

Enhancement of magnetic properties of AlNiCuCo35Ti5Nb alloy by magnetic heat treatment technology



Tung Manh Tran ¹, Huynh Nguyen ¹, Minh Van Nguyen ^{1,*}, Thuy Thi Pham ², Tu Anh Nguyen ²

¹ Institute of Technology, General Department of National Defence Industry, Hanoi, Vietnam

² Faculty of Electro-Mechanics, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 25th Dec. 2025

Revised 01st Apr. 2026

Accepted 20th Apr. 2026

Keywords:

Alnico,
AlNiCuCo35Ti5Nb,
Coercivity,
Magnetic heat treatment,
Remanence.

ABSTRACT

Hard magnetic materials of the Al-Ni-Co system represent an important class of functional materials, widely applied in various engineering and technological fields. Among them, the AlNiCuCo35Ti5Nb alloy is distinguished by the combination of stable magnetic properties such as high coercivity (H_c), large remanence (B_r), and superior maximum energy product $(BH)_{max}$. These features make the alloy highly promising for the fabrication of energy storage components and devices, used in precision electronic devices, as well as in energy technology, mechanical engineering, aerospace, and defense industries. This study investigates the influence of different regimes of magnetic-field-assisted heat treatment on the magnetic characteristics of the AlNiCuCo35Ti5Nb hard magnetic alloy. The alloy samples were produced for the first time domestically using a directional solidification casting method. The results demonstrate that multistage magnetic heat treatment with slow cooling (8.3 °C/min), combined with an isothermal holding stage (800 °C, 15 min), significantly enhances the magnetic properties. Under these conditions, the maximum energy product $(BH)_{max}$ reaches 72.4 kJ/m³, equivalent to the quality of materials from Russia according to GOST 17809-72. This is a consequence of the uniform alignment of the α_1 -phase crystals along the direction of the external magnetic field, which enhances the degree of collinearity of the magnetic moments and simultaneously optimizes their morphology.

Copyright © 2026 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: chinhnhan88@gmail.com

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(3).06



Tăng cường các thông số từ cứng của hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb bằng công nghệ xử lý nhiệt trong từ trường

Trần Mạnh Tùng ¹, Nguyễn Huỳnh ¹, Nguyễn Văn Minh ^{1,*}, Phạm Thị Thủy ², Nguyễn Anh Tú ²

¹ Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng, Hà Nội, Việt Nam

² Khoa Cơ - điện, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

TÓM TẮT

Quá trình:

Nhận bài 25/12/2025

Sửa xong 01/4/2026

Chấp nhận đăng 20/4/2026

Từ khóa:

Alnico,
AlNiCuCo35Ti5Nb,
Lực kháng từ,
Từ dư,
Xử lý từ nhiệt.

Vật liệu từ cứng thuộc hệ Al-Ni-Co là nhóm vật liệu có ý nghĩa quan trọng, được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật - công nghệ. Trong đó, hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb nổi bật nhờ sự hội tụ các đặc tính từ ổn định như lực kháng từ cao (H_c), cảm ứng từ dư lớn (B_r) và tích năng lượng từ cực đại $(BH)_{max}$ vượt trội. Nhờ vậy, hợp kim này có tiềm năng ứng dụng trong chế tạo các linh kiện, bộ phận lưu trữ năng lượng cho các thiết bị điện tử chính xác, cũng như trong công nghệ năng lượng, chế tạo máy, hàng không vũ trụ và công nghiệp quốc phòng. Nghiên cứu này tập trung khảo sát tác động của các chế độ xử lý nhiệt khác nhau trong từ trường (xử lý từ nhiệt) đến các thông số từ tính của hợp kim từ cứng AlNiCuCo35Ti5Nb. Mẫu hợp kim được chế tạo lần đầu tiên trong nước bằng phương pháp nấu đúc kết tinh định hướng. Kết quả cho thấy, chế độ xử lý từ nhiệt đa cấp với tốc độ làm nguội chậm ($8,3\text{ }^\circ\text{C/phút}$) kết hợp giai đoạn giữ đẳng nhiệt ($800\text{ }^\circ\text{C}$, 15 phút) cho phép tăng cường các thông số từ tính của hợp kim, trong đó giá trị $(BH)_{max}$ đạt đến $72,4\text{ kJ/m}^3$, tương đương với chất lượng vật liệu của LB Nga theo tiêu chuẩn GOST 17809-72. Đây là hệ quả của sự định hướng đồng nhất các tinh thể pha α_1 theo hướng từ trường ngoài, qua đó làm tăng mức độ đồng trục của các mômen từ và đồng thời tối ưu hóa hình thái của chúng.

