

# **The influence of dopants Mo and Ni on magnetic characteristics of Fe–Si–B amorphous alloys**

**A Nosenko<sup>1</sup>, M Zakharenko<sup>2</sup>, V Nosenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 36 Vernadsky Str., 03142, Kyiv, Ukraine,  
[nosenko@imp.kiev.ua](mailto:nosenko@imp.kiev.ua)

<sup>2</sup>Department of Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64, Volodymyrska st., 01601, Ukraine

## Description

**Amorphous and nanocrystalline tape wound magnetic cores have a number of advantages as compared to conventional magnetic cores made of crystalline materials, namely:**

- higher stability**
- lower weight**
- smaller size**

# Goal

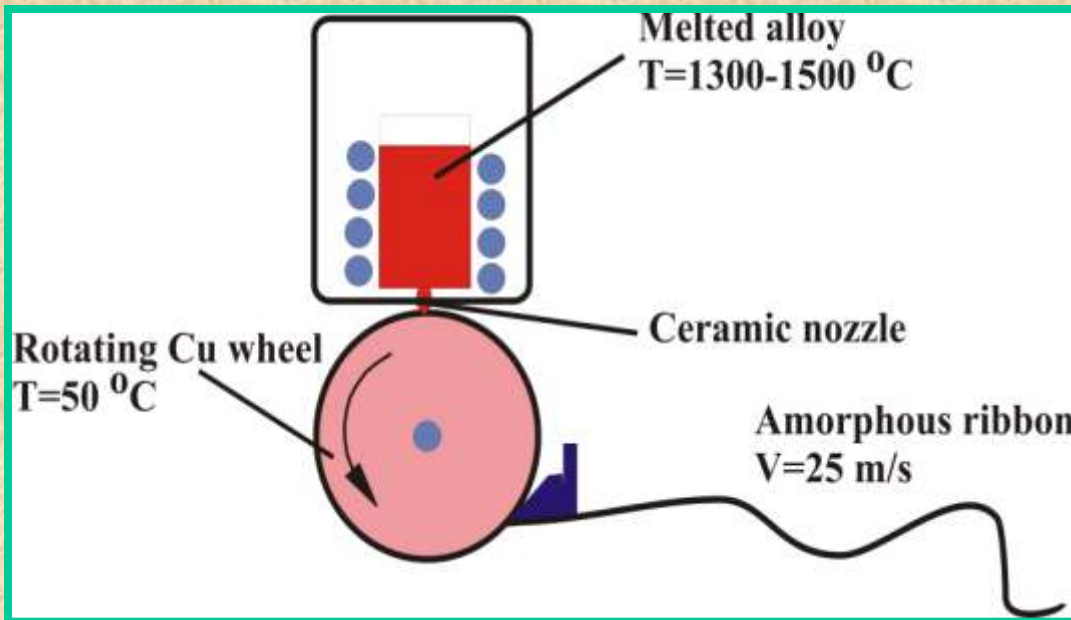
To improve the magnetic properties of cores of  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$  amorphous alloy by doping and heat treatment.

## Samples for research

Number	Content
1	$\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$
2	$\text{Fe}_{79}\text{Mo}_1\text{Si}_6\text{B}_{14}$
3	$\text{Fe}_{78}\text{Mo}_2\text{Si}_6\text{B}_{14}$
4	$\text{Fe}_{77}\text{Mo}_3\text{Si}_6\text{B}_{14}$
5	$\text{Fe}_{78}\text{Ni}_2\text{Si}_6\text{B}_{14}$
6	$\text{Fe}_{76}\text{Ni}_4\text{Si}_6\text{B}_{14}$
7	$\text{Fe}_{74}\text{Ni}_6\text{Si}_6\text{B}_{14}$

# Rapid quenching from liquid state for obtaining amorphous alloys

Equipment for rapid quenching of the melt (cooling rate of up to  $10^6$  K/s) enables us to obtain amorphous ribbons 25-30  $\mu\text{m}$  thick.



Rapid quenching scheme



Amorphous ribbon



# Thermal stability $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$ alloys with dopants Ni and Mo

5

Table 1.  
Thermal stability characteristics ( $v_H=20$  K/min.) of amorphous alloys.

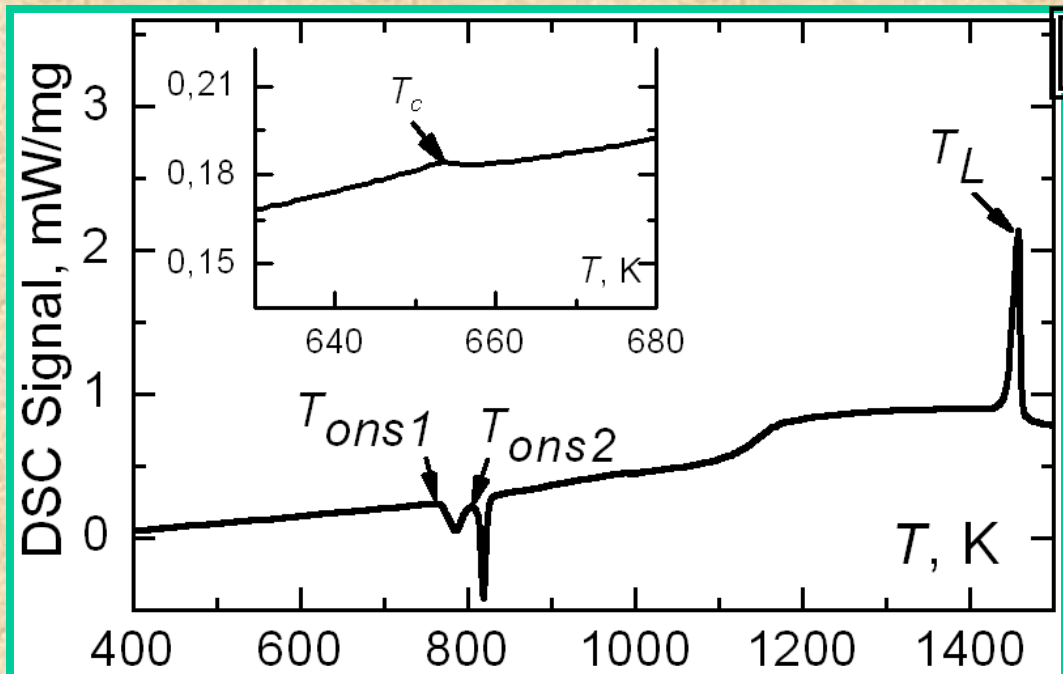


Fig. 1. Calorimetric curve for  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$  alloy at heating rate  $v_H=20$  K/min. The insert shows the feature corresponding to Curie temperature.

