/s] | 0,001 | 0,05 | 0,1 | 0,17 | 0,25 |
| atomy Si | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |

Początkowa podatność magnetyczna (χ), maksimum jej dezakomodacji ($\Delta(1/\chi) = 1/\chi_{120} - 1/\chi_2$), parametry uporządkowań bliskiego $\alpha_{\text{Si,Fe}}(1)$ i dalekiego S_{Fe} zasięgu dla polikrystalicznego stopu $\text{Fe}_{88,1}\text{Si}_{11,9}$ (P) po różnych obróbkach cieplnych

| obróbka | χ | $\Delta(1/\chi) \cdot 10^6$ | parametr uporządkowania |
|----------------|--------|-----------------------------|---------------------------------------------|
| po otrzymaniu | 700 | 80 | $S_{\text{Fe}}(\text{Fe}_3\text{Si}) = 0,2$ |
| 1370 K/1h piec | 1306 | 186 | $S_{\text{Fe}}(\text{B2}) = 0,48$ |
| 1370 K/1h woda | 1858 | 112 | $\alpha_{\text{Si,Fe}}(1) = - 0,35$ |



Widma dezakomodacji początkowej podatności magnetycznej dla stopu $Fe_{88}Si_{12}$ w stanie po zestaleniu (krzywa 1) i po wygrzaniu w temperaturze 1370 K przez 1 godz. (krzywa 2)



Wyznaczone energie aktywacji procesów elementarnych przy $\tau_0 = 3,6 \cdot 10^5$ s:

$$Q_1 = 0,84 - 0,85,$$

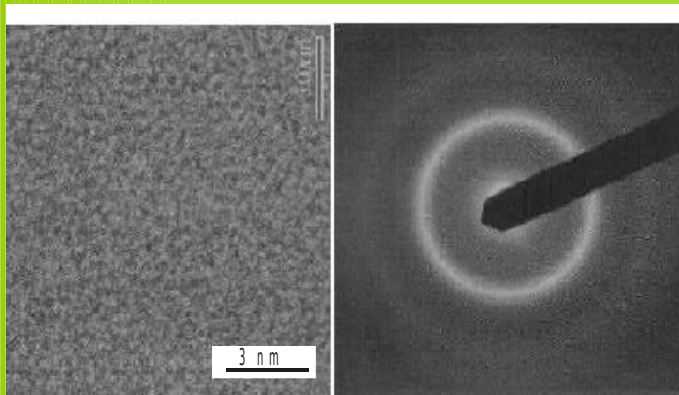
$$Q_2 = 0,88 - 0,92, \quad Q_3 = 0,94 - 0,99,$$

$$Q_4 = 1,03 - 1,07$$

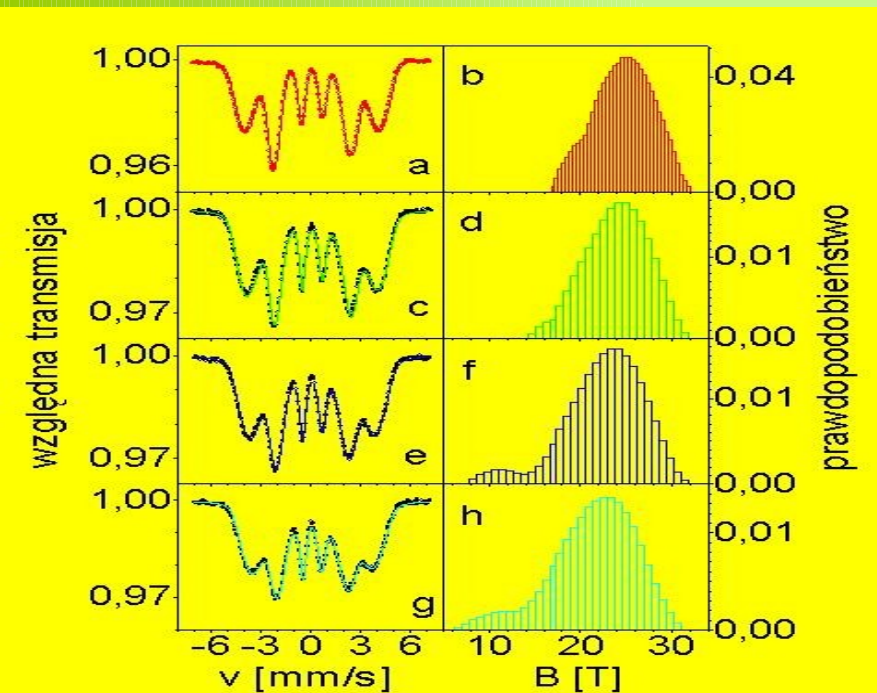
$$Q_5 = 1,09 - 1,12 \text{ eV}$$

Stopy amorficzne

Mikrostruktura stopów



Przykładowe zdjęcie mikrostruktury i odpowiadający jej elektronogram dla stopu $Fe_{74}Cu_1Nb_3Si_{12}B_{10}$ w stanie po zestaleniu.



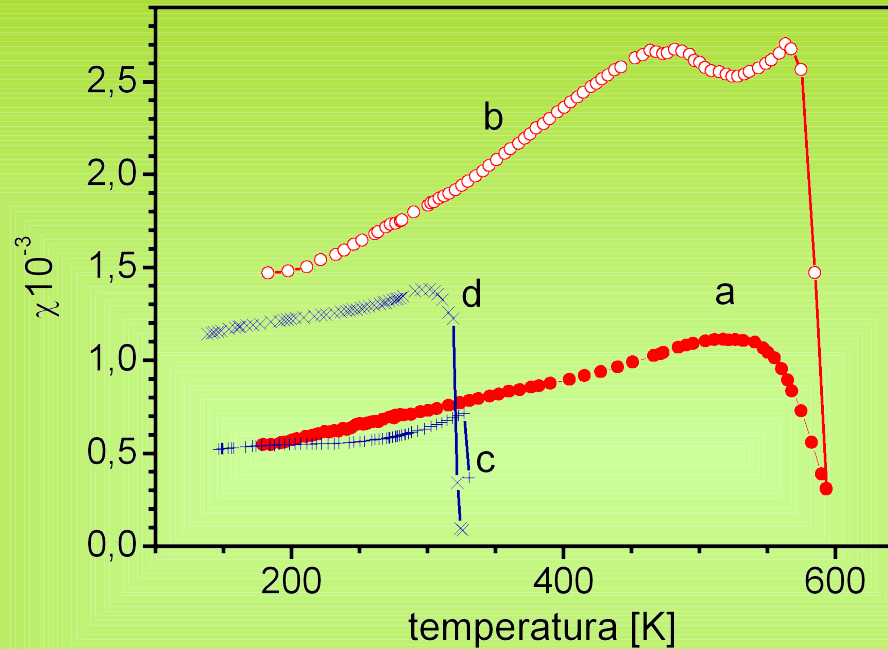
Przykładowe widma mössbauerowskie (a, c, e, g) wraz z odpowiadającymi im rozkładami indukcji pól nadsubtelnych na jądrach ^{57}Fe (b, d, f, h) dla grupy stopów amorficznych