© 2026 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

E - mail: chinhnhan88@gmail.com

DOI: 10.46326/JMES.2026.67(3).06

1. Mở đầu

Trong số các hợp kim nam châm vĩnh cửu, hệ Al-Ni-Co (Alnico) từ lâu được ghi nhận như một nhóm vật liệu đặc biệt quan trọng, nhờ sự kết hợp hài hòa giữa độ ổn định từ học, khả năng làm việc ở nhiệt độ cao, tính chống oxy hóa và độ bền hóa học vượt trội. Trải qua nhiều thập niên, Alnico vẫn duy trì vai trò nền tảng trong ngành chế tạo nam châm công nghiệp, được ứng dụng rộng khắp trong động cơ điện, khí cụ đo lường, cảm biến, kỹ thuật hàng không - vũ trụ, y sinh, năng lượng và cả lĩnh vực quốc phòng (Liu và nnk., 2024; Zhou và nnk., 2018). Bản chất đặc trưng của vật liệu này bắt nguồn từ cơ chế phân tách spinodal trong quá trình xử lý nhiệt, tạo nên vi cấu trúc gồm pha α_1 giàu Fe-Co có từ tính mạnh và pha α_2 giàu Al-Ni gần như không từ tính, nhờ đó cho phép điều chỉnh linh hoạt các tính chất từ học của vật liệu (Zhao và nnk., 2024). Trong các hệ biến thể, hợp kim bốn thành phần Al-Ni-Cu-Co (AlNiCuCo) - tương đương hệ mác hợp kim YUNDK của Nga - được quan tâm nhiều bởi sự ổn định của tính chất từ học, đồng thời có khả năng được cải thiện thêm thông qua việc hợp kim hóa với titan (Ti) và niobi (Nb). Hai nguyên tố này có vai trò kiểm soát quá trình phân tách spinodal, ổn định cấu trúc vi mô và thúc đẩy sự hình thành các thanh nano sắt từ pha α_1 (giàu Fe-Co) định hướng trong nền pha α_2 (giàu Al-Ni-Cu-Ti), từ đó góp phần tăng lực kháng từ và độ bền nhiệt của vật liệu (Samolyuk và nnk., 2014; Ahmad và nnk., 2017; Rehman và nnk., 2025a). Đặc biệt, hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb (tương ứng với mác ЮНДК35Т5ВА hoặc ЮНДКТ5ВА của Nga, có thành phần gần với Alnico 8 và Alnico 9) được xem là hợp kim từ cứng nổi bật, khi đồng thời đạt được sự cân bằng tối ưu của các tham số H_c , B_r và $(BH)_{max}$ - yếu tố quyết định khả năng ứng dụng đặc biệt trong lĩnh vực tích trữ năng lượng từ.

Hiệu quả của Alnico không chỉ phụ thuộc vào thành phần hóa học, mà còn chịu chi phối mạnh mẽ bởi công nghệ chế tạo, đặc biệt là các phương pháp xử lý nhiệt, trong đó có xử lý nhiệt trong từ trường (Xử lý từ nhiệt - XLTN, trong bài báo này, thuật ngữ "xử lý từ nhiệt" được sử dụng để chỉ quá trình xử lý nhiệt dưới tác động của từ trường ngoài nhằm định hướng vi cấu trúc và cải thiện các tính chất từ cứng của vật liệu).

Xu hướng nghiên cứu gần đây tập trung vào khai thác các kỹ thuật tiên tiến như kết tinh định hướng, XLTN hay áp lực cơ học khi ủ, nhằm tối ưu hóa hình thái cột pha Fe-Co, giảm thiểu khuyết tật và nâng cao tính đồng đều của vi cấu trúc (Zou và nnk., 2016; Rinko và nnk., 2022). Trong số đó, chế độ nhiệt - từ đã được xác định là yếu tố mấu chốt trong việc phát triển miền từ và nâng cao các thông số từ tính (Rehman và nnk., 2021; Liu và nnk., 2025a).

