

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT KHOA CƠ - ĐIỆN

HỘI NGHỊ KHOA HỌC TOÀN QUỐC VỀ CƠ KHÍ - ĐIỆN - TỰ ĐỘNG HÓA

*National Conference on Mechanical, Electrical, Automation Engineering
(MEAE2025)*



NHÀ XUẤT BẢN GIAO THÔNG VẬN TẢI

TRƯỜNG ĐẠI HỌC MỎ - ĐỊA CHẤT

KHOA CƠ - ĐIỆN

HỘI NGHỊ KHOA HỌC TOÀN QUỐC VỀ
CƠ KHÍ - ĐIỆN - TỰ ĐỘNG HÓA

*National Conference on Mechanical, Electrical, Automation
Engineering*

(MEAE2025)

VỚI CHỦ ĐỀ :

“CÔNG NGHỆ VÀ NĂNG LƯỢNG TÁI TẠO”

20. Điều khiển Hybrid kết hợp Fuzzy Logic và PID ổn định mức nước bao hơi - công ty cổ phần nhiệt điện Quảng Ninh	111
21. Thiết kế xây dựng mô hình máy xét nghiệm sinh hóa ứng dụng quang phổ kế.....	119
22. Xây dựng hệ thống thu thập và phân tích dữ liệu động học của con lắc vật lý trong thời gian thực phục vụ giáo dục STEM	127
23. Đề xuất một dòng bộ biến đổi DC-DC mới cho các ứng dụng năng lượng tái tạo	131
24. Khử từ do nhiệt trong động cơ điện IPM: tổng quan nghiên cứu và mô phỏng điện – nhiệt	137
25. Thiết kế, chế tạo mạch đo và giám sát tự động điện trở cách điện mạng điện hỗn hợp mô hình hầm lò	142
26. Công nghệ nén H264 và H265 trong hệ thống thông tin vô tuyến	147
27. Điều khiển phân bố công suất trong microgrid lai ghép DC/AC có tích hợp BESS	151
28. Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ xử lý từ nhiệt lên tích năng lượng từ cực đại $(BH)_{max}$ của hợp kim từ cứng ALNICUCO35TI5NB	161
29. Đánh giá độ chính xác hình học gia công bánh răng trụ răng thẳng bằng phương pháp cắt dây tia lửa điện EDM.....	170
30. Nghiên cứu lựa chọn thông số in và một số giải pháp nâng cao chất lượng sản phẩm trong máy in 3D FDM khổ rộng	175
31. Nghiên cứu các nguyên nhân gây ra rung động trong bơm ly tâm vận tải tro xỉ của nhà máy nhiệt điện và biện pháp khắc phục	180
32. Một số giải pháp cân bằng năng lượng cho tua bin gió có tốc độ gió phù hợp với tốc độ gió thấp tại Việt Nam.....	184
33. Nghiên cứu lực ma sát trong xy lanh khí nén không có cần piston	189
34. Đánh giá mức độ ảnh hưởng của tải trọng động đến khả năng làm việc của chi tiết máy dạng trục và xác định tần số dao động riêng của các chi tiết này.....	192
35. Phương pháp xác định vận tốc dòng khí sau quạt hướng trục.....	196
36. Tính toán, mô phỏng dòng chảy trong phần dẫn dòng máy bơm ly tâm cột nước thấp chạy bằng sức gió, phục vụ bơm nước biển cho sản xuất muối.....	202

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CHẾ ĐỘ XỬ LÝ TỪ NHIỆT LÊN TÍCH NĂNG LƯỢNG TỪ CỰC ĐẠI $(BH)_{MAX}$ CỦA HỢP KIM TỪ CỨNG ALNiCuCo35Ti5Nb

Trần Mạnh Tùng¹, Nguyễn Huynh¹, Nguyễn Văn Minh^{1,*}, Phạm Thị Thủy², Nguyễn Anh Tú²

¹Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng

²Bộ môn Kỹ thuật Cơ khí, Trường Đại học Mở - Địa chất

TÓM TẮT

Vật liệu từ cứng hệ Al-Ni-Co là lớp vật liệu quan trọng, được sử dụng trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật, công nghệ khác nhau. Trong số đó, đáng chú ý là hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb chiếm vị trí đặc biệt nhờ sự kết hợp của các đặc tính từ ổn định cao như lực kháng từ H_c , cảm ứng từ dư B_r lớn và tích năng lượng từ cực đại $(BH)_{max}$ cao. Nhờ đó, hợp kim trên được ứng dụng rộng rãi trong chế tạo các modul tích trữ năng lượng cho các thiết bị và dụng cụ điện tử chính xác cao trong lĩnh vực năng lượng, hàng không vũ trụ cũng như công nghiệp quốc phòng. Bài báo này trình bày ảnh hưởng của các chế độ xử lý từ nhiệt khác nhau lên các đặc tính từ và khả năng tích năng lượng từ cực đại của hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb lần đầu tiên được nghiên cứu chế tạo bằng công nghệ nấu đúc kết tinh định hướng với cơ sở trang thiết bị trong nước. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khi xử lý từ nhiệt đa cấp trong điều kiện làm nguội chậm ($8,3 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$) kết hợp với giữ đẳng nhiệt ($800 \text{ }^\circ\text{C}/15 \text{ phút}$) sẽ thu được tích năng lượng từ cực đại $(BH)_{max}$ tốt nhất cho vật liệu, đạt đến $72,4 \text{ kJ}/\text{m}^3$, đảm bảo chất lượng tương đương với vật liệu tiêu chuẩn LB Nga theo GOST 17809-72.

