

## მაგნიტოკრისტალური ანიზოტროპიის ფენომენოლოგიური თეორია

მალხაზ ბიბილური, ლალიტა დარჩიაშვილი  
საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

### რეზიუმე

გაანალიზებულია მონო- და პოლიკრისტალურ ფერომაგნიტურ მასალებში მაგნიტური ანიზოტროპიის გამოვლინების მიზეზები, აგრეთვე მაგნიტოკრისტალური ანიზოტროპიის არსი. განხილულია სხვადასხვა სიმეტრიის ფერომაგნიტურ ლითონებში შინაგანი ენერჯის განსაზღვრის ფორმულა მწკრივის სახით. მწკრივი შედგენილია  $\sin \theta$  გამოყენებით, სადაც  $\theta$ -წარმოადგენს კუთხეს ჰექსაგონალურ ღერძსა და დამაგნიტების ვექტორს შორის. განხილულია ასევე მაგნიტურ ანიზოტროპიაზე განმაგნიტების ფაქტორის გავლენა და კონფიგურაციული ანიზოტროპიის შეფასების შესაძლებლობა.

**საკვანძო სიტყვები:** სპონტანური დამაგნიტება. ანიზოტროპიის კონსტანტა. მაგნიტოსტატიკა. დეფორმაცია. იზოტროპული ინვარიანტი.

### 1. შესავალი

მაგნიტური ანიზოტროპია წარმოადგენს ფერომაგნიტური კრისტალისათვის სპონტანური დამაგნიტების მმართველობის არჩევით მოვლენას. სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ, ყოველ კონკრეტულ კრისტალში მაგნიტური ენერჯია დამოკიდებულია სპონტანური დამაგნიტების ორიენტაციაზე. ეს ეფექტი შეიძლება გამოწვეული იყოს მთელი რიგი მოვლენებით. კერძოდ, პოლიკრისტალურ ნიმუშებში მაგნიტური ანიზოტროპიის გაჩენის მიზეზი შეიძლება იყოს დეფორმაცია, კრისტალის თერმოდამუშავება, მისი ზედაპირის ფორმა და ა.შ. თუ უგულებელვყოფთ ყველა ამ მიზეზს და განვიხილავთ იდეალურ სივრცეში შემოუსაზღვრავ მონოკრისტალს, მაშინ წარმოქმნილი მაგნიტური ანიზოტროპია დამოკიდებული იქნება მხოლოდ მისი სტრუქტურაზე (ანუ სიმეტრიაზე). ასეთ ანიზოტროპიას მაგნიტოკრისტალური ეწოდება.

### 2. ძირითადი ნაწილი

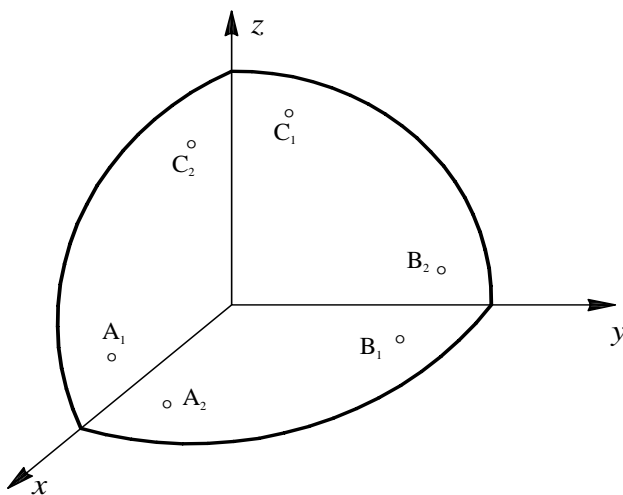
მაგნიტოკრისტალური ანიზოტროპიის უმარტივესი შემთხვევაა ერთღერძა ანიზოტროპია. მაგალითისთვის განვიხილოთ კობალტი. ეს არის ფერომაგნიტური ლითონი, რომელსაც ოთახის ტემპერატურაზე ჰექსაგონური მჭიდრო წყობა (ჰმწ) ახასიათებს. კობალტის შიგა მაგნიტური ენერჯის მინიმუმი შეესატყვისება შემთხვევას, როდესაც  $\vec{M}$  დამაგნიტება მიმართულია ჰექსაგონური წყობის  $\vec{C}$  ღერძის გასწვრივ. თუ  $\vec{M}$  ადგენს  $\vec{C}$ -თან  $\theta$  კუთხეს, მაშინ შიდა ენერჯია შეიძლება წარმოდგენილ იქნეს  $\sin \theta$ -ს ლუწი უსასრულო მწკრივის სახით.

$$U_A = K_{u_1} \sin^2 \theta + K_{u_2} \sin^4 \theta + K_{u_3} \sin^6 \theta + K_{u_4} \sin^2 \theta \cos 6\theta \quad (1)$$