$Fe_{77-x-y}Cu_xNb_ySi_{13}B_{10}$: $x=0, y=0$ (a, b); $x=1, y=1$ (c, d); $x=1, y=2$ (e, f); $x=1, y=3$ (g, h) w stanie po zestaleniu

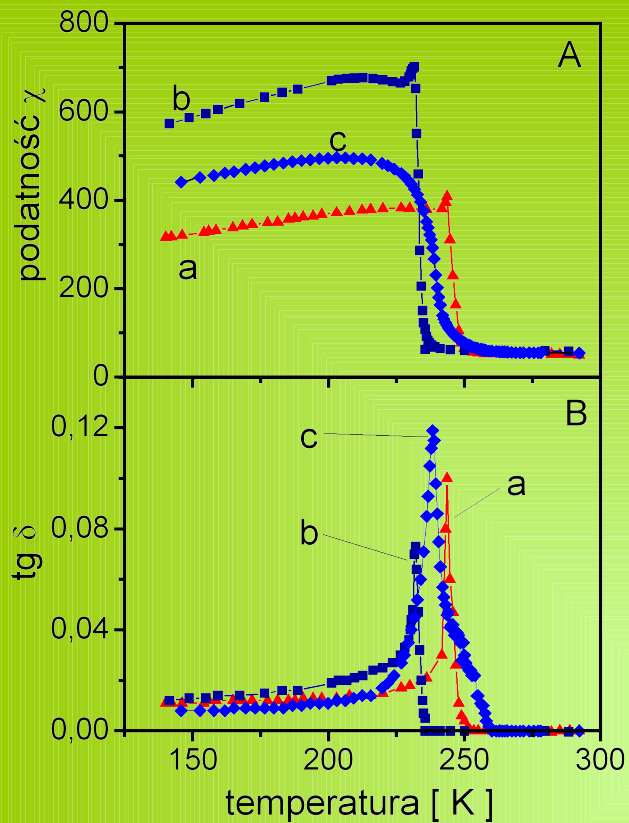
| Próbki i ich obróbka cieplna | B_{ef} [T] | $\langle A_{2,5} \rangle$ | D_{am} [T] | |
|-----------------------------------------|---------------|---------------------------|--------------|------|
| Stopy typu finemet | | | | |
| $Fe_{77}Si_{13}B_{10}$ | po zestaleniu | 24,68 | 2,9 | 2,99 |
| | 693 K/1 h | 25,20 | 2,8 | 2,99 |
| $Fe_{73}Si_{13}B_{10}Cu_1Nb_3$ | po zestaleniu | 20,42 | 2,4 | 4,90 |
| | 693 K/1 h | 20,98 | 2,6 | 5,08 |
| $Fe_{66,5}Co_7Si_{13,5}B_9Cu_1Nb_3$ | po zestaleniu | 21,18 | 2,3 | 4,69 |
| $Fe_{64,5}Cr_6Mo_1Si_{13,5}B_9Cu_1Nb_3$ | po zestaleniu | 11,63 | 2,7 | 5,21 |
| | 773 K / 1 h | 11,96 | 2,7 | 5,34 |
| Stopy typu nanoperm | | | | |
| $Fe_{85,4}Zr_{6,8}B_{6,8}Cu_1$ | po zestaleniu | 12,70 | 3,9 | 4,47 |
| | 688K/15min | 12,24 | 2,2 | 4,44 |
| Stopy typu hitperm | | | | |
| $Fe_{42,7}Co_{42,7}Zr_{6,8}B_{6,8}Cu_1$ | po zestaleniu | 29,51 | 2,7 | 3,87 |
| | 573K/1 h | 29,68 | 2,7 | 4,27 |
| | 723K/5min | 30,17 | 2,7 | 4,72 |

Wartość indukcji efektywnego pola nadsubtelnego na jądrach ^{57}Fe (B_{ef}), względne natężenie linii 2 i 5 w sekstecie zeemanowskim ($\langle A_{2,5} \rangle$), dyspersja rozkładu pola nadsubtelnego fazy amorficznej (D_{am})

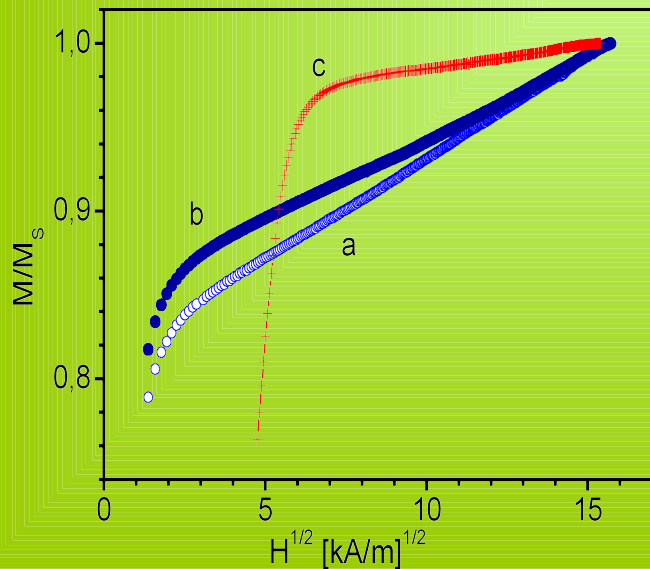
Właściwości magnetyczne



Temperaturowa zależność początkowej podatności magnetycznej dla amorficznego stopu $Fe_{74}Cu_1Nb_2Si_{13}B_{10}$ w stanie po zestaleniu (a) ($H_C \sim 10$ A/m) oraz po wygrzaniu temperaturze 693 K przez 1 h (b) ($H_C \sim 2,9$ A/m) oraz dla stopu $Fe_{86}Zr_7B_6Cu_1$ w stanie po zestaleniu (c) oraz po obróbce cieplnej w temperaturze 573 K przez 1 h (d).