Content	$T_{ons1}, \text{K}$	$T_{ons2}, \text{K}$	$T_L, \text{K}$	$T_{ons1}/T_L$
$\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$	761	806	1459	0.522
$\text{Fe}_{79}\text{Mo}_1\text{Si}_6\text{B}_{14}$	765	808	1449	0.528
$\text{Fe}_{78}\text{Mo}_2\text{Si}_6\text{B}_{14}$	773	834	1440	0.537
$\text{Fe}_{77}\text{Mo}_3\text{Si}_6\text{B}_{14}$	786	844	1439	0.546
$\text{Fe}_{78}\text{Ni}_2\text{Si}_6\text{B}_{14}$	747	800	1450	0.515
$\text{Fe}_{76}\text{Ni}_4\text{Si}_6\text{B}_{14}$	752	799	1442	0.522
$\text{Fe}_{74}\text{Ni}_6\text{Si}_6\text{B}_{14}$	752	794	1437	0.523

# X-ray phase analysis of $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$ amorphous alloy

6

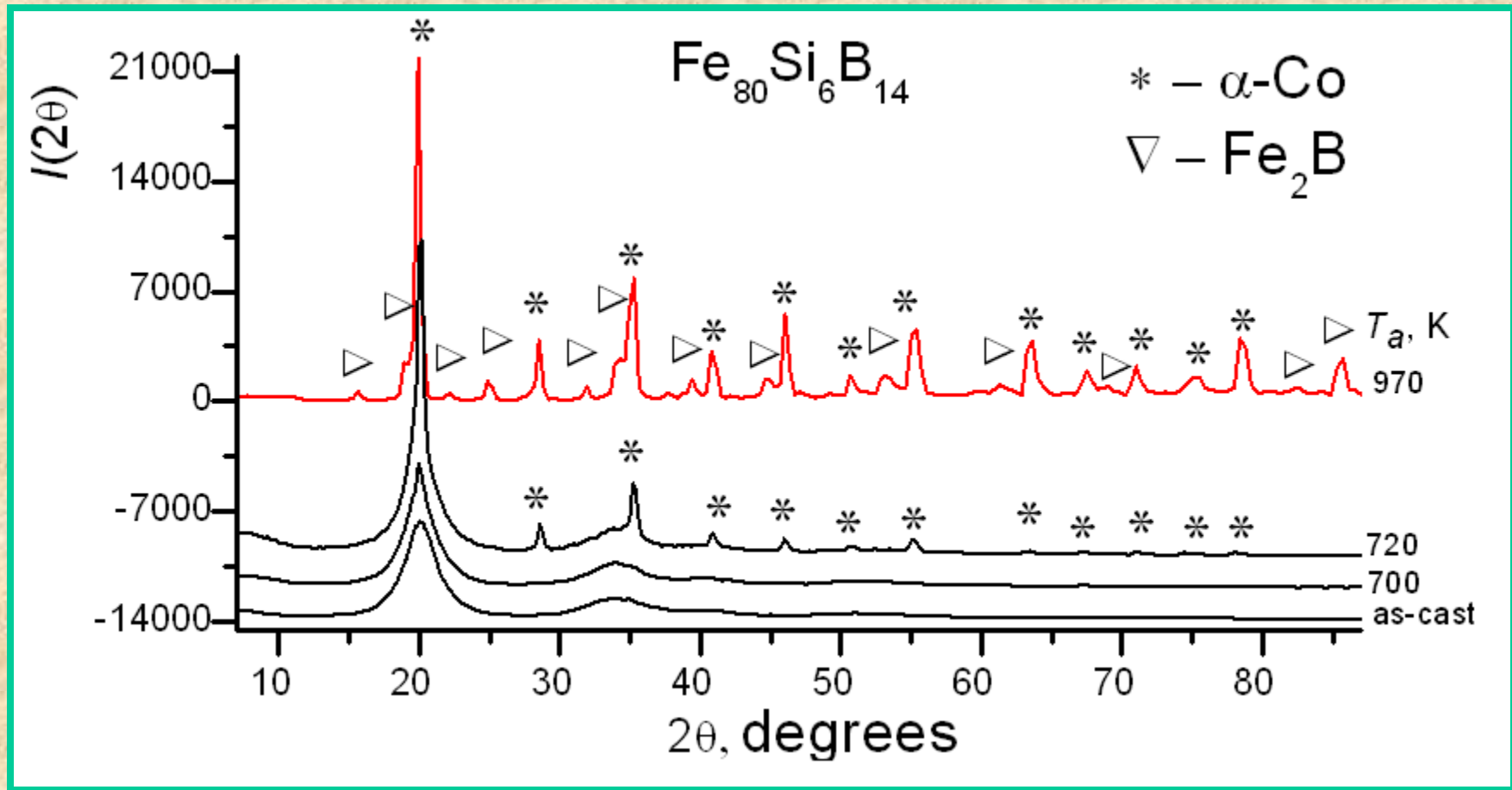


Fig. 2. X-ray diffraction patterns

# Small angle X-ray scattering method

7

The size of clusters was estimated using the formula  $L \approx 2\pi/q_m$ , where  $q_m$  is a diffraction vector the scalar value of which  $|q_m|$  is equal to  $4\pi \sin\theta_m/\lambda$ .

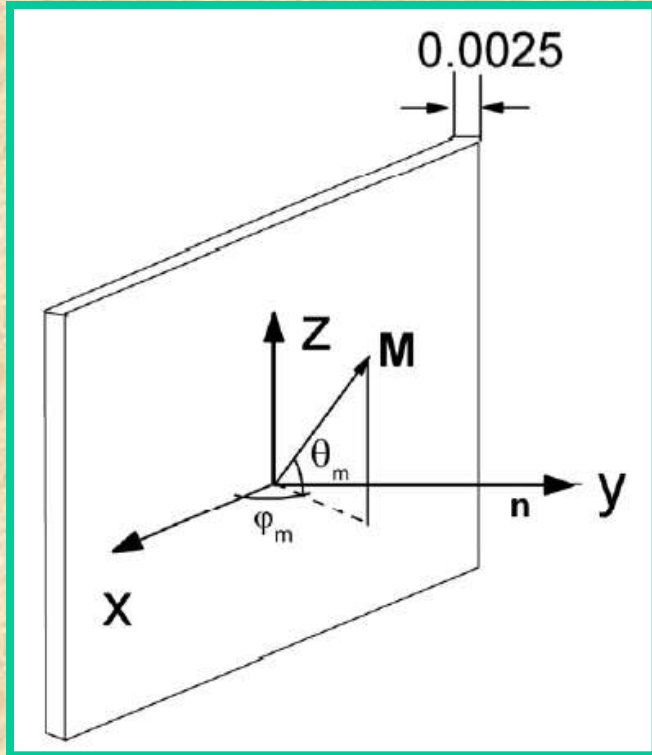


Fig. 3. Sample and the co-ordinate system for the X-ray diffraction and FMR measurements. The falling X-ray beam was directed along the x and z axes.