ამ ენერჯიას, მაგნიტური ანიზოტროპიის ენერჯია ეწოდება.  $K_{u_1}, K_{u_2}, \dots$  კოეფიციენტები ერთღერძა ანიზოტროპიის კონსტანტებია და კონკრეტულ კრისტალს

(ნივთიერებას) ახასიათებს  $15^{\circ}\text{C}$ -ზე  $C_0$ -თვის ტოლია  $K_{u_1} = 4,53 \cdot 10^6$  ერგ/სმ<sup>3</sup> და  $K_{u_2} = 1,44 \cdot 10^6$  ერგ/სმ<sup>3</sup> [1]. მოცემულ შემთხვევაში, კონსტანტები დადებითია და ენერგიის მინიმუმს აქვს ადგილი, როდესაც  $\sin \theta = 0$ . ე.ი.  $\vec{M} \uparrow \uparrow \vec{C}$   $C$  ღერძს ეწოდება ადვილი დამაგნიტების ღერძი. თუ დავუშვებთ, რომ  $K_{u_1} < 0$ , ხოლო (1)-ში დანარჩენ წევრებს უგულებელვყოფთ, მაშინ  $U_A$  მინიმალურ მნიშვნელობას მიაღწევს, როდესაც  $\sin \theta = 1$ , ანუ  $\vec{M} \perp \vec{C}$ , ამ დროს დამაგნიტების ვექტორი  $C$  ღერძის მართობ სიბრტყეში ძევს. ამ სიბრტყეს, ადვილი დამაგნიტებულობის სიბრტყე ეწოდება.

თუ კრისტალს უფრო მაღალი სიმეტრია აქვს (მაგალითად, კუბური), მაშინ მდგომარეობა რადიკალურად იცვლება. ამ დროს, სივრცის მხოლოდ ერთ ოქტანში ექვსი



ნახ.1. ეკვივალენტური მიმართულებები კუბურ კრისტალში

ეკვივალენტური მიმართულებათა (ნახ.1), ხოლო სრული  $4\pi$  სხეულოვანი კუთხე 48 ეკვივალენტურ მიმართულებას შეიცავს. ცხადია, ამ მიმართულებების გასწვრივ კრისტალის მაგნიტური ანიზოტროპიის ენერგია ერთი და იგივეა. ამ შეზღუდვას მივყავართ იმ დასკვნამდე, რომ კუბური კრისტალის თავისუფალი ენერგია უნდა შეიცავდეს სპონტანური დამაგნიტების შემადგენლობის შედგენილ სამ ინვარიანტულ კომბინაციას.

$$\begin{aligned} I_1 &= M_x^2 M_y^2 + M_x^2 M_z^2 + M_y^2 M_z^2; \\ I_2 &= M_x^2 M_y^2 M_z^2; \quad I_3 = M_x^2 + M_y^2 + M_z^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$I_3$  ინვარიანტი იზოტროპულია, ამიტომ ვერ შევა  $U_A$ -ში. თუ  $\vec{M}$  მგეზავ კოსინუსებს აღვნიშნავთ  $a_1, a_2, a_3$ -ით და უკუვაგდებთ იზოტროპიულ ვარიანტს, მაშინ (2)-სთვის:

$$I_1 = a_1^2 a_2^2 + a_1^2 a_3^2 + a_2^2 a_3^2; \quad I_2 = a_1^2 a_2^2 a_3^2 \quad (3)$$

და ანიზოტროპიის ენერგიას აქვს შემდეგი სახე:

$$U_A = K_1 I_1 + K_2 I_2 + K_3 I_1^2 + K_4 I_1 I_2 + \dots \quad (4)$$

სადაც  $K_1, K_2, K_3$  კუბური ანიზოტროპიის კონსტანტებია, რომლებიც განისაზღვრება ექსპერიმენტულად, ასე მაგალითად, რკინისთვის  $K_1 = 4,72 \cdot 10^5$  ერგ/სმ<sup>3</sup>  $K_2 = -0,075 \cdot 10^5$  ერგ/სმ<sup>3</sup> [2], ნიკელისთვის  $K_2 = -5,7 \cdot 10^4$  ერგ/სმ<sup>3</sup>  $K_3 = -2,3 \cdot 10^4$  ერგ/სმ<sup>3</sup> [3]. ითვლება, რომ  $K_i (i \geq 3)$  კონსტანტები  $K_1$  და  $K_2$  -თან შედარებით საკმაოდ მცირეა, თუმცა ამ დაშვებას საკმაო საფუძველი არა აქვს.