Từ khóa: Vật liệu từ cứng, Alnico, AlNiCuCo35Ti5Nb, năng lượng từ cực đại, xử lý từ nhiệt, kết tinh định hướng

1. Mở đầu

Vật liệu từ cứng hệ Al-Ni-Co (Alnico) từ lâu đã được xem là một trong những nhóm hợp kim nam châm vĩnh cửu quan trọng nhất nhờ sự kết hợp độc đáo giữa từ tính ổn định, khả năng chịu nhiệt, kháng oxy hóa tốt và độ bền hóa học. Trong nhiều thập kỷ, các hợp kim này vẫn giữ vai trò then chốt trong chế tạo nam châm công nghiệp, ứng dụng rộng rãi trong động cơ điện, thiết bị đo lường, cảm biến, hàng không - vũ trụ, y sinh và lĩnh vực năng lượng cũng như ngành công nghiệp quốc phòng [1, 2]. Điểm đặc trưng của Alnico là cơ chế tách spinodal (spinodal decomposition) trong quá trình xử lý nhiệt, dẫn đến sự hình thành vi cấu trúc gồm pha giàu Fe-Co từ tính mạnh và pha giàu Al-Ni không từ tính, cho phép kiểm soát tốt các tính chất từ học [1-3].

Trong số các biến thể hợp kim Alnico, nhóm hợp kim bốn thành phần Al-Ni-Cu-Co (AlNiCuCo) - được biết đến ở Nga dưới tên thương mại IOHDK - được quan tâm đặc biệt nhờ khả năng duy trì ổn định từ tính, đồng thời có thể cải thiện tính chất nhờ bổ sung nguyên tố hợp kim như titan (Ti) và niobi (Nb). Sự có mặt của

các nguyên tố này giúp ổn định cấu trúc vi mô, kiểm soát quá trình phân tách spinodal, tạo ra pha sắt từ α_1 dạng thanh nano (giàu Fe-Co, từ tính mạnh) định hướng trong pha nền thuận từ α_2 (giàu Al-Ni-Cu-Ti, từ tính yếu), từ đó nâng cao độ bền từ trường cưỡng bức cũng như tính bền nhiệt [4-8]. Đặc biệt, hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb (tương đương với hợp kim IOHDK35T5BA (IOHDKT5BA) của LB Nga, thành phần gần với Alnico 8, Alnico 9) nổi bật bởi sự kết hợp tối ưu giữa lực kháng từ H_c , cảm ứng từ dư B_r và tích năng lượng từ cực đại $(BH)_{max}$ - một đặc tính từ học quyết định giá trị của vật liệu trong các ứng dụng tích trữ năng lượng từ.

Để đạt được những đặc tính từ học tối ưu, không chỉ thành phần hợp kim mà quy trình công nghệ - đặc biệt là xử lý nhiệt và xử lý từ nhiệt (XLTN) - có ý nghĩa quyết định. Trong những năm gần đây, nhiều hướng nghiên cứu đã tập trung vào tối ưu hóa tính chất của Alnico thông qua các kỹ thuật hiện đại như kết tinh định hướng, xử lý trong từ trường ngoài hoặc áp lực cơ học khi ủ, nhằm tinh chỉnh hình thái cột pha từ giàu Fe-Co, giảm khuyết tật và nâng cao tính

đồng nhất cấu trúc [7, 8]. Trong đó, chế độ nhiệt – từ được chứng minh là yếu tố then chốt quyết định đến sự phát triển miền từ và nâng cao $(BH)_{max}$ [9, 10].

Tuy nhiên, mặc dù đã có nhiều thành tựu, cơ chế vi mô và ảnh hưởng cụ thể của chế độ xử lý từ nhiệt lên sự phát triển cấu trúc spinodal trong nhiều hợp kim hệ Alnico vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ và hệ thống.

Ngoài ra, các nghiên cứu gần đây còn cho thấy xu hướng phát triển vật liệu từ không chứa đất hiếm nhằm thay thế hoặc bổ trợ cho nam châm Nd-Fe-B và Sm-Co trong các lĩnh vực nhạy cảm về tài nguyên và địa chính trị, càng khẳng định tính thời sự của các nghiên cứu về các hợp kim từ cứng hệ Alnico [11, 12, 13].

Ở Việt Nam, các nghiên cứu về hợp kim Alnico chủ yếu tập trung vào công nghệ đúc truyền thống và đặc tính cơ bản, các công trình thực hiện việc nấu luyện kết tinh có định hướng và xử lý từ-nhiệt rất hạn chế, trong đó chưa có công bố nào về nghiên cứu chế tạo, xử lý từ nhiệt đối với hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb. Điều này tạo ra khoảng trống khoa học và công nghệ, đồng thời cũng mở ra cơ hội cho việc nội địa hóa công nghệ chế tạo nam châm Alnico cao cấp phục vụ nhu cầu quốc phòng, năng lượng và công nghiệp chế tạo.

Việc phát triển công nghệ nấu đúc, xử lý từ nhiệt không chỉ giúp nội địa hóa sản xuất vật liệu từ cứng chất lượng cao, giảm phụ thuộc vào nhập khẩu, mà còn nâng cao tiềm năng sáng tạo và năng lực công nghiệp trong lĩnh vực vật liệu từ.

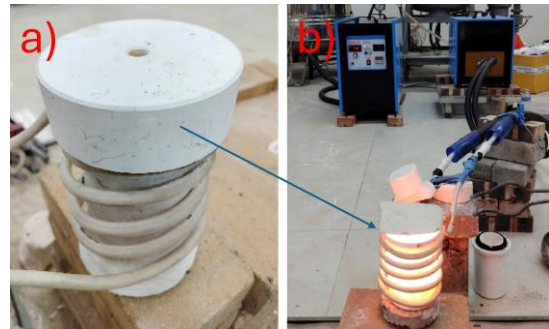
Trên cơ sở đó, nghiên cứu này hướng đến mục tiêu:

- Khảo sát ảnh hưởng của các chế độ xử lý từ nhiệt đến đặc tính từ học, đặc biệt là $(BH)_{max}$, của hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb.
- Xác định điều kiện tối ưu nhằm nâng cao các thông số từ tính H_c , B_r , $(BH)_{max}$, góp phần bổ sung cơ sở dữ liệu khoa học cho chế tạo vật liệu từ cứng không đất hiếm.