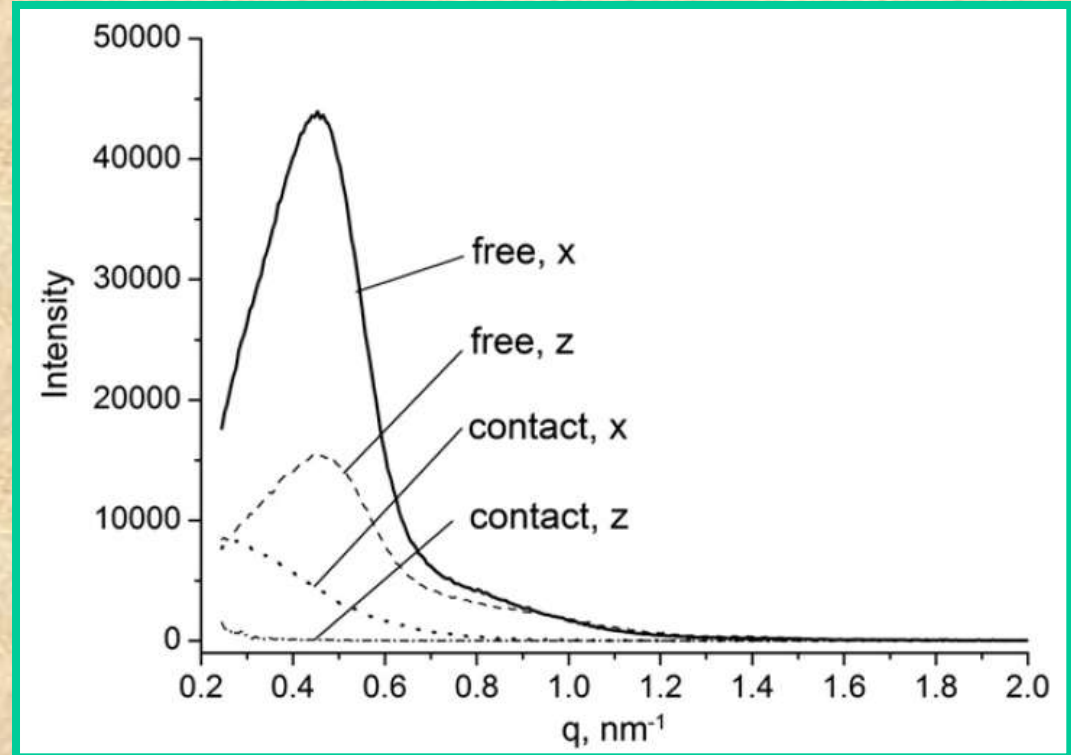


Fig. 4. Small angle X-ray scattering (SAXS) from the  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$  ribbon from the free and contact surfaces of the ribbon.

- [1] Structure and magnetic anisotropy of rapidly quenched FeSiB ribbons / G.S. Mogilny, B.D. Shanina, V.V. Maslov, V.K. Nosenko, A.D. Shevchenko, V.G. Gavriljuk // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2011. – V. 357. – P.3237–3244.

# Magnetic susceptibility $\chi(T)$ of $\text{Fe}_{80-x}\text{Mo}_x\text{Si}_6\text{B}_{14}$ ( $x=0, 1, 3$ ) amorphous alloys

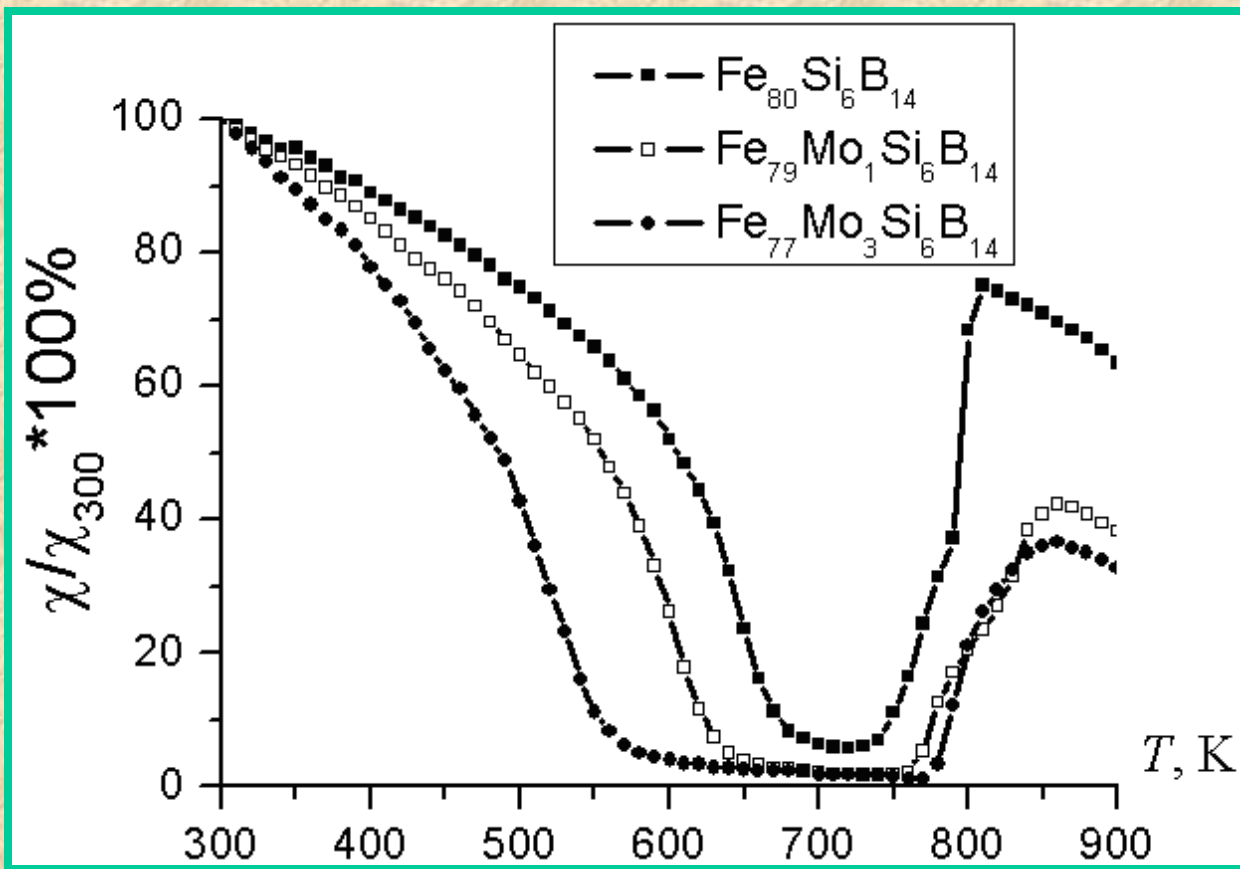


Fig. 5. Temperature dependences of normalized magnetic susceptibility  $\chi(T)$  of Fe-Mo-Si-B alloys at heating rate  $v_H=8$  K/min.