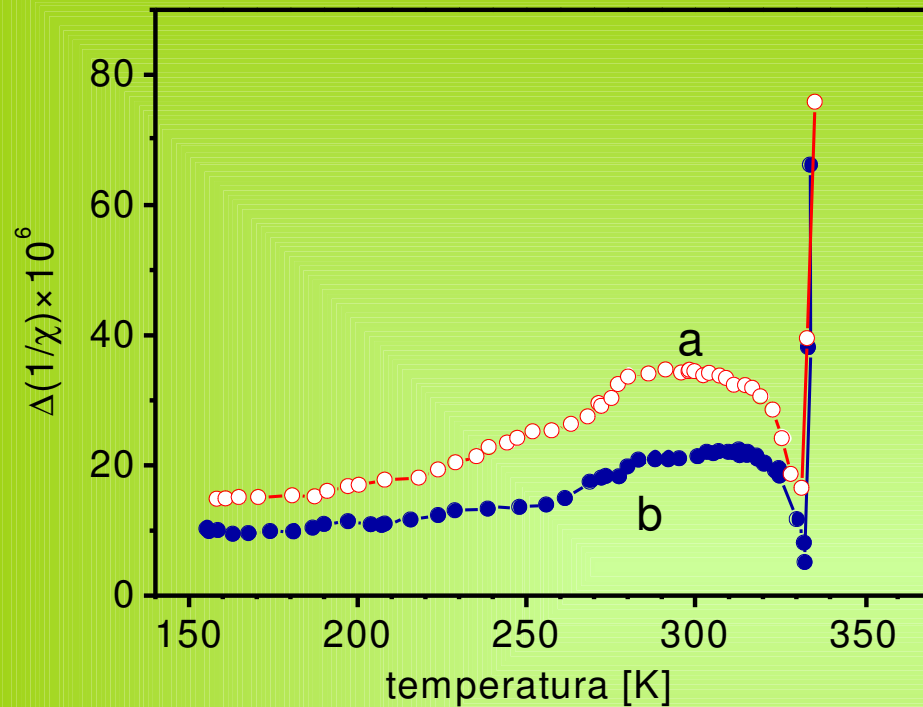
Temperaturowa zależność początkowej podatności magnetycznej (A) i tangensa kąta strat (B) dla stopu $Fe_{90}Zr_7B_2Cu_1$ w stanie po zestaleniu (a), po obróbce cieplnej w temperaturze 573 K przez 1 h (b) oraz 725 K przez 15 min (c).



Zależność magnetyzacji od pierwiastka z natężenia pola pomiarowego dla stopów $Fe_{85,4}Zr_{6,8-x}Nb_xB_{6,8}Cu_1$ po wygrzaniu w temperaturze 573 K przez 1 h: $x = 0$ (a), $x = 1$ (b); dla porównania załączono krzywą dla niklu (c) (za M_s przyjęto $M(H_{max})$)

$$M(H) = M_s + b \left(\frac{H}{0} \right)^{1/2}$$

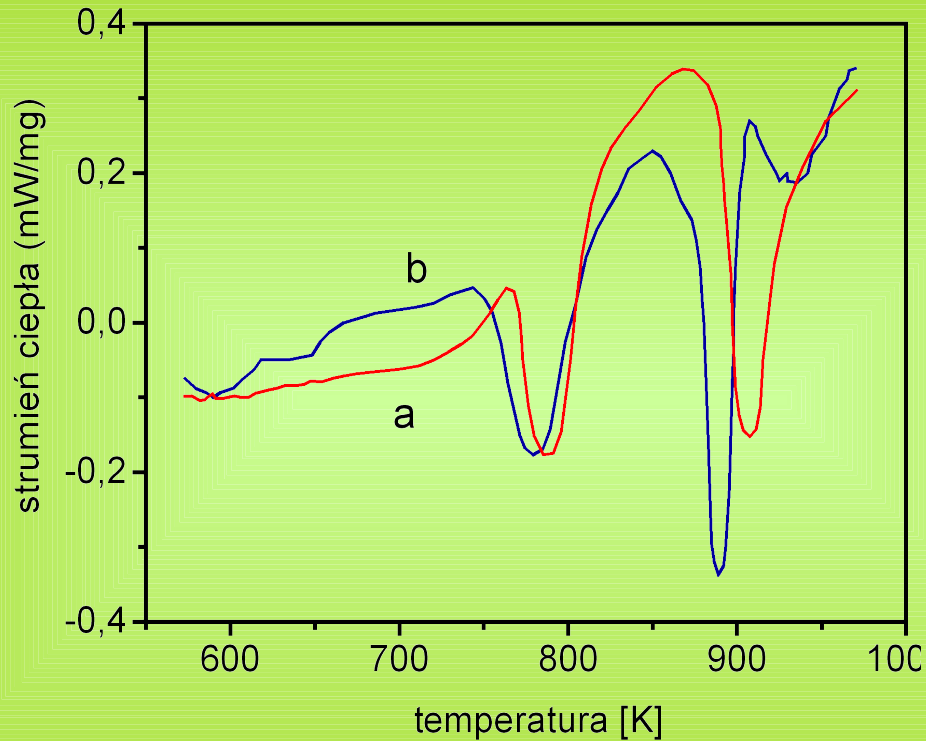
Przykładowe widma dezakomodacji podatności magnetycznej dla stopu $Fe_{86}Zr_7B_6Cu_1$ w stanie po zestaleniu (a) oraz po wygrzaniu w temperaturze 573 K przez 1 h (b).



Rozkład krzywych dezakomodacji na trzy procesy elementarne .
Wartości energii procesów $0,61 \div 1,68$ eV
Wartość czynnika przedeksponencjalnego rzędu 10^{-15} s.