Việc làm sáng tỏ mối liên hệ giữa các chế độ xử lý từ nhiệt với $(BH)_{max}$ của hợp kim Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb có ý nghĩa cả về lý thuyết lẫn ứng dụng. Kết quả nghiên cứu sẽ đóng góp vào sự phát triển công nghệ vật liệu từ ở Việt Nam, đồng thời có ý nghĩa thực tiễn trong việc chế tạo và ứng dụng các chi tiết từ hoạt động trong điều kiện nhiệt độ cao, môi trường khắc nghiệt mà các vật liệu khác khó thay thế.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

Mẫu vật liệu từ cứng hợp kim Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb được chế tạo bằng phương pháp nấu đúc kết tinh định hướng, sử dụng lò cảm ứng cao tần PL70M1 (Phước Lộc, Việt Nam). Trong quá trình này, hợp kim được nấu chảy và hợp kim hoá trong nồi lò làm từ gốm Al_2O_3 thiêu kết. Quá trình nung chảy diễn ra dưới tác động của cảm ứng điện từ khi có dòng điện cao tần chạy trong vòng cảm bao quanh nồi lò (Hình 1).



Hình 1. Trang bị công nghệ nấu luyện hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb: a) Nồi lò nấu luyện làm từ gốm Al_2O_3 thiêu kết; b) Hệ thống thiết bị nấu luyện cao tần PL70M1.

Nhờ đó, vật liệu được gia nhiệt đồng đều và đạt trạng thái kim loại lỏng ổn định trước khi đúc. Tổng thể quy trình công nghệ chế tạo mẫu vật liệu từ cứng Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb được thực hiện theo các bước chính sau:

- 1) Lựa chọn nguyên liệu đầu vào, phối liệu, đảm bảo khối lượng mỗi mẻ đạt 1,5 kg;
- 2) Nấu luyện hợp kim trong lò cao tần (nấu chảy, hợp kim hoá, tinh luyện);
- 3) Đúc kết tinh định hướng;
- 4) Xử lý từ nhiệt.

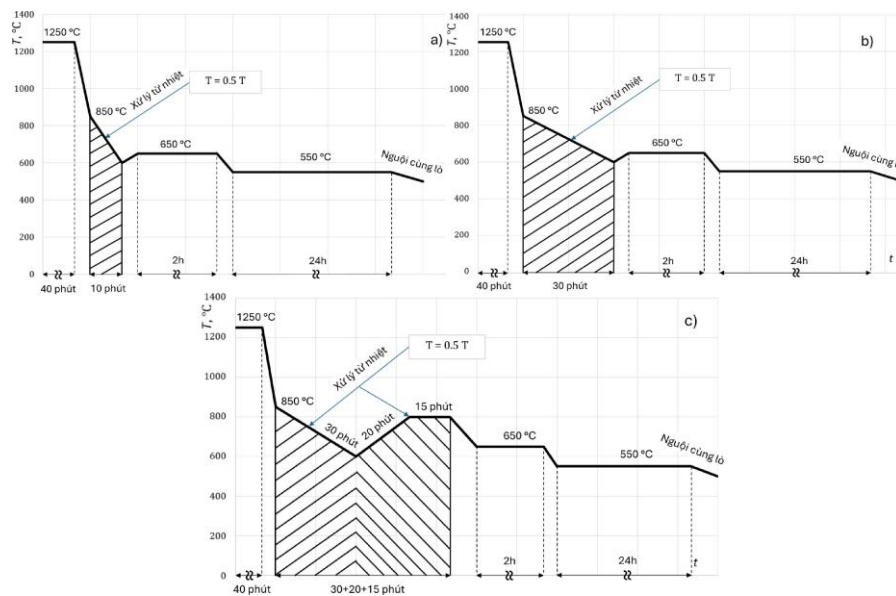
Nguyên liệu ban đầu dùng cho nấu luyện là các kim loại sạch: Fe, Al, Ni, Cu, Co, Ti và Nb cùng một số phụ gia chuyên dụng. Trong quá trình nấu luyện, nồi lò được đẩy nắp và bơm cấp khí Ar bảo vệ theo định kỳ sau mỗi 5 phút. Sử dụng khí Ar nhằm mục đích hạn chế oxy hóa bề mặt kim loại lỏng, phù hợp chế độ công nghệ nấu bán hờ.

Kim loại lỏng được tinh luyện bằng xỉ chuyên dụng (50% CaO, 10% MgO, 15% SiO_2 , 10% Al_2O_3 , còn lại là CaF_2 và chất trợ dung Borax). Sau khi hoàn tất hợp kim hoá, nhiệt độ kim loại lỏng được giữ ổn định ở 1700 ± 20 °C, theo dõi bằng hoá quang kế, trước khi tiến hành đúc rót.

Quá trình đúc các mẫu phối được thực hiện bằng công nghệ đúc kết tinh định hướng, sử dụng khuôn gốm hình trụ (kích thước lòng trong

Ø50x120 mm) được nung đến 1450±20 °C bằng vòng cảm ứng trên thiết bị lò nung cao tần. Khuôn có đáy hở, đặt lên một đế đồng được làm mát liên tục bằng nước tuần hoàn (nhiệt độ đầu vào ≤ 25°C). Sau khi rót kim loại lỏng, vòng cảm ứng bên ngoài khuôn được nâng dần lên với tốc độ 2 mm/phút. Nhờ đó, mặt kết tinh dịch chuyển theo phương thẳng đứng từ đáy lên đỉnh khuôn, tạo ra cấu trúc kết tinh định hướng cho hợp kim. Mẫu đúc được làm nguội tự nhiên đến nhiệt độ phòng, sau đó tiến hành cắt, chia thành các mẫu

phục vụ nghiên cứu. Một mẫu được dùng để phân tích thành phần hóa học. Các mẫu còn lại đem đi xử lý từ nhiệt theo 3 chế độ khác nhau (Hình 2). Các thông số nhiệt độ, thời gian, cảm ứng từ trường ngoài được lựa chọn dựa trên phân tích, đánh giá các số liệu thực nghiệm, tham khảo các nghiên cứu điển hình về vật liệu từ cứng Alnico có hợp kim hoá thêm bằng Cu, Ti và Nb [8-10, 14-16].



a) chế độ 1: XLTN làm nguội nhanh ($v \sim 25,0 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$); b) chế độ 2: XLTN làm nguội chậm ($v \sim 8,3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$); c) chế độ 3: XLTN làm nguội chậm ($v \sim 8,3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$) kết hợp giữ đẳng nhiệt (800 °C 15 phút)

Hình 2. Sơ đồ 3 chế độ nhiệt luyện điển hình áp dụng cho mẫu vật liệu hợp kim từ cứng Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb.