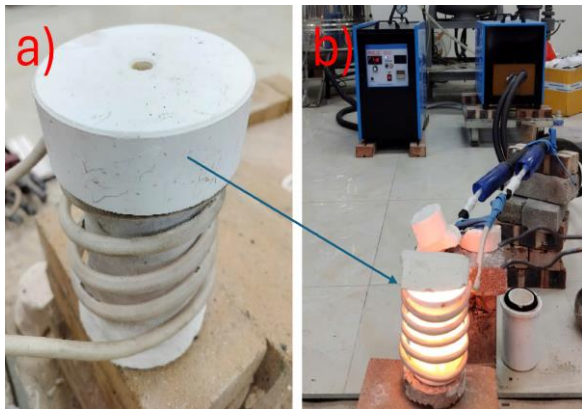
Tuy đã có nhiều nghiên cứu được công bố, song cơ chế vi mô và tác động chi tiết của các quy trình XLTN đối với quá trình phát triển cấu trúc spinodal ở nhiều hệ Alnico vẫn chưa được nghiên cứu một cách toàn diện. Đồng thời, trong bối cảnh nhu cầu tìm kiếm các loại vật liệu từ không chứa đất hiếm để thay thế các hệ nam châm Nd-Fe-B và Sm-Co ngày càng cấp bách do yếu tố tài nguyên và địa chính trị, việc tiếp tục nghiên cứu và phát triển các hợp kim Alnico càng trở nên có ý nghĩa thời sự (Kramer và nnk., 2012; Li và nnk., 2016; Sun và nnk., 2015).

Tại Việt Nam, các công trình liên quan đến Alnico chủ yếu tập trung vào công nghệ đúc truyền thống và khảo sát đặc tính cơ bản. Việc nghiên cứu công nghệ nấu đúc kết tinh định hướng và xử lý từ - nhiệt còn rất hạn chế, đặc biệt chưa có công bố nào đề cập đến hệ hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb. Khoảng trống này vừa cho thấy sự thiếu hụt về cơ sở khoa học - công nghệ, vừa mở ra triển vọng phát triển công nghệ chế tạo trong nước, phục vụ nhu cầu quốc phòng, năng lượng và chế tạo công nghiệp (Nguyễn và nnk., 2021; Nguyễn, 2022).

Phát triển công nghệ đúc và xử lý từ nhiệt cho Alnico không chỉ mang lại khả năng tự chủ trong sản xuất nam châm chất lượng cao, giảm phụ thuộc nhập khẩu, mà còn góp phần nâng cao năng lực nghiên cứu, thiết kế và sáng tạo trong lĩnh vực vật liệu từ. Xuất phát từ yêu cầu đó, nghiên cứu này tập trung vào mục tiêu phân tích ảnh hưởng của các chế độ xử lý từ nhiệt đến các đặc trưng từ học quan trọng H_c , B_r và $(BH)_{max}$ của hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb, lựa chọn được chế độ tối ưu để tăng cường các thông số từ của vật liệu. Việc làm rõ mối quan hệ giữa chế độ XLTN và tính chất từ học không chỉ bổ sung dữ liệu khoa học cho hệ hợp kim Alnico, mà còn có ý nghĩa thực tiễn trong phát triển vật liệu từ không đất hiếm phục vụ các ứng dụng ở điều kiện nhiệt độ cao và môi trường khắc nghiệt.

2. Phương pháp thực nghiệm chế tạo vật liệu và khảo sát tính chất

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) (Hình 1). Trong quá trình này, hợp kim được nấu chảy và hợp kim hoá trong nồi lò bằng gốm Al_2O_3 thiêu kết, dưới tác động của trường cảm ứng điện từ sinh ra bởi dòng điện cao tần chạy trong vòng cảm bao quanh nồi lò.



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.

Quy trình công nghệ chế tạo mẫu vật liệu hợp kim từ cứng Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb được thực hiện theo các bước chính sau:

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

Nguyên liệu ban đầu phục vụ nấu luyện là các kim loại sạch Fe, Al, Ni, Cu, Co, Ti và Nb cùng một số phụ gia đặc biệt khác. Trong quá trình nấu luyện, nồi lò được đậy nắp và bơm cấp khí Ar bảo vệ theo định kỳ sau mỗi 5 phút nhằm hạn chế oxy hóa bề mặt kim loại lỏng (công nghệ nấu bán hở).