Stopy nanokrystaliczne

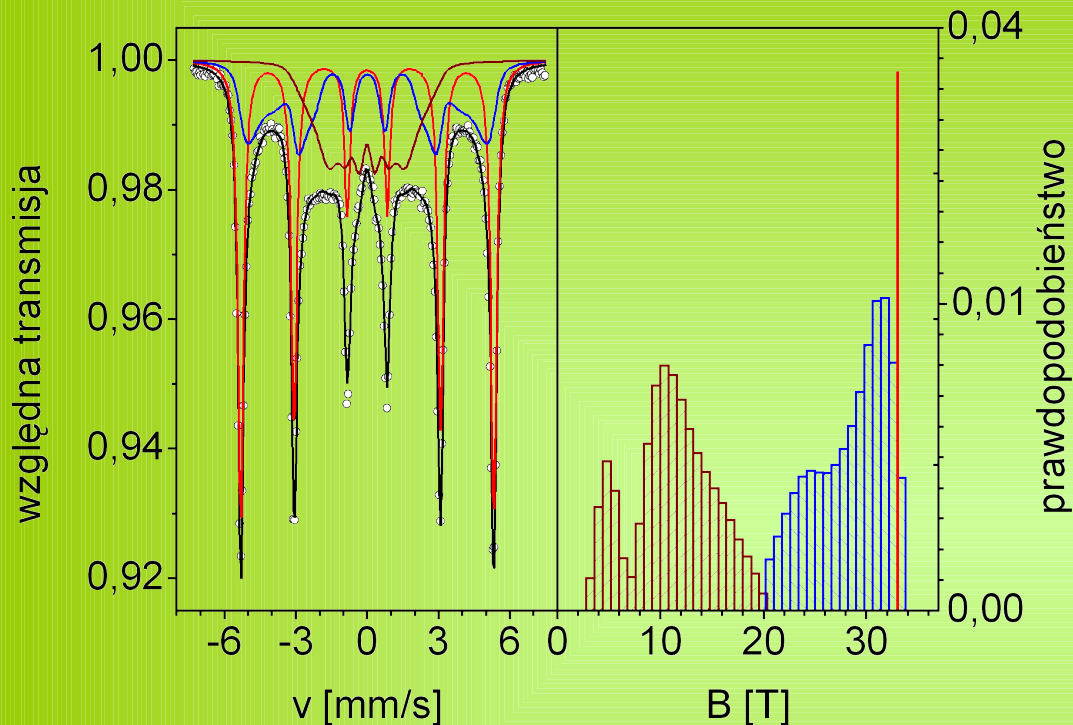
Krystalizacja stopów amorficznych



Przykładowe krzywe DSC dla stopów $Fe_{85,4}Zr_{6,8-x}Nb_xB_{6,8}Cu_1$: $x = 0$ (a) i $x = 1$ (b) dla prędkości grzania 10 K/min.

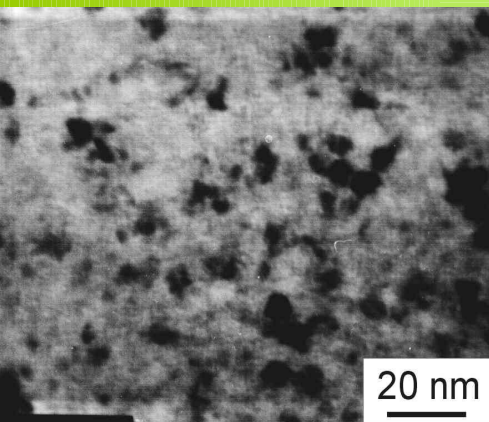
Krystalizacja pierwotna badanych stopów amorficznych

Stopy typu nanoperm



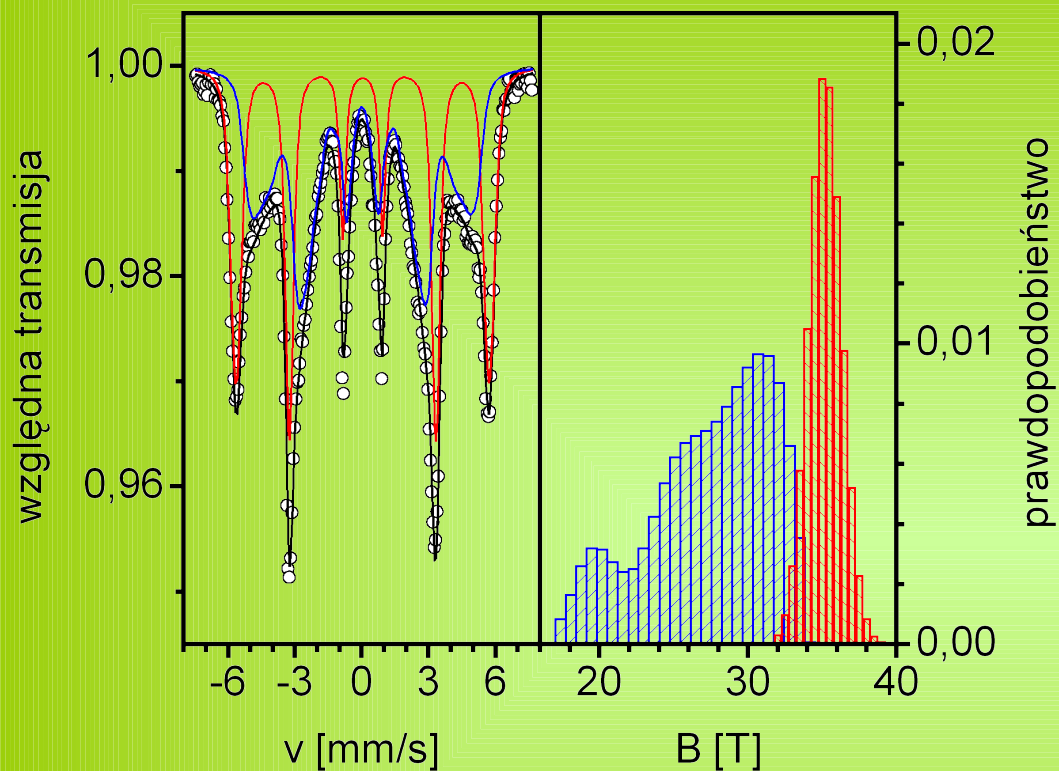
Przykładowe widmo mössbauerowskie wraz z rozkładem pól nadsubtelnych dla stopu typu nanoperm po wygrzaniu w temperaturze 800 K przez 1 h.

Parametry mössbauerowskie, skład fazowy i mikrostruktura próbek stopu $Fe_{85,4}Zr_{5,8}Nb_1B_{6,8}Cu_1$ po różnych obróbkach cieplnych



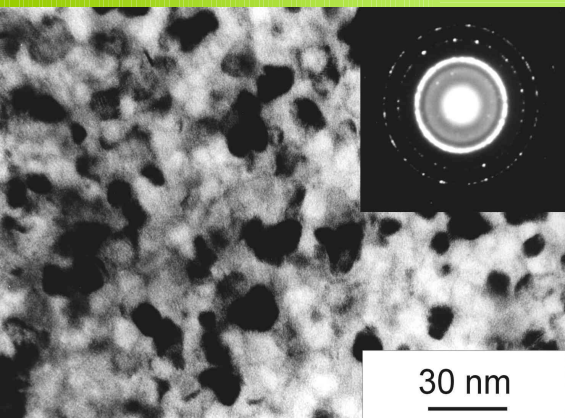
| Obróbka | $(B_{ef})_{am}$ | Fe_{am} | $(B_{ef})_p$ | Fe_p | V_p | B_k | Fe_k | V_k |
|-----------|-----------------|-----------|--------------|--------|-------|-------|--------|-------|
| Cieplna | [T] | [% at] | [T] | [% at] | | [T] | [% at] | |
| 688K/2h | 13,30 | 85,4 | 28,90 | 79,3 | 0,03 | 32,46 | 95,5 | 0,06 |
| 784K/5s | 13,30 | 85,5 | 26,00 | 71,0 | 0,18 | 32,60 | 97,0 | 0,19 |
| 784K/0,2h | 12,90 | 81,6 | 27,30 | 73,1 | 0,22 | 32,80 | 98,5 | 0,33 |
| 800K/1h | 10,50 | 80,0 | 27,40 | 73,1 | 0,35 | 33,00 | 100 | 0,39 |