Các chế độ nhiệt luyện được áp dụng bao gồm 3 giai đoạn chính là Ủ đồng nhất ở nhiệt độ cao, Xử lý từ nhiệt và Ram không áp từ. Ủ đồng nhất được tiến hành nhằm mục đích tái phân bố các nguyên tố hợp kim, giảm thiên tích thành phần và loại bỏ sự không đồng đều vi mô trước khi xử lý từ nhiệt, giúp vật liệu đạt trạng thái ổn định ban đầu để hình thành cấu trúc phân tách spinodal tối ưu). Giai đoạn ram sau khi xử lý từ nhiệt giúp ổn định cấu trúc spinodal, giảm ứng suất dư và tinh chỉnh vi cấu trúc, từ đó ổn định các thông số từ tính như H_c và B_r , cũng như đảm bảo vật liệu đạt được trạng thái cơ lý bền vững.

Ở giai đoạn Ủ đồng nhất, tất cả các mẫu đều được nung lên 1250 °C (tốc độ nung 3 °C/min), giữ ổn định trong 40 phút, sau đó hạ xuống ngưỡng 850 °C bằng cách nhúng vào và ngâm trong bể thiếc lỏng (thiếc kim loại nấu chảy, giữ ở

nhiệt độ 850 °C) khoảng 5 phút trước khi chuyển sang giai đoạn Xử lý từ nhiệt.

Giai đoạn Xử lý từ nhiệt tiến hành theo 03 chế độ phân biệt như sau:

+) **Chế độ 1:** Xử lý từ nhiệt đơn cấp trong điều kiện làm nguội nhanh từ 850 đến 600 °C trong 10 phút (tốc độ làm nguội $v \sim 25,0 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$).

+) **Chế độ 2:** Xử lý từ nhiệt đơn cấp trong điều kiện làm nguội chậm từ 850 đến 600 °C trong 30 phút (tốc độ làm nguội $v \sim 8,3 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{min}$).

+) **Chế độ 3:** Xử lý từ nhiệt đa cấp trong điều kiện làm nguội chậm như Chế độ 2 kết hợp với nâng và giữ đẳng nhiệt ở 800 °C trong 15 phút.



Hình 3. Ảnh thiết bị áp từ VCN-01 tích hợp lò nung xử lý từ nhiệt kèm theo.

Xử lý từ nhiệt được tiến hành trên thiết bị áp từ VCN-01 (VCN, Việt Nam), tích hợp hệ thống lò nung nhiệt (sai số nhiệt độ $\pm 5\text{ }^\circ\text{C}$) kèm theo (Hình 3). Giá trị cảm ứng từ tạo ra giữa hai cực từ được thiết lập ở mức là $B_n = 0,5\text{ T}$ (tương đương mức cường độ từ trường $H_n = 398\text{ kA/m}$).

Giai đoạn Ram không áp từ được tiến hành ngay sau giai đoạn Xử lý từ nhiệt, áp dụng giống nhau về thông số nhiệt độ/thời gian đối với tất cả các mẫu (xem Hình 2: Giữ đẳng nhiệt ở $650\text{ }^\circ\text{C}$ trong 2h, hạ nhiệt độ xuống $550\text{ }^\circ\text{C}$, giữ đẳng nhiệt ở $550\text{ }^\circ\text{C}$ trong 24h). Các bước nâng/ hạ nhiệt trong giai đoạn Ram không áp từ thực hiện với tốc độ $10^\circ\text{C}/\text{phút}$.

Ủ đồng nhất nhiệt độ cao và Ram không áp từ thực hiện trên thiết bị lò ống RHTC 80-450/15 (Nabertherm, Đức) trong điều kiện có dòng khí Ar bảo vệ liên tục được thổi qua ống lò.

Các mẫu vật liệu sau khi được xử lý từ nhiệt được gia công thành mẫu chuẩn và đem đi nghiên cứu khảo sát các đặc trưng tính chất từ gồm các thông số: lực kháng từ (H_c), cảm ứng từ dư (B_r) lớn và tích năng lượng từ cực đại (BH)_{max}.

Thành phần nguyên tố hợp kim của mẫu phôi đúc vật liệu từ cứng Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb được kiểm tra bằng phương pháp Phổ tán sắc năng lượng tia X (EDS) trên thiết bị JSM 6490 - JED 2300 (JEOL, Nhật Bản).

Đặc trưng từ tính của vật liệu được khảo sát trên hệ thống đo từ trường xung TQV101 (VAST, Việt Nam).

3. Nội dung và kết quả đạt được

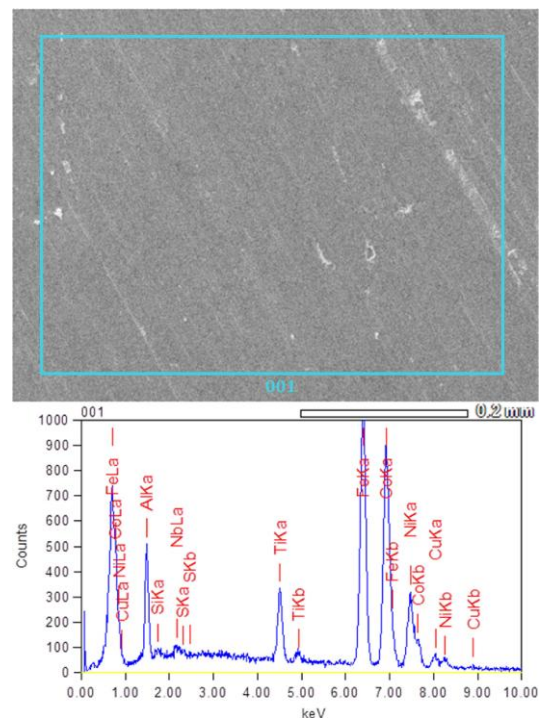
Hình ảnh mẫu vật liệu hợp kim từ cứng Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb thu được bằng công nghệ nấu đúc kết tinh định hướng được trình bày ở Hình 4. Dưới tác động của gradient nhiệt lớn (phần đáy phôi tiếp xúc trực tiếp với đế đồng làm mát, trong khi phần trên được nung cảm ứng và duy trì ở

hiệt độ cao hơn), quá trình kết tinh xảy ra dọc theo phương thẳng đứng từ dưới lên trên. Kết quả là các tinh thể dạng cột phát triển song song với trục của phôi trụ.