Hợp kim nóng chảy 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 thành quá trình hợp kim hoá, nhiệt độ kim loại lỏng được kiểm soát ổn định ở 1700 ± 20 °C (sử dụng hoả quang kế) trước khi rót.

Đúc rót các mẫu phiê được tiến hành bằng công nghệ đúc kết tinh định hướng, sử dụng khuôn gốm hình trụ (kích thước lòng trong $\varnothing 50 \times 120$ mm) được nung nóng 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 dòng 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 bằng cơ cấu nâng hạ với tốc độ di chuyển 2 mm/phút để đảm bảo quá trình kết tinh phát triển theo phương thẳng đứng từ đáy lên đỉnh khuôn.

Mẫu đúc thu được được làm nguội tự nhiên đến nhiệt độ phòng, trích mẫu để khảo sát hình thái tổ chức cấu trúc tinh thể và phân tích thành phần hóa học, sau đó đem đi xử lý từ nhiệt theo 3 chế độ khác nhau (Hình 2), trong đó 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, minh hoạ điển hình đối với vật liệu từ cứng Alnico có hợp kim hoá thêm bằng Cu, Ti và Nb (Rinko và nnk., 2022; Rehman và nnk., 2021; Liu và nnk., 2025b; Zhou và nnk., 2017; McCurrie, 1982; Sergeev & Bulygina, 1980).

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. 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.

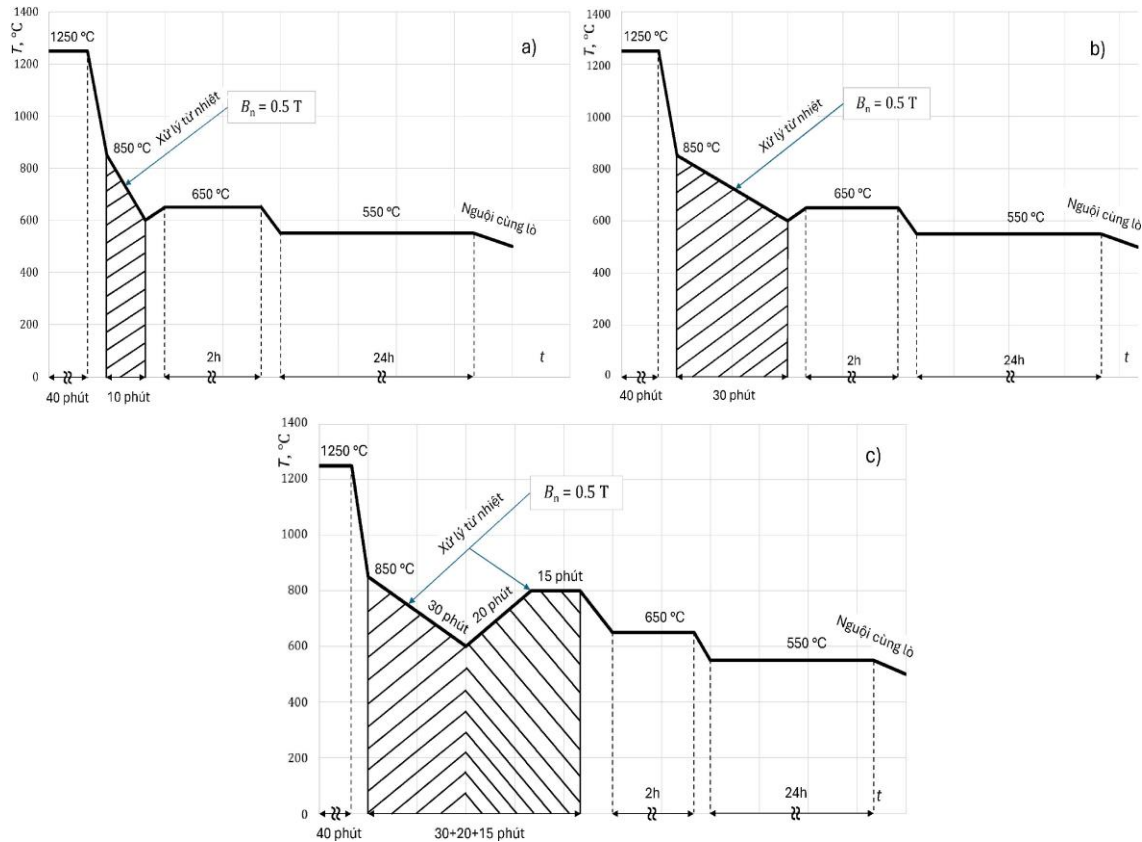
Giai đoạn Xử lý từ nhiệt tiến hành theo 03 chế độ phân biệt như sau:

+) 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 $v \sim 25,0$ °C/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 $v \sim 8,3$ °C/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.