Curie-Weiss law :

$$\chi = \chi_0 + \frac{Nm^2}{3k(T-\theta)}$$

where  $\chi_0$  – temperature independent part of susceptibility,  $\theta$  – paramagnetic Curie temperature,  $m$  – effective paramagnetic moment per atom of the alloy,  $k$  and  $N$  – Boltzmann constant and Avogadro number, respectively.



# The influence of molybdenum dopants on Curie temperature and magnetic moment of $\text{Fe}_{80-x}\text{Mo}_x\text{Si}_6\text{B}_{14}$ amorphous alloys

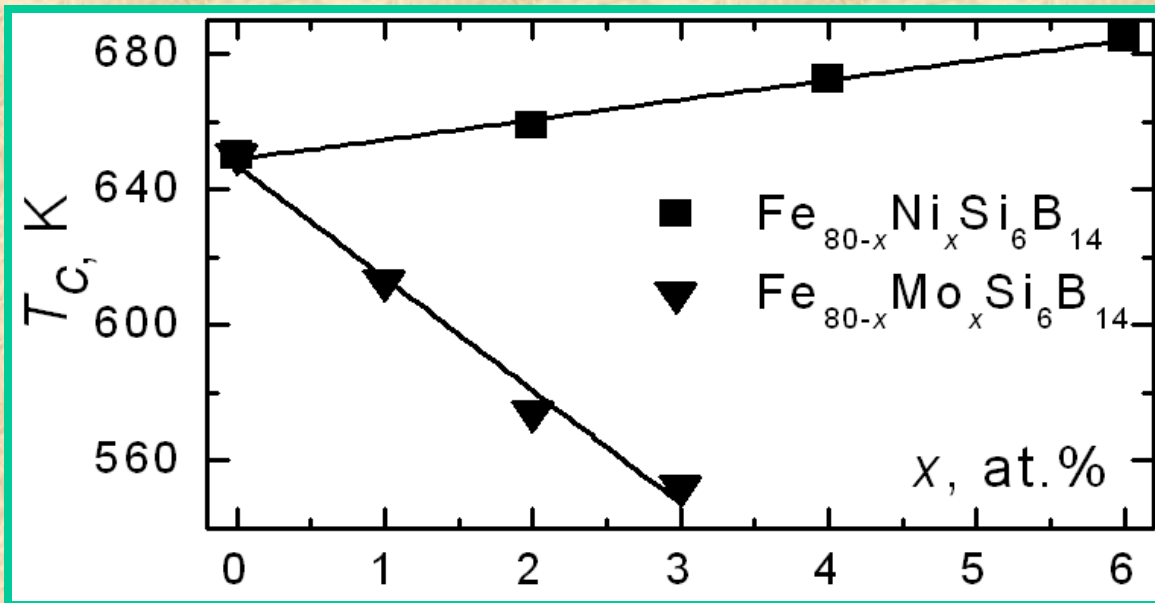


Table 2.  
 Temperatures of crystallization peaks  $T_p$ ,  
 Curie temperature  $T_c$ ,  
 localized magnetic moment per atom of transition metal  $m_{TM}$  of  $\text{Fe}_{80-x}\text{Mo}_x\text{Si}_6\text{B}_{14}$  amorphous alloys.

Fig. 6. Dependences of Curie temperature  $T_c$  on the content of dopant in  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$  alloy.

Content	$T_{p1}, \text{K}$	$T_{p2}, \text{K}$	$m_{TM}, m_B$	$T_c, \text{K}$
$\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$	771	804	6.07	648
$\text{Fe}_{79}\text{Mo}_1\text{Si}_6\text{B}_{14}$	773	815	5.81	613
$\text{Fe}_{78}\text{Mo}_2\text{Si}_6\text{B}_{14}$	781	842	5.26	574
$\text{Fe}_{77}\text{Mo}_3\text{Si}_6\text{B}_{14}$	794	852	4.75	552

# The influence of heat treatment on characteristics of dynamic magnetization loops of $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$ amorphous alloys

10

Table 3.

Coercive force  $H_c$  and specific core loss  $P_{cm}$  of  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$  alloy after annealing at temperature  $T_a$ .

$T_a$ , K	$H_c$ , A/m	$P_{cm}$ , W/kg
300	18.7	9.9
500	21.2	10.7
600	13.8	6.4
<b>650</b>	<b>11.4</b>	<b>4.3</b>
680	15.2	5.7
700	193.2	53.3
720	983.4	283.9