Hình 4. Ảnh mẫu phôi hợp kim Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb thu được bằng công nghệ đúc kết tinh định hướng.

Theo cơ sở lý thuyết, hướng phát triển này tương ứng với phương từ hóa dễ nhất (easy magnetization direction) của pha trật tự trong hợp kim Alnico [17–20]. Việc đạt được cấu trúc cột định hướng có ý nghĩa quyết định đối với tính chất từ cứng, bởi vì dị hướng từ tính của vật liệu phụ thuộc trực tiếp vào định hướng mạng tinh thể. Chính vì vậy, khi tiến hành xử lý từ nhiệt, việc lựa chọn hướng áp từ trùng với trục dọc của phôi trụ (tức trục kết tinh định hướng khi đúc) sẽ đảm bảo tạo được dị hướng từ tính tối ưu, nhờ đó cải thiện đáng kể các thông số từ quan trọng của vật liệu như lực kháng từ H_c , từ dư B_r và tích năng lượng cực đại (BH)_{max}.



Hình 5. Phổ SEM-EDX của mẫu phôi đúc hợp kim từ cứng AlNiCuCo35Ti5Nb.

Kết quả phân tích thành phần hóa học của mẫu phôi đúc hợp kim từ cứng AlNiCuCo35Ti5Nb bằng phương pháp phổ tán sắc năng lượng tia X (EDX) kết hợp với chụp ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) được trình bày trong Hình 5. Hàm lượng cụ thể của các nguyên tố hợp kim trong mẫu phôi đúc hợp kim từ cứng Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb được phân tích định lượng theo các Phổ EDS thu được, kết quả trình bày trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học mẫu phôi hợp kim từ cứng Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb chế tạo bằng phương pháp đúc kết tinh định hướng.

Nguyên tố	Al	Ni	Co	Ti	Nb
%	6,6	14,4	35,5	4,7	0,94
		S	Si	Cu	Fe
	0,12	0,16	3,1	Còn lại	

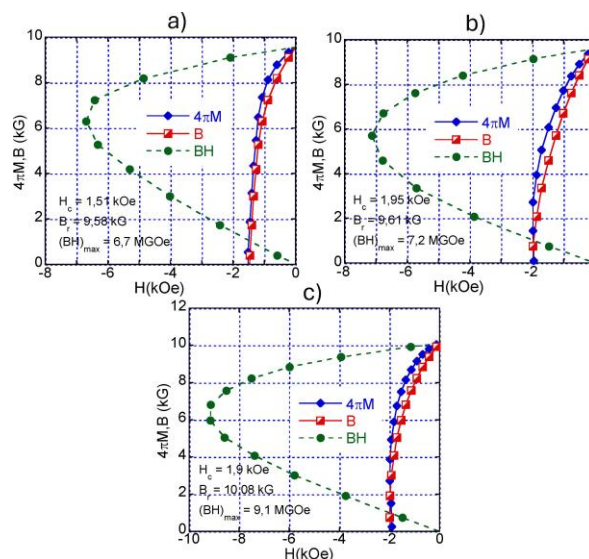
Phổ EDX cho thấy mẫu vật liệu đúc thu được có đầy đủ thành phần hợp kim theo phối liệu, bao gồm Al, Ni, Co, Cu, Ti và Nb, cùng với nền Fe. Cường độ các peak phổ EDX tỷ lệ thuận với hàm lượng nguyên tố trong hợp kim, phản ánh sự hiện diện đồng đều và phù hợp với công thức hợp kim đã lựa chọn.

So với phối liệu ban đầu, thành phần nguyên tố trong mẫu đúc thu được khá ổn định: Co chiếm 35,5%, Ni ~14,4%, Al ~6,6%, Cu ~3,1%, Ti ~4,7% và Nb ~0,94%; phần còn lại chủ yếu là Fe. Ngoài ra, phổ EDX cho thấy sự xuất hiện các peak (cường độ thấp) tương ứng với các nguyên tố phụ như Si, S. Tuy nhiên các nguyên tố này chỉ xuất hiện ở mức vết ($\leq 0,2\%$), không gây ảnh hưởng đáng kể đến tổ chức và tính chất của hợp kim.

Phương pháp phân tích phổ EDS thực hiện kết hợp với chụp ảnh SEM (hiển vi điện tử quét) (xem Hình 5). Kết quả khảo sát cho thấy vật liệu có cấu trúc đặc sít cao, trong tổ chức đúc không xuất hiện các khuyết tật nghiêm trọng như tách lớp, rỗ xốp hay ngậm xỉ. Đây là cơ sở quan trọng khẳng định quá trình nấu luyện - đúc kết tinh định hướng đã đảm bảo chất lượng tổ chức kim loại, tạo tiền đề để thu được các đặc trưng cơ lý và từ tính đạt yêu cầu trong các bước xử lý tiếp theo.

Kết quả khảo sát đặc trưng từ tính của mẫu phôi đúc hợp kim Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb trong sự phụ thuộc vào các chế độ xử lý từ nhiệt thể hiện trên Hình 6. Tổng hợp số liệu các thông số từ H_c , B_r và $(BH)_{max}$ của vật liệu tương ứng với 3 chế độ xử lý từ nhiệt được trình bày trong Bảng 2.

Các đường đặc trưng từ cho thấy sự thay đổi của các thông số từ tùy thuộc vào chế độ xử lý từ nhiệt được áp dụng.



a) chế độ 1; b) chế độ 2; c) chế độ 3

Hình 6. Các đường đặc trưng từ của mẫu phôi đúc hợp kim từ cứng AlNiCuCo35Ti5Nb tương ứng với 3 chế độ xử lý từ nhiệt.

Bảng 2. Giá trị các thông số từ của mẫu phôi đúc hợp kim từ cứng AlNiCuCo35Ti5Nb tương ứng với 3 chế độ xử lý từ nhiệt.