Stopy typu hitperm



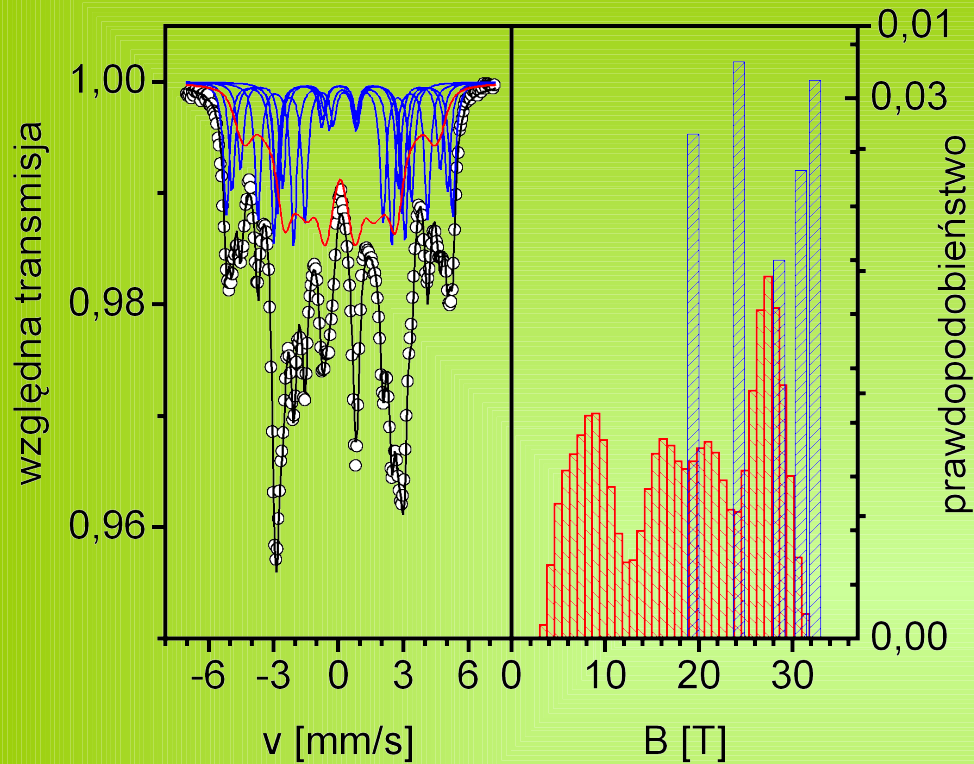
Przykładowe widmo mössbauerowskie wraz z rozkładem pól nadsubtelnych dla stopu typu hitperm po wygrzaniu w temperaturze 730 K przez 70m.

Parametry mössbauerowskie, skład fazowy i mikrostruktura próbek stopu $Fe_{42,7}Co_{42,7}Zr_{5,8}Nb_1B_{6,8}Cu_1$ po różnych obróbkach cieplnych



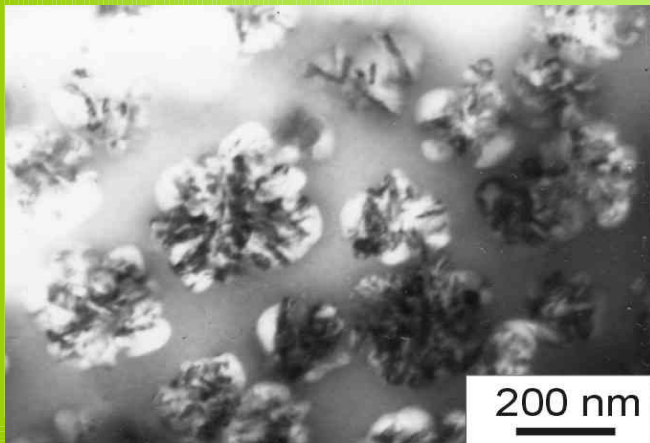
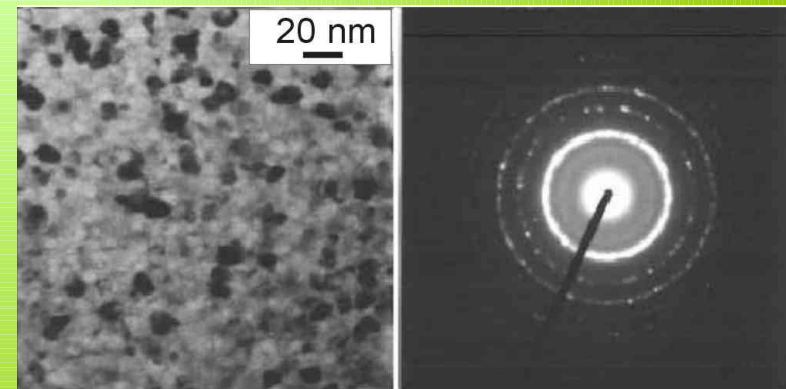
| Obróbka cieplna | $(B_{ef})_{am}$ [T] | B_k [T] | SI [mm/s] | D_k [T] | V_k | Co_k | S_{Fe} |
|-----------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-------|--------|----------|
| 730K/10m | 26,40 | 35,20 | 0,035 | 1,13 | 0,32 | 0,36 | 0,5 |
| 730K/70m | 23,80 | 34,79 | 0,023 | 1,03 | 0,46 | 0,42 | 0,9 |
| 800K/5m | 22,57 | 34,90 | 0,025 | 0,97 | 0,40 | 0,40 | 0,8 |

Stopy typu finemet



Przykładowe widmo mössbauerowskie wraz z rozkładem pól nadsubtelnych dla stopu $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ po wygrzaniu w temperaturze 823 K przez 1h

Mikrostruktura stopu $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ po wygrzaniu w temperaturze 823 K przez 1h



Mikrostruktura stopu $Fe_{77,5}Si_{13,5}B_9$ wygrzanego w temperaturze 773 K przez 0,5 h..