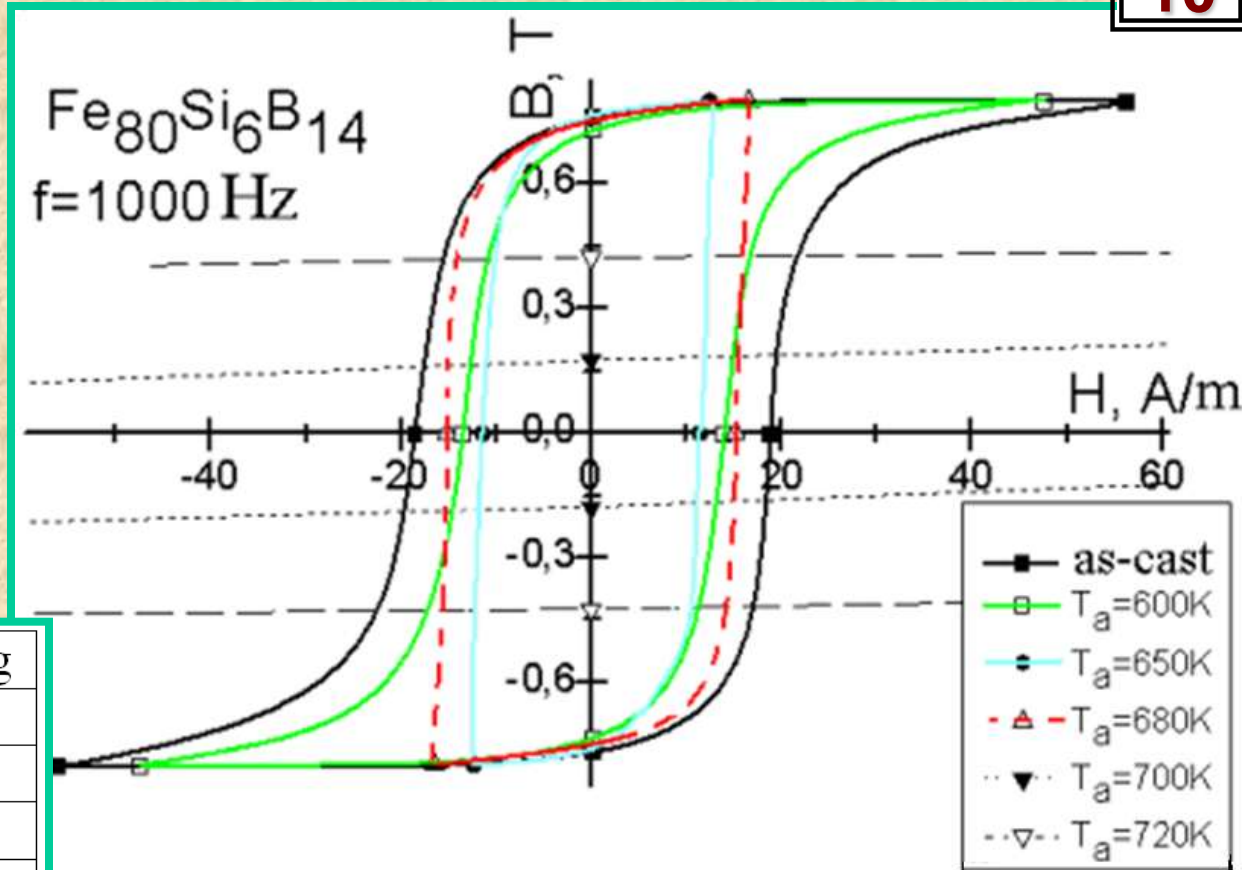


Fig. 7. Magnetization loops of  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$  alloy at different annealing temperatures  $T_a$ . Annealing duration was 30 min.

# Initial magnetic permeability and dynamic coercive force after heat treatment

11

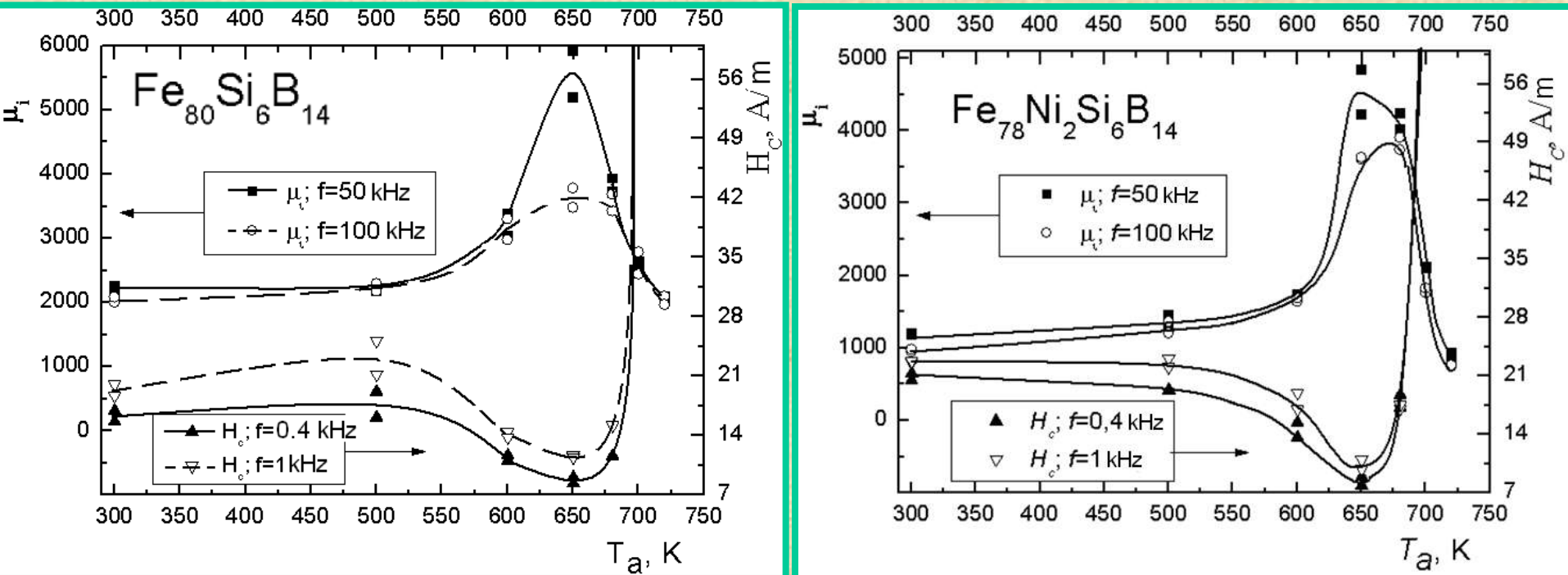


Fig. 8. Dependences of coercive force  $H_c$  and initial magnetic permeability  $\mu_i$  of amorphous alloys on isochronal annealing temperature  $T_a$ . Annealing duration was 30 min.