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 ± 5 °C) kèm theo. Giá trị cảm ứng từ tạo ra giữa hai cực từ được thiết lập ở mức là $B_n = 0,5$ T (tương đương mức cường độ từ trường $H_n = 398$ kA/m).



Hình 2. Sơ đồ 3 chế độ nhiệt luyện điển hình áp dụng cho mẫu vật liệu hợp kim từ cứng Alnico $AlNiCuCo_{35}Ti_5Nb$. 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 ($800 \text{ }^\circ\text{C}$, 15 phút).

Giai đoạn Ram không áp từ được tiến hành ngay sau giai đoạn XLTN, áp dụng giống nhau về thông số nhiệt độ/thời gian đối với tất cả các mẫu (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 $10 \text{ }^\circ\text{C} / \text{phút}$.

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 XLTN được gia công thành mẫu chuẩn và đem đi nghiên cứu khảo sát các đặc trưng từ tính gồm các thông số: lực kháng từ (H_c), cảm ứng dư (B_r) lớn và tích năng lượng từ cực đại $(BH)_{\max}$, sử dụng hệ thống đo từ trường xung TQV101 (VAST, Việt Nam).

Giá trị tích năng lượng từ cực đại $(BH)_{\max}$ được xác định từ đường cong khử từ B-H trong góc phần tư thứ hai bằng cách tìm giá trị cực đại của tích $|B \cdot H|$.

Các phép đo từ học được thực hiện trên các mẫu chuẩn có dạng trụ tròn đồng nhất, kích thước $\Phi \times h = 4 \times 4 \text{ mm}$. Hướng cắt mẫu và đo từ trường trùng với trục dị hướng hình học của mẫu. Trong quá trình xử lý số liệu, tham số khử từ đã được bỏ chính theo hình dạng mẫu; đối với mẫu hình trụ tròn có tỷ lệ $\Phi/h = 1$, hệ số khử từ được sử dụng là $N \approx 0,33$. Đường cong khử từ thu được trực tiếp từ hệ đo sử dụng phần mềm chuyên dụng của thiết bị, các thông số từ học được xác định sau khi đã hiệu chỉnh tham số khử từ, phản ánh chính xác các đặc trưng từ học nội tại của vật liệu.

Hình thái tổ chức cấu trúc hạt tinh thể của vật liệu sau nấu đúc kết tinh định hướng được nghiên cứu bằng phương pháp chụp ảnh hiển vi quang học của mặt gãy, sử dụng thiết bị kính hiển vi Zeiss Axio Observer D1m (TTTCĐLCL, Viện Công nghệ/TCCNQP).

Thành phần nguyên tố hợp kim của mẫu phối đúc vật liệu từ cứng Alnico $AlNiCuCo_{35}Ti_5Nb$ được kiểm tra bằng phương pháp Phổ tán sắc

năng lượng tia X (EDS) trên thiết bị JSM 6490 - JED 2300 (JEOL, Nhật Bản).

3. Kết quả và thảo luận

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 3.



Hình 3. Ảnh mẫu phôi hợp kim Alnico AlNiCuCo35Ti5Nb thu được bằng công nghệ đúc kết tinh định hướng.