TT	Chế độ XLTN	Thông số từ		
		H_c (kA/m)	B_r (T)	$(BH)_{max}$ (kJ/m ³)
1	Chế độ 1	120	0,96	53,3
2	Chế độ 2	155	0,96	57,3
3	Chế độ 3	151	1,01	72,4

Có thể quan sát thấy rằng cả ba mẫu đều biểu hiện rõ tính chất từ cứng đặc trưng với vòng trễ khép kín, độ dốc ban đầu cao và duy trì được cảm ứng từ dư đáng kể sau khi loại bỏ từ trường ngoài.

Ở chế độ 1, vòng trễ có dạng hẹp hơn so với hai chế độ còn lại, lực kháng từ xác định từ giao điểm trên trục hoành đạt giá trị $H_c = 1,51$ kOe (~ 120 kA/m), trong khi cảm ứng từ dư khoảng $B_r = 9,58$ kG ($\sim 0,96$ T). Tích năng lượng cực đại của mẫu ở chế độ này đạt $(BH)_{max} = 6,7$ MGOe ($\sim 53,3$ kJ/m³).

Ở chế độ 2, đường cong từ trễ có độ mở rộng theo trục hoành lớn hơn, cho thấy lực kháng từ được cải thiện rõ rệt. Giá trị H_c đạt 1,95 kOe (~ 155 kA/m), cao nhất trong ba chế độ khảo sát, trong khi B_r vẫn giữ ở mức tương đương với chế độ 1 ($\sim 0,96$ T). Tích năng lượng cực đại $(BH)_{max}$ cũng tăng nhẹ, đạt 7,2 MGOe ($\sim 57,3$ kJ/m³).

Ở chế độ 3, vòng trễ có dạng đặc trưng của vật liệu từ cứng chất lượng cao, thể hiện sự kết hợp giữa lực kháng từ cao và cảm ứng từ dư lớn. Giá trị H_c đạt 1,9 kOe (~ 151 kA/m), gần với chế độ 2, nhưng cảm ứng từ dư tăng lên đến $B_r = 10,08$ kG ($\sim 1,01$ T). Nhờ vậy, tích năng lượng cực đại $(BH)_{max}$ tăng rõ rệt, đạt 9.1 MGOe ($\sim 72,4$ kJ/m³) – cao nhất trong ba chế độ xử lý từ nhiệt. Các thông số từ tính của mẫu vật liệu được xử lý từ nhiệt theo chế độ 3 đảm bảo yêu cầu kỹ thuật theo Tiêu chuẩn GOST 17809-72.

4. Thảo luận

Kết quả phân tích định lượng xác định hàm lượng các nguyên tố hợp kim trong mẫu đúc hợp kim từ cứng Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb bằng phương pháp EDS (xem Bảng 2) cho thấy vật liệu thu được có thành phần hoàn toàn tương đương với hợp kim ЮНДК35Т5ВА (ЮНДКТ5ВА) của LB Nga, đáp ứng yêu cầu quy định trong Tiêu chuẩn GOST 17809-72 [21]. Điều này chứng tỏ công nghệ nấu luyện bán hở kết hợp đúc kết tinh định hướng đã cho phép chế tạo thành công các

vật liệu có thành phần hợp kim ổn định, đạt yêu cầu so với sản phẩm ngoại nhập.

Hàm lượng các nguyên tố hợp kim chính Co, Ni nằm sát giới hạn trên, Al và Cu nằm gần mức dưới theo tiêu chuẩn, tuy nhiên thành phần các nguyên tố này vẫn đảm bảo trong khoảng giới hạn cho phép, do đó đảm bảo được tính ổn định của các hợp kim. Sự phân bố này có thể mang ý nghĩa nhất định đối với quá trình hình thành và ổn định pha: hàm lượng Co và Ni cao giúp tăng độ bão hòa từ và cảm ứng từ dư, trong khi mức Al và Cu thấp hơn góp phần kiểm soát quá trình phân tách spinodal α_1/α_2 , từ đó ảnh hưởng đến dị hướng từ của vật liệu.

Sự xuất hiện của các peak cường độ thấp trong phổ EDS, tương ứng với các nguyên tố vi lượng silic (Si) và lưu huỳnh (S), phản ánh sự hiện diện của chúng ở hàm lượng rất nhỏ trong hợp kim. Các nguyên tố này đã được tính toán phối liệu để khống chế hàm lượng nằm trong giới hạn cho phép. Trên thực tế đây là các nguyên tố vi lượng cần thiết đối với nhiều loại hợp kim từ cứng truyền thống. Các nghiên cứu trước đây cho thấy Si ở mức vết có thể tham gia tinh chỉnh cấu trúc đúc, góp phần ổn định quá trình phân tách spinodal α_1/α_2 trong một số loại hợp kim từ cứng, nhờ đó có tác động tích cực đến tính chất từ thu được [22, 23]. Đối với S, mặc dù thường được coi là tạp chất không mong muốn, song ở hàm lượng rất nhỏ ($\approx 0,1\%$) S có thể tồn tại dưới dạng sulfide phân tán mịn, không làm suy giảm đáng kể tính chất từ trong khi còn có tác dụng hạn chế sự hình thành khuyết tật đúc lớn, chủ yếu là các khối kết tụ từ tạp chất vô cơ. Nhờ đó, một hàm lượng nhỏ S trong hợp kim từ cứng có thể cải thiện tính công nghệ của vật liệu, giảm thiểu sự gãy vỡ khi gia công do khuyết tật cấu trúc [24]. Như vậy, sự hiện diện của Si và S trong mẫu ở mức vi lượng là chấp nhận được, nằm trong giới hạn kiểm soát và không ảnh hưởng tới việc đáp ứng tiêu chuẩn thành phần của hợp kim, đồng thời vẫn có thể mang lại một số tác động tích cực cho tổ chức cấu trúc và đặc tính của vật liệu thu được.

Kết quả khảo sát đặc trưng từ tính của các mẫu thử nghiệm phôi hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb thu được cho thấy các thông số từ của vật liệu thay đổi đáng kể theo chế độ XLTN (xem Bảng 2, Hình 6).