# The influence of heat treatment on structure of amorphous alloys

12

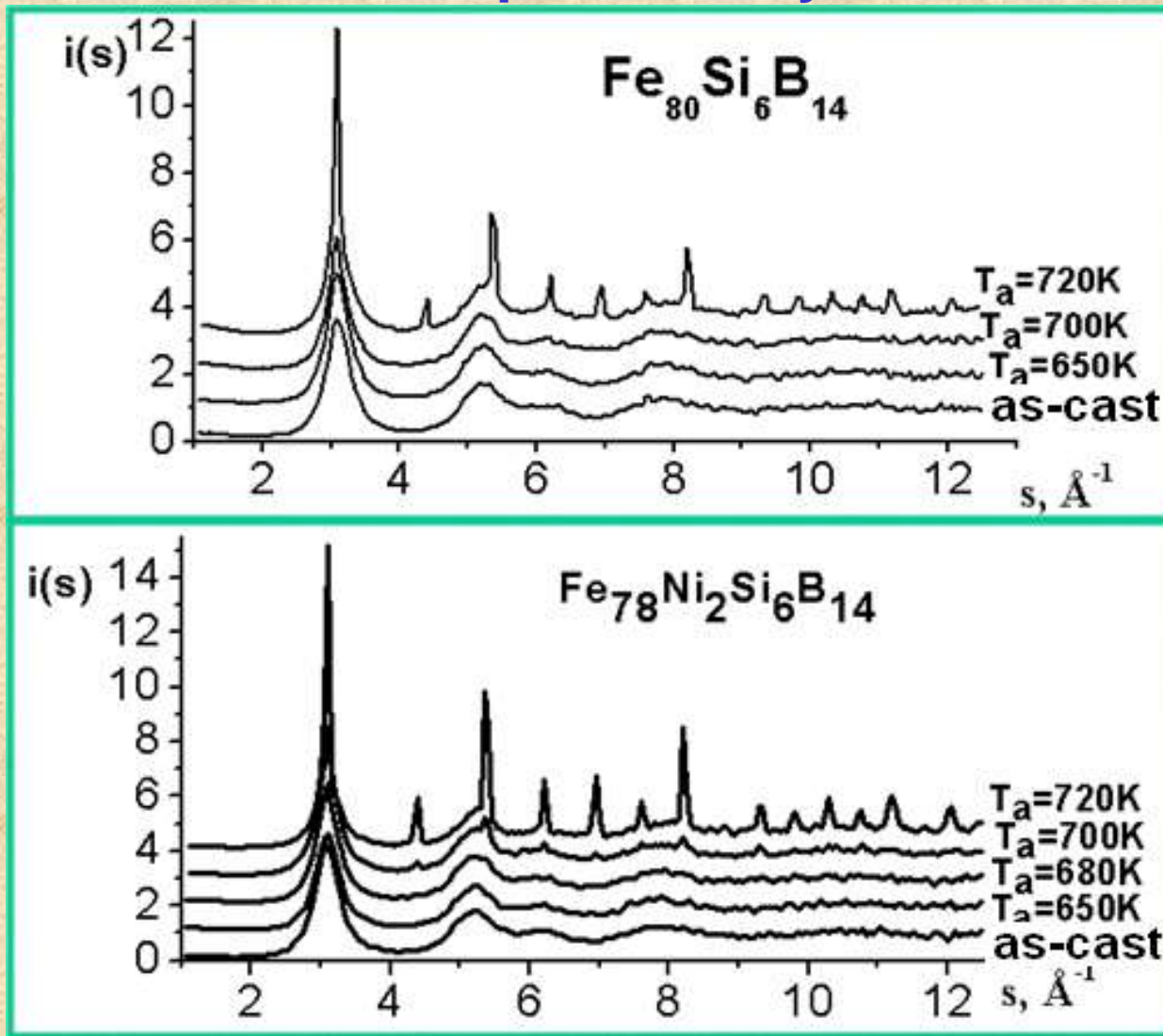


Fig. 9. Structural factors of alloys after isochronal annealing at  $T_a$  during 30 min. (radiation Mo  $K_\alpha$ ).



# The influence of dopants Mo and Ni on dynamic coercive force of $\text{Fe}_{80-x}\text{TM}_x\text{Si}_6\text{B}_{14}$ amorphous alloys in the as-cast state and after the optimal thermal treatment

13

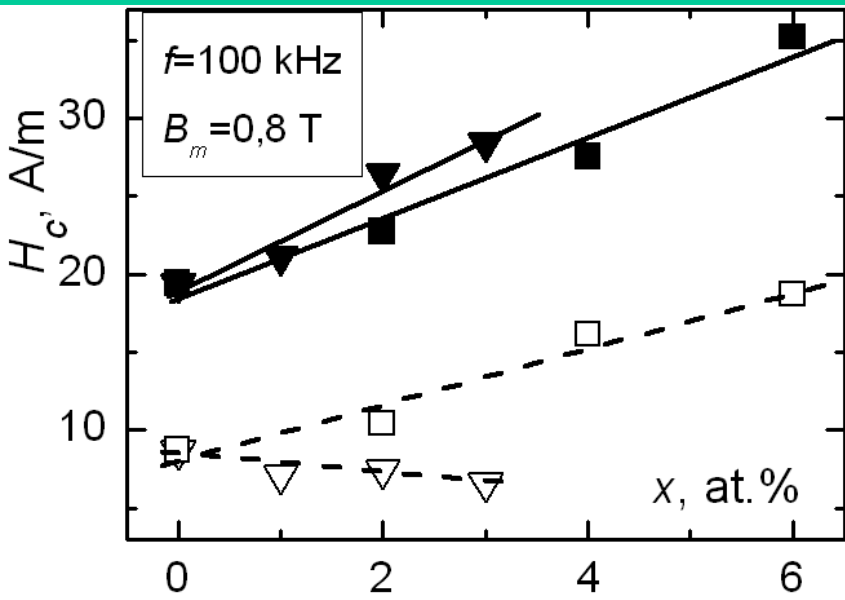


Table 4. Coercive force  $H_c$ , specific core loss  $P_{cm}$  and initial magnetic permeability  $\mu_i$  for  $\text{Fe}_{80-x}\text{TM}_x\text{Si}_6\text{B}_{14}$  amorphous alloys after isochronal annealing at optimal temperatures  $T_{ao}$ .

Content	$H_c$ , A/m ( $f=1$ kHz)	$P_{cm}$ , W/kg ( $f=1$ kHz)	$\mu_i$ ( $f=100$ kHz)
$\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$	8.7	4.4	3200
$\text{Fe}_{79}\text{Mo}_1\text{Si}_6\text{B}_{14}$	7.1	2.6	4800
$\text{Fe}_{78}\text{Mo}_2\text{Si}_6\text{B}_{14}$	7.4	2.7	9400
$\text{Fe}_{77}\text{Mo}_3\text{Si}_6\text{B}_{14}$	6.6	2.3	7200
$\text{Fe}_{78}\text{Ni}_2\text{Si}_6\text{B}_{14}$	10.4	3.8	3600
$\text{Fe}_{76}\text{Ni}_4\text{Si}_6\text{B}_{14}$	16.1	5.6	4400
$\text{Fe}_{74}\text{Ni}_6\text{Si}_6\text{B}_{14}$	18.7	7.6	3900

Fig. 10. Dependence of  $H_c$  for  $\text{Fe}_{80-x}\text{TM}_x\text{Si}_6\text{B}_{14}$  amorphous alloys on dopant content in the as-cast state (dark marks) and after the optimal heat treatment (light marks): TM=Ni (■, □) and Mo (▼, ▽).