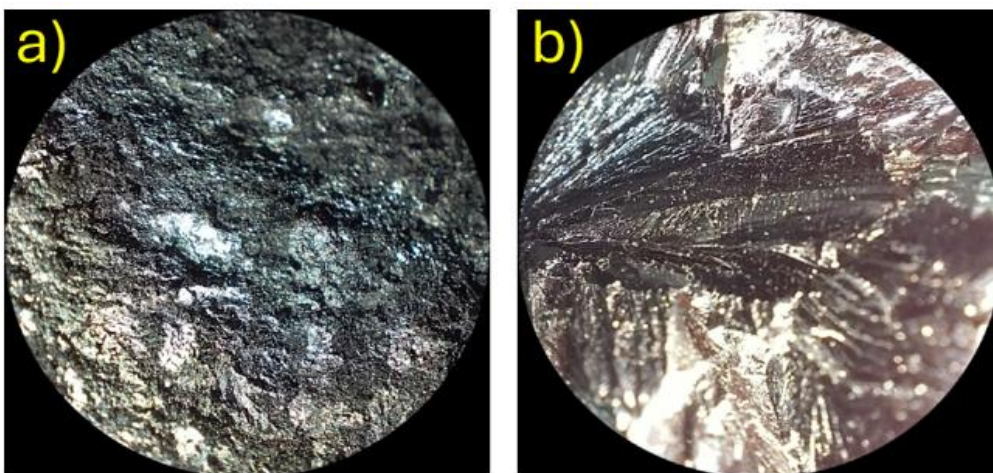
Dưới tác động của gradient nhiệt lớn (phần đáy phôi tiếp xúc trực tiếp với đế đồng làm mát, trong khi phần trên được nung cảm ứng và duy trì ở nhiệt độ cao hơn), quá trình kết tinh xảy ra dọc theo phương thẳng đứng từ dưới lên trên (Hình

4). Cụ thể, hình ảnh quan sát trên mặt gãy theo hướng tiết diện ngang của phôi trụ (Hình 4a) cho thấy cấu trúc hạt tương đối đẳng hướng trong mặt cắt, trong khi đó hình ảnh trên mặt gãy song song với trục dọc của phôi (Hình 4b) thể hiện rõ ràng các hạt tinh thể có dạng cột kéo dài, phát triển ưu tiên theo hướng từ đáy khuôn lên phía trên. Đặc điểm này phản ánh rõ sự tồn tại của gradient nhiệt và hướng truyền nhiệt chủ đạo trong quá trình kết tinh, là đặc trưng điển hình của vật liệu thu được bằng phương pháp đúc kết tinh định hướng.

Kết quả quan sát vi mô này cung cấp bằng chứng trực quan cho tính dị hướng hình học của vật liệu, đồng thời củng cố nhận định rằng cấu trúc tinh thể dạng cột đã được hình thành trong quá trình chế tạo. Cấu trúc này được xem là cơ sở quan trọng then chốt dẫn đến hiệu ứng dị hướng từ, từ đó quyết định các đặc trưng từ học của hợp kim từ cứng AlNiCuCo35Ti5Nb thu được.

Theo cơ sở lý thuyết, hướng phát triển của các tinh thể dạng cột tương ứng với phương từ hóa dễ nhất (easy magnetization direction) của pha trật tự α_1 (giàu Fe-Co) có đặc tính sắt từ (từ tính mạnh) trong hợp kim Alnico (Liu và nnk., 2025a; 2025b; Rehman và nnk., 2025b; Zhou và nnk., 2025).

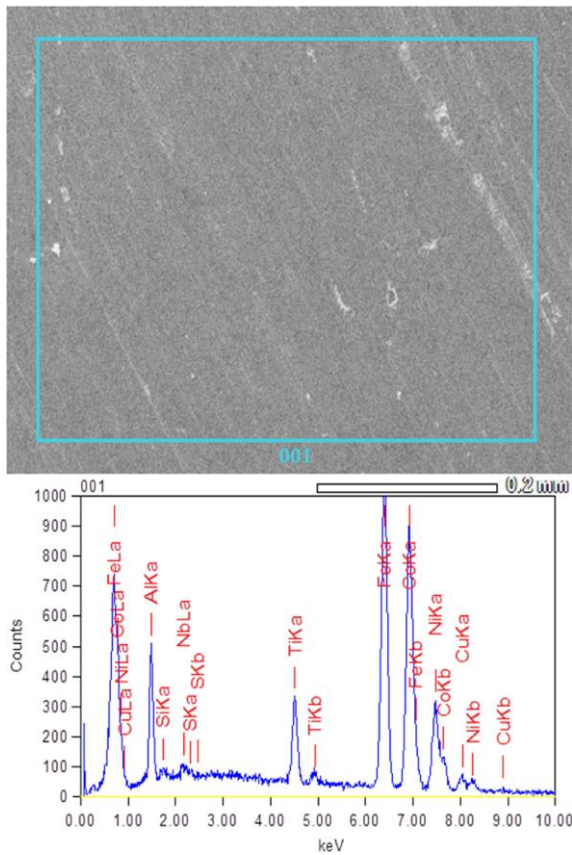
Việc đạt được cấu trúc cột định hướng có ý nghĩa quyết định đối với tính chất từ cứng, bởi vì dị hướng từ tính của vật liệu phụ thuộc trực tiếp vào định hướng mạng tinh thể. Chính vì vậy, khi tiến hành xử lý từ nhiệt, việc lựa chọn hướng áp từ trùng với trục dọc của phôi trụ (tức trục kết tinh định hướng khi đúc) sẽ đảm bảo tạo được dị hướng từ tính tối ưu, nhờ đó cải thiện đáng kể các