Ở chế độ 1 (làm nguội nhanh), quá trình phân tách spinodal giữa pha α_1 giàu Fe-Co và pha α_2 giàu Al-Ni chưa hoàn thiện do thời gian khuếch

tán hạn chế, dẫn đến thanh α_1 có kích thước nhỏ, kém biệt lập, làm giảm hiệu ứng dị hướng hình dạng đồng nghĩa với khả năng cản trở dịch chuyển domain từ yếu. Do đó, lực kháng từ chỉ đạt mức thấp $H_c = 120$ kA/m.

Khi chuyển sang chế độ 2 (làm nguội chậm), quá trình phân tách spinodal diễn ra đầy đủ hơn, kết quả thường dẫn đến việc hình thành hệ thanh α_1 có dạng rod-like, biệt lập rõ rệt trong ma trận α_2 , nhờ vậy giá trị lực kháng từ H_c tăng lên 155 kA/m – cao nhất trong ba chế độ, phù hợp với cơ chế kháng từ dựa trên sự cô lập domain và dị hướng hình dạng [14]. Tuy nhiên, giá trị từ dư B_r vẫn giữ giá trị gần như không đổi (0,96 T) do tổng thể tích pha α_1 không thay đổi nhiều. Nói cách khác, sự khác biệt về động học tách pha chủ yếu ảnh hưởng đến lực kháng từ (H_c), chứ không ảnh hưởng nhiều đến từ dư (B_r).

Đáng chú ý, chế độ 3 (làm nguội chậm kết hợp giữ đẳng nhiệt ở 800 °C trong từ trường ngoài) đã cho kết quả tối ưu nhất: H_c duy trì ở mức cao (151 kA/m) trong khi B_r tăng lên 1,01 T, nhờ đó $(BH)_{\max}$ đạt 72,4 kJ/m³ – cao hơn hẳn so với hai chế độ còn lại. Sự cải thiện này có thể giải thích bởi trong giai đoạn giữ đẳng nhiệt dưới tác dụng của từ trường ngoài, tính đồng nhất trong xu hướng định hướng của các thanh α_1 song song so với hướng từ trường ngoài tăng lên, làm cho nhiều moment từ định hướng đồng trục hơn trong khi hình thái của chúng tiếp tục được tối ưu hóa. Chính sự kết hợp này đã dẫn tới sự tăng giá trị từ dư B_r (từ 0,96 T lên 1,01 T). Đồng thời do có Cu trong thành phần hợp kim, dẫn đến khả năng hình thành và phân bố các cụm Cu ở biên pha góp phần tăng cường mức độ cô lập giữa các thanh α_1 , qua đó vẫn ổn định khả năng cản trở sự dịch chuyển (xoay) của các domain từ như chế độ 2. Như vậy, chế độ 3 không chỉ duy trì lực kháng từ cao mà còn gia tăng đáng kể cảm ứng từ dư, đưa đến giá trị $(BH)_{\max}$ tối ưu. Các quan sát này phù hợp với những nghiên cứu trước chứng tỏ ảnh hưởng tích cực của xử lý từ nhiệt và giữ đẳng nhiệt có trường ngoài đối với vi cấu trúc và tính chất từ của hợp kim Alnico định hướng, đặc biệt là đại lượng tích năng lượng cực đại $(BH)_{\max}$ [2, 14, 25, 26]. Một số công bố gần đây cho thấy sự cải tiến đáng kể về mật độ năng lượng từ cực đại nhờ điều chỉnh các thông số xử lý nhiệt, chẳng hạn như nhiệt độ nung lại, tốc độ làm nguội và cường độ từ trường ngoài [6, 10]. Quá trình xử lý từ nhiệt không chỉ điều khiển kích thước và sự phân bố thanh α_1 , mà còn giúp định hướng cấu

trúc theo hướng của từ trường ngoài, tạo nên trạng thái "từ cứng định hướng" có giá trị $(BH)_{\max}$ cao nhất [13, 14, 27]. Nghiên cứu này tiếp tục củng cố luận điểm này đối với hợp kim từ cứng AlNiCuCo35Ti5Nb: khi hợp kim Alnico được xử lý nhiệt trong vùng tách spinodal, sự hình thành và định hướng của thanh α_1 dưới tác dụng của từ trường ngoài đóng vai trò chủ đạo trong việc nâng cao H_c , B_r và $(BH)_{\max}$.

Như vậy, kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy các thông số từ chính của hợp kim từ cứng AlNiCuCo35Ti5Nb phụ thuộc mạnh vào chế độ xử lý từ nhiệt. Hình dạng và diện tích vòng trễ phản ánh trực tiếp sự thay đổi của các giá trị H_c , B_r và $(BH)_{\max}$, đồng thời khẳng định vai trò quyết định của chế độ xử lý từ nhiệt trong việc điều chỉnh tính chất từ cứng của vật liệu.

5. Kết luận

Trong nghiên cứu này, lần đầu tiên tại Việt Nam, hợp kim từ cứng Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb đã được nghiên cứu, chế tạo thành công bằng công nghệ nấu đúc kết tinh định hướng (kết hợp nấu luyện bán hờ và đúc kết tinh định hướng) và xử lý từ nhiệt, hoàn toàn sử dụng trang thiết bị và công nghệ trong nước. Kết quả cho thấy vật liệu thu được có thành phần và chất lượng tương đương với hợp kim ЮНДК35Т5ВА (ЮНДКТ5ВА) của LB Nga theo Tiêu chuẩn GOST 17809-72.

Đã lựa chọn được công nghệ xử lý từ nhiệt tối ưu, đó là xử lý đa cấp trong điều kiện làm nguội chậm kết hợp với giữ đẳng nhiệt trong từ trường ngoài. Với công nghệ này, mẫu hợp kim Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb thu được có đặc trưng từ tính ở mức cao, trong đó tích năng lượng từ cực đại $(BH)_{\max}$ đạt 72,4 kJ/m³ – tương đương với các giá trị của vật liệu nhập ngoại.

Các kết quả nghiên cứu thu được khẳng định khả năng làm chủ công nghệ chế tạo hợp kim từ cứng tiên tiến trong nước, đồng thời mở ra triển vọng ứng dụng trong nghiên cứu, sản xuất và phát triển các lớp vật liệu từ hiện đại phục vụ nhiều lĩnh vực khoa học – kỹ thuật, đặc biệt là hàng không, điện tử và công nghiệp quốc phòng.