# The influence of dopants Mo and Ni on initial magnetic permeability of $\text{Fe}_{80-x}\text{TM}_x\text{Si}_6\text{B}_{14}$ amorphous alloys before and after optimal thermal treatment

14

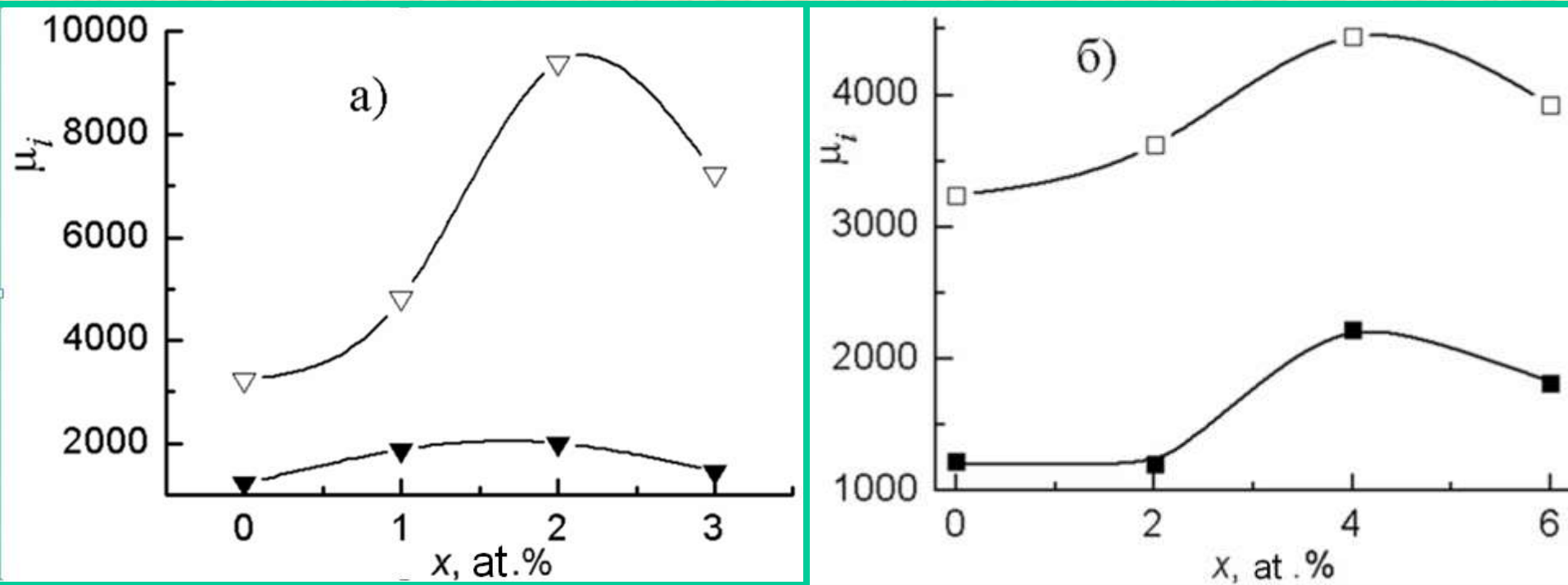


Fig. 11. Dependence of  $\mu_i$  for  $\text{Fe}_{80-x}\text{TM}_x\text{Si}_6\text{B}_{14}$  amorphous alloys on the content of dopants in the as-cast state (dark marks) and after the optimal thermal treatment (light marks): a) TM=Mo ( $\blacktriangledown$ ,  $\triangledown$ ) and b) TM=Ni ( $\blacksquare$ ,  $\square$ ). At  $f=100$  kHz and  $B_m=0.8$  T.

1. The high values of localized magnetic moments in  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$  amorphous alloy are caused by the formation of magnetic clusters enriched with iron which are characterized by nearest atomic surroundings close to  $\alpha\text{-Fe}$  and, as to their magnetic properties, behave as superparamagnetic particles with large magnetic moment.
2. Effective magnetic moment tends to decrease with increasing Mo content in  $\text{Fe}_{80}\text{Si}_6\text{B}_{14}$  amorphous alloy due to features of Fe-Mo exchange interaction.
3. The change of coercive force and initial magnetic permeability at annealing of  $\text{Fe}_{80-x}\text{TM}_x\text{Si}_6\text{B}_{14}$  amorphous alloy is caused by the atomic structure relaxation accompanied by local changes of short range order. Optimum annealing temperatures for high magnetic characteristics are determined.
4. Magnetic properties of  $\text{Fe}_{78}\text{Mo}_2\text{Si}_6\text{B}_{14}$  amorphous alloy after optimal heat treatment, in particular high value of initial magnetic permeability of 9400 at frequency 100 kHz enable effective use of the present alloy for manufacture of high performance medium frequency magnetic cores.

**Thank you for your  
attention!!!**



Відомо, що ефективний магнітний момент для випадку

багатокомпонентної суміші має вигляд:

$$m^2 = \sum_i c_i m_i^2$$

де  $c_i, m_i$  - концентрація та парціальний магнітний момент  $i$ -го компонента, для нашого випадку:

$$m^2 = c_1 m_1^2 + c_2 m_2^2$$

Як відомо, магнітний момент атомів заліза з координацією, близькою до  $\gamma$ -Fe (координаційне число  $N=12$ ) відповідає трьом неспареним електронам, а отже  $m_1$  вважатимемо рівним  $3,87m_B$ . Далі, щоб пояснити аномально високі значення магнітних моментів, необхідно припустити, що атоми заліза, яким притаманне низьке значення координаційного числа, утворюють магнітні комплекси з великими магнітними

моментами. Тому  $m_2$  можна оцінити за рівнянням:

$$m_2 = 2\sqrt{ns(ns - 1)},$$

де  $s=3/2$  – спін ізольованого атому заліза,  $n$  – кількість атомів у магнітному кластері (комплексі). Зважаючи на значення координаційного числа для цього типу атомів заліза, приймемо для оцінки  $n = 8$ . Тоді, очевидно, якщо концентрація феромагнітних комплексів складає  $c$ , то  $c_2=c$ , а  $c_1=1-nc$ . У результаті для магнітного моменту на атом заліза  $m_{Fe}$  можна записати вираз:

$$m_{Fe}^2 = m^2 / c_{Fe} = (1 - nc)m_1^2 + cm_2^2$$

де  $c_{Fe} = 0,8$  – атомна частка заліза в АМС, або після підстановки значень  $m_1$  і  $m_2$ :

$$m_{Fe}^2 = (1 - nc)15 + 4c \frac{3}{2} n \left( \frac{3}{2} n + 1 \right) = 15 + 9nc(n - 1)$$