Hình 4. Hình ảnh cấu trúc hạt tinh thể của hợp kim từ cứng AlNiCuCo35Ti5Nb thu được sau nấu đúc kết tinh định hướng. a) Trên mặt gãy theo hướng tiết diện ngang của phôi trụ, X40; b) Trên mặt gãy theo hướng song song trục dọc của phôi trụ, X40.

thông số từ quan trọng của vật liệu như lực kháng từ H_c , từ dư B_r và tích năng lượng cực đại $(BH)_{max}$.

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 (EDS) 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.



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

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 EDS 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 EDS 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 EDS 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.

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 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 (Standards Publishing House, 1972). Điều này chứng tỏ công nghệ nấu luyện bán hờ 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 của Guo và nnk. (2020), Haider và nnk. (2022) 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. 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 (Gridnev và nnk., 1977). 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.

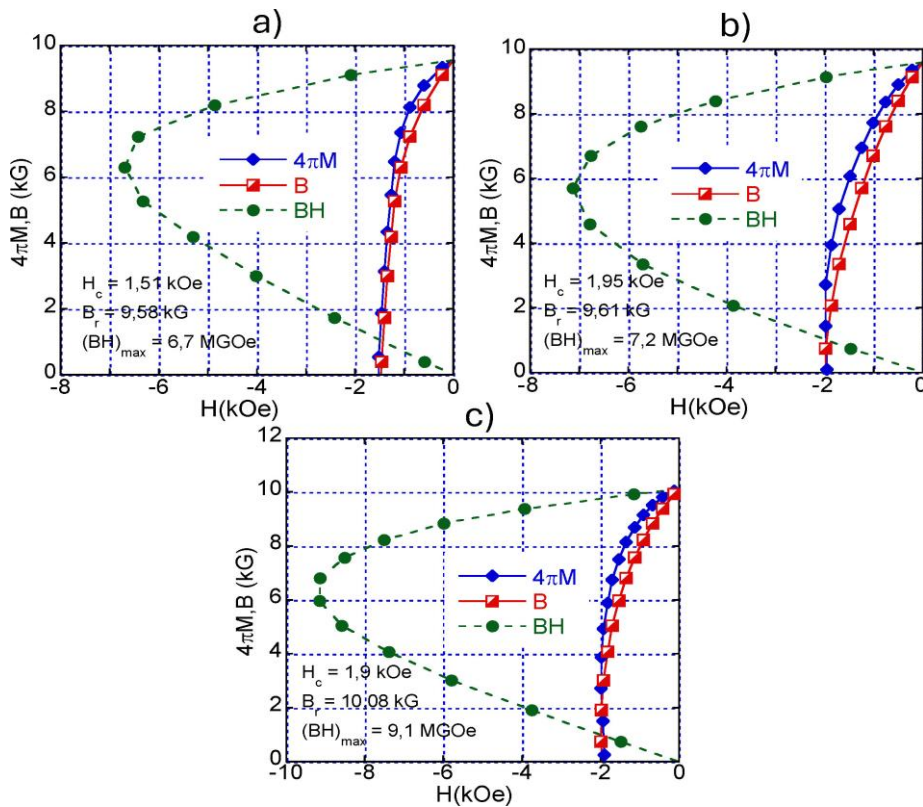
Phương pháp phân tích phổ EDS thực hiện kết hợp với chụp ảnh SEM (hiển vi điện tử quét) (xem Hình 5). Kết quả khảo sát cho thấy vật liệu có cấu trúc đặc sít cao, trong tổ chức đúc không xuất

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 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.

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



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. a) chế độ 1; b) chế độ 2; c) chế độ 3.