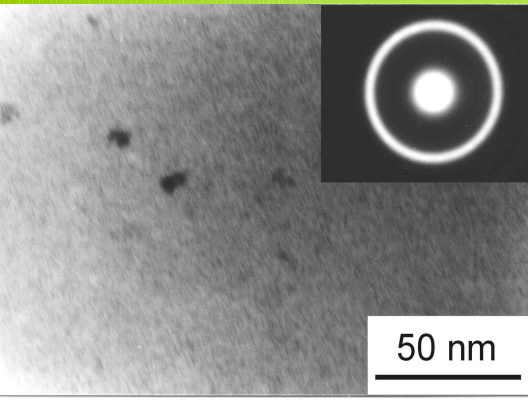
Skład fazowy i pole koercji stopu $\text{Fe}_{73,5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13,5}\text{B}_9$ w stanie po zestaleniu i różnych obróbkach cieplnych

| obróbka cieplna | V_k | Fe_k [% at] | Fe_{am} [% at] | H_C [A/m] | S_{Fe} Fe_3Si | $P_{\text{si,Fe}}(1)$ |
|--------------------|-------------|----------------------|-------------------------|--------------|-------------------------------------------|-----------------------|
| 0 | 0 | - | 73,5 | 11,03 | - | - |
| 763 K/h. | 0,18 | 75,0 | 73,2 | 2,79 | 0 | - |
| 773 K/5min | 0,20 | 76,3 | 72,8 | - | - | -0,12 |
| 773 K/1h. | 0,24 | 76,7 | 72,5 | 2,23 | 0,13 | - |
| 823 K/5s | 0,30 | 75,0 | 72,9 | - | - | -0,24 |
| 823 K/1h | 0,50 | 79,0 | 68,0 | 2,00 | 0,64 | - |

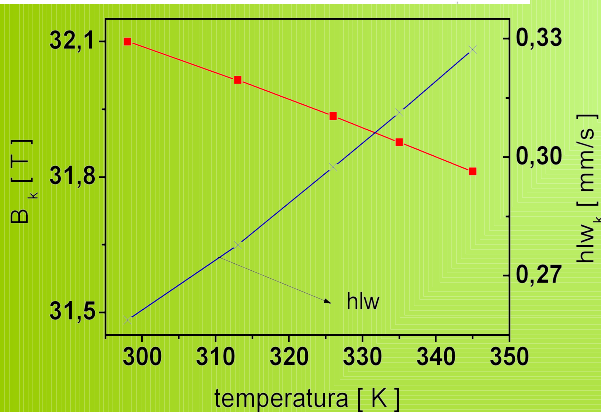
Właściwości magnetyczne stopów nanokrystalicznych

Superparamagnetyzm we wczesnych stadiach krystalizacji

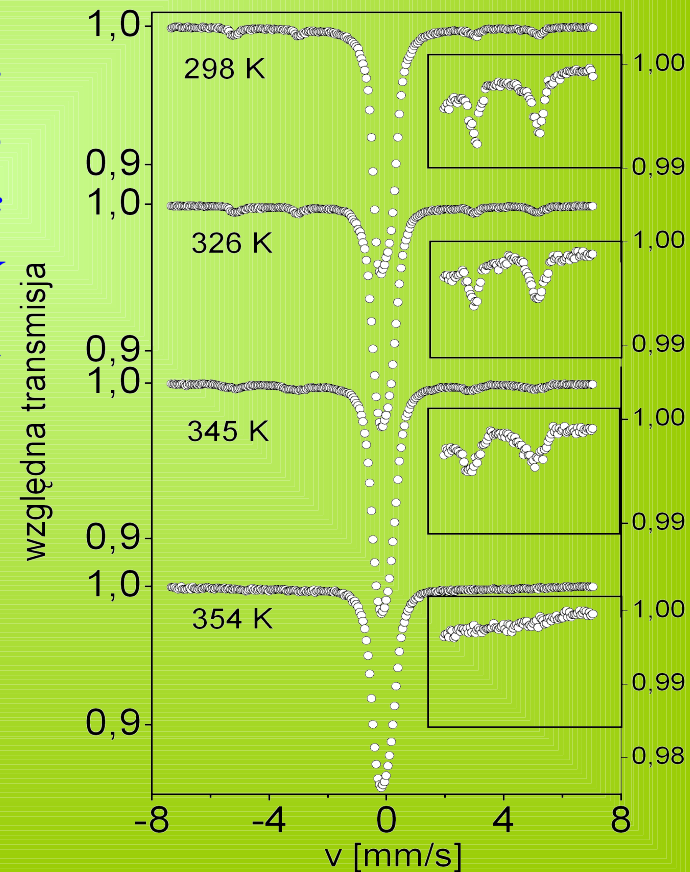
amorficznych stopów Fe-(Cr)-Si-B-Cu-Nb i Fe-Zr-(Nb)-B-Cu



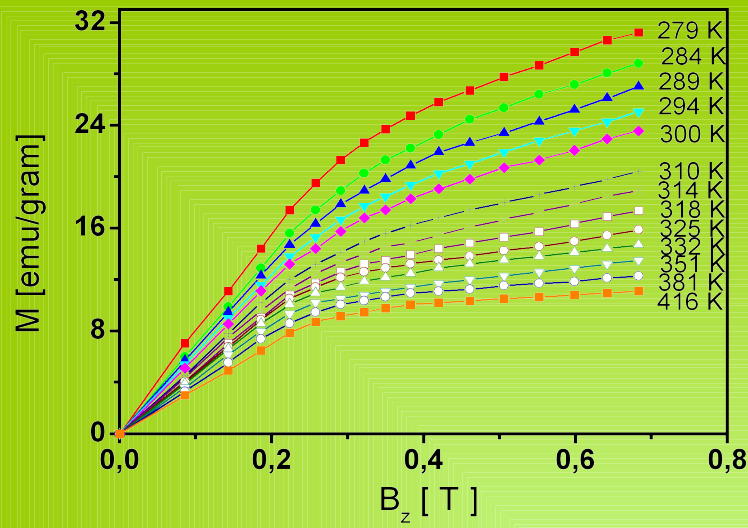
Mikrostruktura i elektronogram dla próbki stopu nanoperm po wygrzewaniu w temperaturze 688 K przez 15 min.