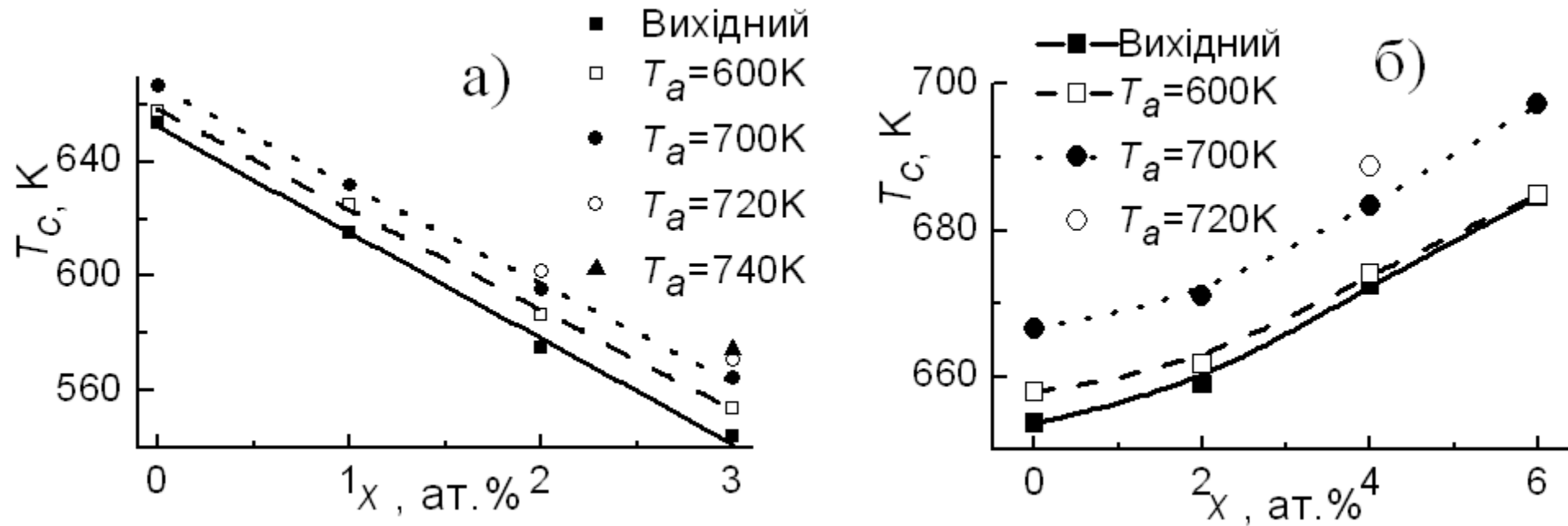


Рис. 17. Залежність температури Кюрі від вмісту легувальної домішки в АМС  $\text{Fe}_{80-x}\text{Mo}_x\text{Si}_6\text{V}_{14}$  (а) та  $\text{Fe}_{80-x}\text{Ni}_x\text{Si}_6\text{V}_{14}$  (б). Швидкість нагрівання  $v_H=20$  К/хв.

Частку кристалічної фази  $X_c$ , що утворюється в зразках, підданих термообробці, визначали з точністю  $\sim 1\%$  за методикою [107], в основі якої лежить зіставлення повних рентгенограм від вихідного аморфного, аморфно-кристалічного і повністю закристиалізованого зразків. При достатньо виправданому допущенні [107] незалежного розсіяння аморфною і кристалічною фазами:

$$I(s) = X_c I_c(s) + (1 - X_c) I_a(s), \quad (2.1)$$

де  $I(s)$ ,  $I_c(s)$ ,  $I_a(s)$  - відповідно інтенсивність розсіяння від аморфно-кристалічного, закристиалізованого і вихідного аморфного зразків. При відомих  $I(s)$ ,  $I_c(s)$  і  $I_a(s)$  в широкому діапазоні вектора дифракції

$$X_c = (I(s) - I_a(s)) / (I_c(s) - I_a(s)). \quad (2.2)$$

Значення  $X_c$  визначалось шляхом перебору його значень до досягнення якнайкращої відповідності функції, розрахованої по правій частині рівняння (2.1), з одержаною експериментально.

[2] Метод определения доли кристаллической фазы в аморфно-кристаллических материалах / А.Г. Ильинский, В.В. Маслов, В.К Носенко [и др.] / Металлофизика и новейшие технологии. – 1999. – Т.21, №12. – С.38–45.



Таблиця 5.1.

Значення висоти першого максимуму дифракційного гало  $i(s_1)$ , напівширина першого максимуму  $\Delta s_{1/2}$ , площа під першим максимумом ФРРА  $A_m$  та об'ємна доля кристалічної фази  $X_c$  для сплавів  $Fe_{80}Si_6B_{14}$ ;  $Fe_{78}Mo_2Si_6B_{14}$  та  $Fe_{78}Ni_2Si_6B_{14}$  після різних термічних обробок, протягом 30 хв.

Зразок	$T_a$ , К	$i(s_1)$ , од.	$\Delta s_{1/2}$ , $\text{Å}^{-1}$	$A_m$ , од.	$X_c$ , %
$Fe_{80}Si_6B_{14}$	вихідний	3,66	0,44	10,9	0
	650	4,03	0,40	12,3	1,5
	700	4,08	0,32	11,1	2,5
	720	9,30	0,10	12,7	24
	970	21,86	0,07	12,8	100
$Fe_{78}Mo_2Si_6B_{14}$	вихідний	3,86	0,44	11,5	0
	650	4,04	0,41	12,4	0,8
	680	3,97	0,34	11,6	2,5
	720	4,43	0,30	12,1	9,9
	970	20,62	0,07	12,7	100
$Fe_{78}Ni_2Si_6B_{14}$	вихідний	3,62	0,41	11,1	0
	650	4,16	0,42	12,6	0,5
	680	4,49	0,34	12,2	2,9
	700	5,52	0,27	12,6	5,5
	720	11,18	0,08	12,7	29
	970	23,50	0,07	12,8	100



Таблиця 3.12.

Локалізований магнітний момент на атом заліза  $m_{Fe}$ , концентрація феромагнітних комплексів  $c$ , температура Кюрі  $\theta$  та координаційне число  $N[105]$  для АМС  $Fe_{80}B_6Si_{14}$ , одержаних при різних режимах термчасової обробки розплаву.

Номер зразка	$T^+$ , °C; $t_h$ , хв.	$m_{Fe}$ , $m_B$	$c$ , %	$\theta$ , К	$N$ , [105]
1	1350; 5	5,10	2,2	665	12,6
2	1450; 6	5,47	3,0	665	12,8
3	1450; 20	6,07	4,3	645	12,5
4	1550; 5	5,82	3,7	648	12,3
5	1650; 1	6,16	4,6	644	11,3