Lời cảm ơn

Nhóm tác giả xin trân trọng cảm ơn Viện Công nghệ/TCCNQP đã hỗ trợ điều kiện trang thiết bị thí nghiệm cho nghiên cứu này. Chúng tôi cũng xin cảm ơn các đồng nghiệp tại HUMG đã hỗ trợ

kỹ thuật và hợp tác trong quá trình thực hiện nghiên cứu.

Đóng góp của các tác giả

Trần Mạnh Tùng: Thiết kế thí nghiệm, thực hiện thí nghiệm, phân tích kết quả, tham gia biên tập bản thảo. **Nguyễn Huynh:** Thực hiện thí nghiệm, phân tích kết quả, tham gia biên tập bản thảo. **Nguyễn Văn Minh:** Thực hiện thí nghiệm, phân tích kết quả, viết bản thảo. **Phạm Thị Thủy:** Phân tích kết quả, tham gia biên tập bản thảo. **Nguyễn Anh Tú:** Hiệu chuẩn thiết bị, thực hiện thí nghiệm.

Tài liệu tham khảo

1. Iwama, Y., Takeuchi, M., (1974). Spinodal decomposition in Alnico 8 magnet alloy. *Transactions of the Japan Institute of Metals* 15, 371–377.
2. Zhou, L., et al., (2018). On spinodal decomposition in alnico – A transmission electron microscopy and atom probe tomography study. *Acta Materialia* 153, 15–22.
3. Zhao, Z., Zhao, J., Wang, M., Sun, Y., Xia, W., Chao, Z., Li, S., Chen, R., Yan, A., Jiang, L., (2024). Effect of spinodal decomposition structure of AlNiCo alloy on magnetic viscosity and magnetization reversal. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 586, 171284.
4. Samolyuk, G. D., Ujfalussy, B., Stocks, G. M., (2014). The distribution of alloying elements in Alnico 8 and 9 magnets: Site preference of ternary Ti, Fe, Co and Ni additions in DO3 Fe3Al, Co3Al and Ni3Al based intermetallic phases. *Journal of Applied Physics* 116(17), 173908.
5. Kuzmin, M., et al., (1981). The influence of niobium on the magnetic properties of the columnar Alnico magnet. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 23(3), 335–338.
6. Rehman, S. U., et al., (2025). Optimization of an isotropic Alnico 8 alloy. *Journal of Alloys and Compounds* 1010, 178142.
7. Zou, M., et al., (2016). Processing of Alnico permanent magnets by advanced directional solidification methods. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 420, 152–157.
8. Rinko, E. A., et al., (2022). Effects of tensile loading during annealing of Alnico melt-spun ribbons. *AIP Advances* 12(3), 035338.
9. Rehman, S. U., et al., (2021). Tailoring the microstructure, magnetic properties and interaction mechanisms of Alnico-Ta alloys by magnetic field treatment. *Journal of Alloys and Compounds* 857, 157586.
10. Liu, Z., Deng, Y., et al., (2025). Refining Alnico 8 magnets with composition optimization of matrix phase, directional solidification and magnetic field annealing. *Journal of Alloys and Compounds* 1006, 176329.
11. Kramer, M. J., et al., (2012). Prospects for non-rare earth permanent magnets for traction motors and generators. *JOM* 64, 752–763.
12. Li, D., Pan, D., Li, S., Zhang, Z., (2016). Recent developments of rare-earth-free hard-magnetic materials. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy* 59, 617501.
13. Sun, Y. L., et al., (2015). The phase and microstructure analysis of Alnico magnets with high coercivity. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 379, 58–62.
14. Zhou, L., et al., (2017). Microstructural and magnetic property evolution with different heat-treatment conditions in an Alnico alloy. *Acta Materialia* 133, 73–80.
15. McCurrie, R. A., (1982). The structure and properties of Alnico permanent magnet alloys. In: Wohlfarth, E. P. (Ed.), *Handbook of Ferromagnetic Materials*. Elsevier, Amsterdam, pp. 107–188.
16. Сергеев, В. В., Бульгина, Т. И., (1980). *Магнитотвёрдые материалы*. Энергия, Москва, 224 с.
17. Heidenreich, R. D., Nesbitt, E. A., (1952). Physical structure and magnetic anisotropy of Alnico 5. *Journal of Applied Physics* 23(3), 352–371.
18. Liu, Y., et al., (2025). Relationships between the grain orientation, spinodal structure, and magnetic properties of AlNiCo alloys. *Journal of Alloys and Compounds* 1010(5), 177275.
19. Rehman, S. U., et al., (2025). Service performance of directionally solidified Alnico 8 alloy. *Journal of Materials Research and Technology* 36, 7476–7484.
20. Zhou, M. J., (2025). Preparation of Alnico alloy with high magnetic properties by the two-

- phase composite method. *Journal of Alloys and Compounds* 1039, 183272.
21. GOST 17809-72, (1972). Casting hard magnetic materials. Marks. Standards Publishing House, Moscow.
22. Guo, P., et al., (2022). Effect of silicon content on microstructures and properties of directionally solidified Fe-B alloy. *Materials* 15(17), 5937.
23. Haider, A., Shi, J., Khan, A., Khan, M., (2022). Processing of silicon-added Fe-Cr-Co hard magnetic alloy by two stage thermomagnetic treatment technique. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 237(13), 2150–2159.
24. Gridnev, A. I., et al., (1977). Structure and nonmetallics in monocrystals of magnetic alloys doped with sulfur and carbon. Nauka, Moscow, pp. 86–88.
25. Han, X., et al., (2019). Effects of magnetic field and annealing on the structure and magnetic properties of Alnico ribbons. *Journal of Alloys and Compounds* 785, 715–724.
26. Rehman, S. U., et al., (2019). Microstructures and magnetic properties of cast Alnico 8 permanent magnets under various heat treatment conditions. *Physica B: Condensed Matter* 552, 136–141.
27. Kronmüller, H., Fähnle, M., (2003). *Micromagnetism and the Microstructure of Ferromagnetic Solids*. Cambridge University Press, Cambridge (UK), 432 pages.