Widma mössbauerowskie dla stopu $Fe_{90}Zr_7B_2Cu_1$ po obróbce cieplnej w temperaturze 725 K przez 30 min. dla różnych temperatur pomiarowych



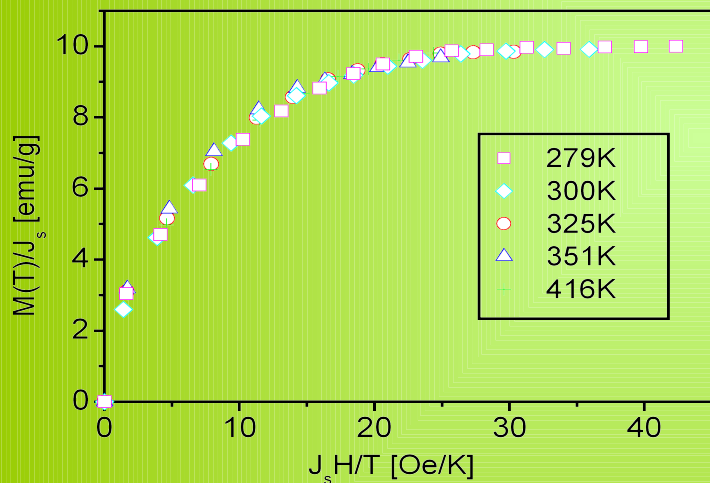
Temperaturowa zależność indukcji pola nadsubtelnego i szerokości połówkowej linii w sekście zeemanowskim dla omawianego stopu $Fe_{90}Zr_7B_2Cu_1$.



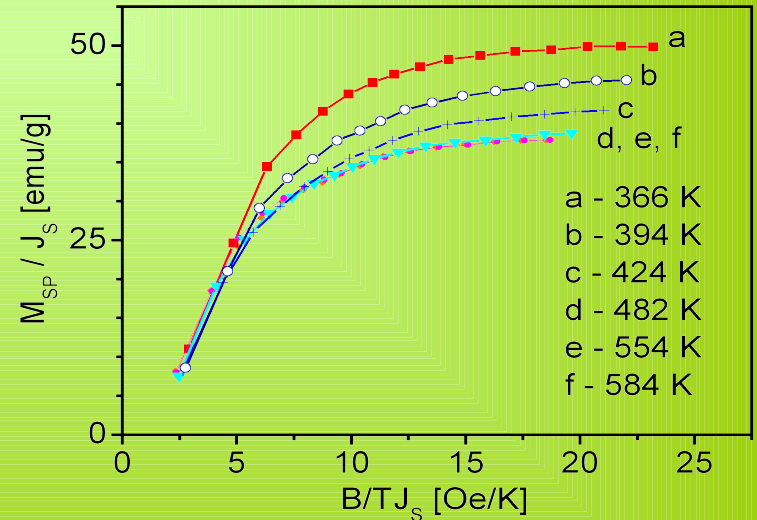
Krzywe magnetyzacji w różnych temperaturach dla omawianego stopu $Fe_{90}Zr_7B_2Cu_1$

$T_{Cp} = 250 \text{ K}$, $\mu = 360 \mu_B$, $n = 3 \cdot 10^7 \text{ [1/g]}$
 $\mu_{Fe} = 2,2 \mu_B$; 1650 atomów Fe; cząstka o średnicy 3,9 nm, $V_k = 0,05$

$$M(B, T) = n \cdot (T) \left[\text{cth} \left(\frac{(T)B}{k_B T} \right) - \frac{k_B T}{(T)B} \right] + M_{am}$$



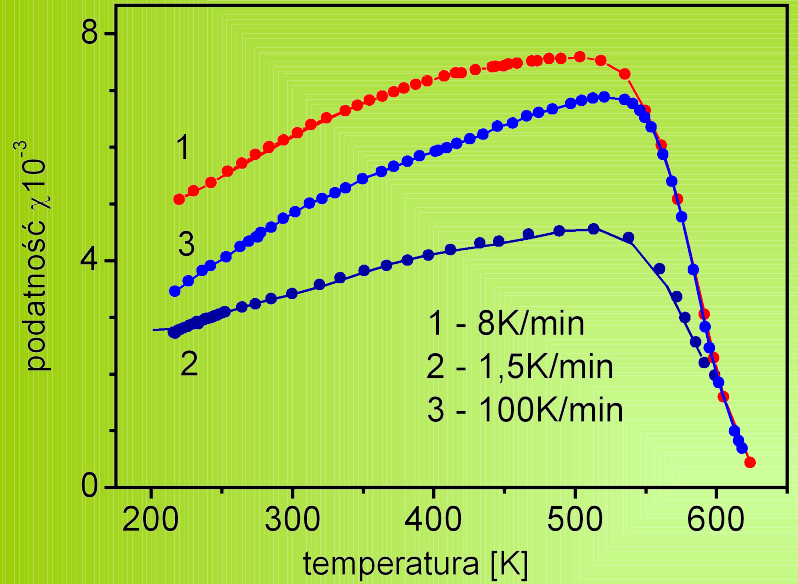
$$M_{am}(B, T) = \frac{A}{T - T_{Cp}} B$$



Superparamagnetyczny wkład w namagnesowanie dla omawianego stopu $Fe_{90}Zr_7B_2Cu_1$

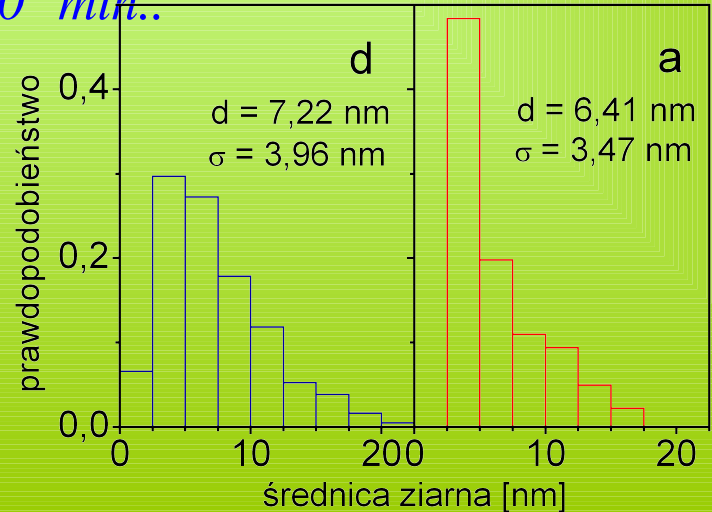
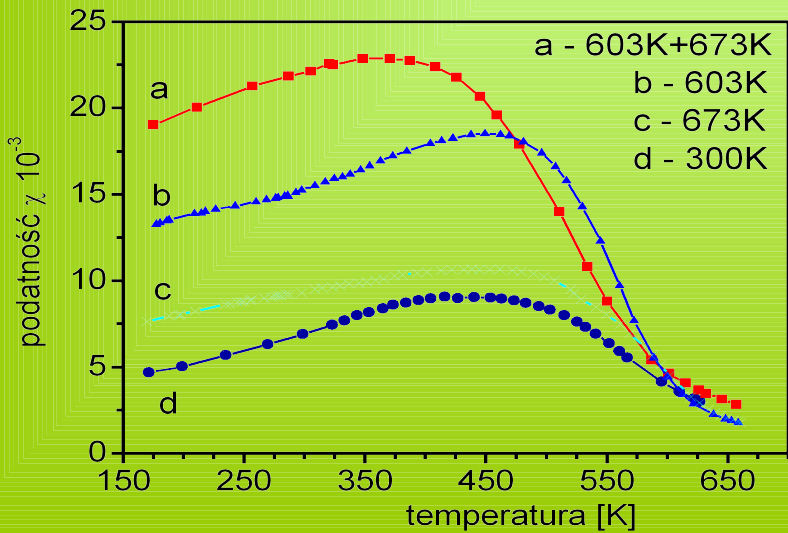
Superparamagnetyczny wkład w namagnesowanie dla próbki stopu $Fe_{65,5}Cr_7Cu_1Mo_1Nb_3Si_{13,5}B_9$ wygrzanego w temperaturze 818 K przez 15 min