ანიზოტროპიის კონსტანტებს შორის თანაფარდობა განსაზღვრავს ანიზოტროპიის ტიპს. შედარებისთვის ავიღოთ ორი მიმართულება [111] და [100]. პირველ შემთხვევაში,

$$a_1 = a_2 = a_3 = \sqrt{\frac{1}{3}}; \quad \text{მაშინ (3) და (4) გვაძლევს:}$$

$$U_A^{[11]} = \frac{1}{3}K_1 + \frac{1}{27}K_2 + \frac{1}{9}K_3 + \frac{1}{81}K_4 + \dots \quad (5)$$

[100] მიმართულებისთვის  $a_2 = a_3 = 0$ . თუ  $K_3$  და  $K_4$  კონსტანტებს საკმაოდ მცირეებად ჩავთვლით, მაშინ  $9K_1 + K_2 > 0$ , პირობის შესრულებისას ადვილი დამაგნიტების ღერძი იქნება მეოთხე რიგის სიმეტრიის ღერძი (რკინის შემთხვევა). თუ  $9K_1 + K_2 < 0$ , მაშინ ანიზოტროპია ერთ-ერთი მესამე რიგის ღერძის გასწვრივ იქნება მიმართული (ნიკელის შემთხვევა).

### 3. დასკვნა

ამრიგად, მაგნიტურ ანიზოტროპიაზე განმაგნიტების ფაქტორის გავლენას,  $V$  მოცულობის ფერომაგნიტიკის დამაგნიტებისას მისი მაგნიტოსტატიკური ენერგია იქნება

$$U = \frac{NI^2V}{2\mu_0}, \quad (6)$$

სადაც  $N$  განმაგნიტების ფაქტორია;  $I$  - დამაგნიტება. თუ ნიმუშს აქვს ბრუნვის ელიფსოიდის ფორმა, რომლის ღერძი 2 ღერძს ემთხვევა და განმარტების ფაქტორი ამ ღერძის გასწვრივ  $N_z$ -ის ტოლია, მაშინ  $N_x = N_y = (1 - (N_z)/2)$  თანაფარდობის გათვალისწინებით მივიღებთ:

$$\begin{aligned} U &= \frac{I^2V}{2\mu_0} (N_x \sin^2 \theta \cos^2 \varphi + N_y \sin^2 \theta \sin^2 \varphi + N_z \cos^2 \varphi) = \\ &= \frac{I^2V}{2\mu_0} (3N_z - 1) \cos^2 \varphi + \text{const.} \end{aligned} \quad (7)$$

აქ  $(\theta, \varphi)$  სკონტანური დამაგნიტების ვექტორის სფერული კოორდინატებია.

მე-7 ფორმულით განსაზღვრული ანიზოტროპია კონფიგურაციულია.

### ლიტერატურა – References – Литература:

1. Pauthenet R., Barnier Y., Rimet J. J. (1962). Phys.Soc. Japan, v.17. Suppl. B1, p.309
2. Genghagel H., Hoffman U. (1968). Phys.Stat.Sol. v. 29, p.91.
3. France J.J.M., de Vries G. (1968). Physica. v.39, p.477.

## PHENOMENOLOGICAL THEORY OF MAGNETIC ANISOTROPY

Bibiluri Malkhaz, Darchiashvili Lalita

Georgian Technical University

### Summary

The causes of the revealing magnetic anisotropy of mono- and polycrystalline ferromagnetic materials, as well as the essence of magnetocrystalline anisotropy are analyzed. The formula in the form of a series is discussed for determination of the internal energy in ferromagnetic metals of different symmetry. The row is composed by  $\sin\theta$ , where  $\theta$  represents the angle between the hexagonal axis and the magnetization vector. The influence of the demagnetization factor on the magnetic anisotropy and the possibility of estimating the configurational anisotropy are also discussed.

## ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ

Бибилури М., Дарчиашвили Л.  
Грузинский Технический Университет

### Резюме

Проанализированы причины проявления магнитной анизотропии в моно- и поликристаллических ферромагнитных материалах, а также сущность магнитокристаллической анизотропии. Рассмотрена формула в виде ряда для определения внутренней энергии в ферромагнитных металлах различной симметрии. Ряд составлен с помощью  $\sin\theta$ , где  $\theta$  представляет угол между гексагональной осью и вектором намагничивания. Рассмотрено также влияние фактора размагничивания на магнитную анизотропию и возможность оценки конфигурационной анизотропии.

\* \* \*

კომპიუტერული უზრუნველყოფა:

გ. სურგულაძე, ე. თურქია, გ. ნარემულაშვილი,  
ხ. ქრისტესიაშვილი, გ. მისურაძე, გ. დალაქიშვილი

გადაეცა წარმოებას 10.12.2018 წ. ქალაქის ზომა 60X84 1/8. პირობითი ნაბეჭდი  
თაბახი 11,5. სააღრიცხვო-საგამომცემლო თაბახი 11. ტირაჟი 100 ეგზ.  
იბეჭდება ავტორთა ხარჯით.

სტუ-ს „IT-კონსალტინგის სამეცნიერო ცენტრი“, თბილისი,  
კოსტავას 77

---