Stopy typu finemet

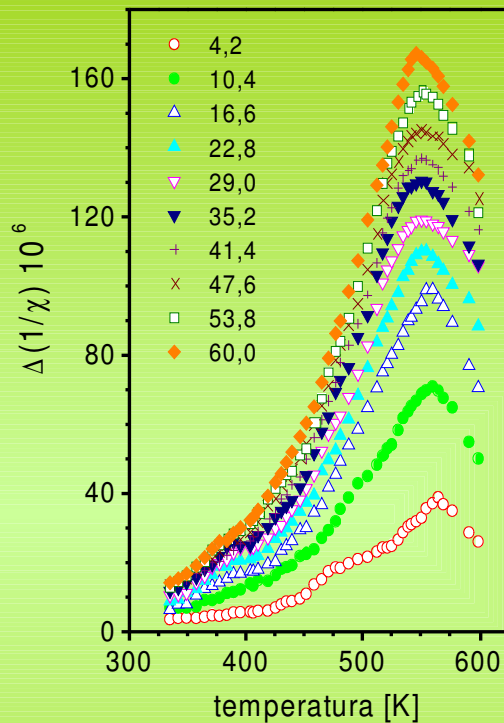
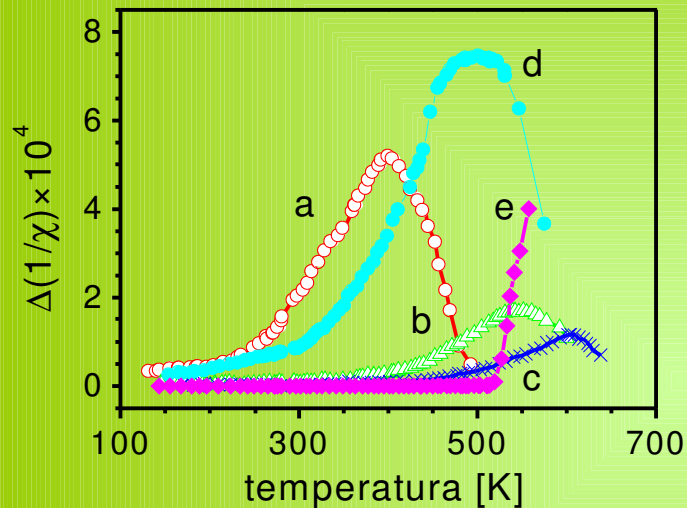


Zależność początkowej podatności magnetycznej od temperatury dla próbek stopu $Fe_{73,5}Cu_1Nb_3Si_{15,5}B_7$ wygrzanego w temperaturze 813 K przez 1 h i następnie chłodzonego do temperatury pokojowej z różnymi prędkościami

Początkowa podatność magnetyczna dla nanokrystalicznego stopu $Fe_{74}Cu_1Nb_3Si_{12}B_{10}$ po wygrzaniu w różnych temperaturach i nanokrystalizacji w 823 K w czasie 10 min..



Stopy typu hitperm



Izochroniczne krzywe dezakomodacji podatności magnetycznej dla nanokrystalicznego stopu typu hitperm odpowiadające różnym czasom t_2 , po których dokonywano pomiarów podatności $\chi(t_2)$

Temperaturowa zależność dezakomodacji początkowej podatności magnetycznej dla stopu typu hitperm wygrzanego w temperaturze 573 K przez 1 h (a), 730 K przez 70 min (b) i 800 K przez 5 min (c) oraz częściowo skryształizowanego podczas zestalania (d) ponadto $\Delta(1/\chi) = f(t)$ dla stopu $\text{Fe}_{85,4}\text{Zr}_{5,8}\text{Nb}_1\text{B}_{6,8}\text{Cu}_1$ po całkowitej obróbce (e).

Podsumowanie i wnioski

Do oryginalnych osiągnięć badań można zaliczyć:

1. Opracowanie dla stopów Fe-Cr-Co modelu struktury faz i ich ewolucji podczas obróbki cieplnej tych stopów.
2. Wykazanie możliwości otrzymania charakteryzującej się dużą koercją fazy $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ w stopach Nd-Fe-B otrzymywanych na drodze syntezy mechanicznej pierwiastków składowych.
3. Analizę zmian mikrostruktury stopów Fe-Si o podwyższonej zawartości krzemu oraz wskazanie, że najlepszymi miękkimi właściwościami magnetycznymi charakteryzują się stopy o najmniejszym uporządkowaniu atomowym.
4. Wykazanie istnienia efektu inwarowego w amorficznych stopach Fe-Zr-(Nb)-B-(Cu) i wskazanie przyczyn jego powstawania.
5. Opis ewolucji struktury fazowej stopów Fe-(Co)-Zr-(Nb)-B-Cu w trakcie ich obróbki cieplnej, jak również określenie warunków niezbędnych dla uporządkowania atomowego wydzieleni faz krystalicznych.

6. Określenie rozmiarów i gęstości cząstek superparamagnetycznych oraz ich obserwacje mössbauerowskie w stopach Fe-Zr-(Nb)-B-Cu
7. Wykazanie możliwości poprawy miękkich właściwości magnetycznych stopów Fe-(M)-Si-B-Nb-Cu poprzez ich wielostopniową obróbkę cieplną i dobór optymalnej prędkości chłodzenia do temperatury pokojowej, jak również wykazanie istnienia niskotemperaturowych pasm dezakomodacji podatności magnetycznej w stopach Fe-Co-Zr-(Nb)-Cu, które nie znikają podczas nanokrystalizacji tych stopów .

Dorobek naukowy

autor:

1 monografii;

4 artykułów (2 z listy filadelfijskiej);

współautor:

63 artykułów (41 z listy filadelfijskiej);

85 komunikatów konferencyjnych

współwykonawca:

9 programów badawczych KBN