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.

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 nằm trong dải giá trị quy định của Tiêu chuẩn GOST 17809-72.

Kết quả khảo sát đặc trưng từ tính của các mẫu thử nghiệm phối hợp kim AlNiCuCo35Ti5Nb thu được cho thấy các thông số từ của vật liệu thay đổi đáng kể theo chế độ XLTN.

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 giá trị tương đối thấp, với $H_c = 120$ 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 (Zhou và nnk., 2017). 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 mômen từ định hướng đồng trục hơn trong khi hình thái của chúng tiếp tục được tối ưu hóa. Chính sự kết hợp của các yếu tố trên đã dẫn đến sự gia tăng đáng kể giá trị cảm ứng từ dư B_r (từ $0,96$ T lên $1,01$ T), đồng thời vẫn duy trì lực kháng từ ở mức cao. 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 $(BH)_{\max}$ (Zhou và nnk., 2017; Zhou và nnk., 2018; Han và nnk., 2019; Rehman và nnk., 2019). 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 (Rehman và nnk., 2025b; Liu và nnk., 2025a). 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 (Sun và nnk., 2015; Zhou và nnk., 2017; Kronmüller & Fähnle, 2003). Nghiên cứu này tiếp tục củng cố được luận điểm này đối với hợp kim từ cứng AlNiCuCo35Ti5Nb: khi hợp kim Alnico được xử lý

niệt trong vùng phân 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.

4. 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 hử 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 YUNDK AlNiCuCo35Ti5NbA (AlNiCuCoTi5NbA) 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 thu được khẳng định tiềm 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 và sản xuất vật liệu từ phục vụ các lĩnh vực khoa học - kỹ thuật.

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 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

- Ahmad, Z., Liu, Z. W., & Haq, A. (2017). Synthesis, magnetic and microstructural properties of Alnico magnets with additives. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 428, 125-131.
- GOST 17809-72, (1972). Casting hard magnetic materials. Marks. *Standards Publishing House, Moscow*.
- Gridnev, A. I., Chaban, I. P., Fedorova, G. A., & Morozov, E. M. (1977). Structure and nonmetallics in monocrystals of magnetic alloys doped with sulfur and carbon. *Nauka, Moscow*, pp. 86-88.
- Guo, P., Ma, S., He, X., Shah, I. A., Ping, L., Chen, H., Xing, J., Xu, L., & Zhang, J. (2022). Effect of silicon content on microstructures and properties of directionally solidified Fe-Balloy. *Materials* 15(17), 5937.
- Haider, A., Jaffery, S. H. I., 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.
- Han, X. H., Sun, J. B., Liu, T. Y., Wang, H. W., Zhang, Y., & Cui, C. X. (2019). Effects of magnetic field and annealing on the structure and magnetic properties of Alnico ribbons. *Journal of Alloys and Compounds* 785, 715-724.
- Kramer, M. J., McCallum, R. W., Anderson, I. A., & Constantinides, S. (2012). Prospects for non-rare earth permanent magnets for traction motors and generators. *JOM* 64, 752-763.

- Kronmüller, H., & Fähnle, M., (2003). *Micromagnetism and the Microstructure of Ferromagnetic Solids. Cambridge University Press, Cambridge (UK)*, 432 pages.
- 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.
- Liu, Z., Deng, Y., Rehman, S. U., Liu, H., Khan, A. J., Zhong, S., Yu, X., & Yang, M. (2025a). Refining Alnico 8 magnets with composition optimization of matrix phase, directional solidification and magnetic field annealing. *Journal of Alloys and Compounds* 1006, 176329.
- Liu, Y., Luan, H., Zhao, J., Zhao, Z., Liu, L., Ding, Y., Sun, Y., & Yan, A. (2025b). Relationships between the grain orientation, spinodal structure, and magnetic properties of AlNiCo alloys. *Journal of Alloys and Compounds* 1010(5), 177275.
- Liu, Y., Zhao, J., Zhao, Z., Liu, L., Huang, M., Zhou, B., Ding, Y., Sun, Y., Liu, Y., & Yan, A. (2024). Microstructure and magnetic properties of Dy-added Alnico alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 973, 172894.
- 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.
- Nguyễn, H. D. (2022). Nghiên cứu chế tạo một số vật liệu từ cứng đặc chủng, ứng dụng trong quốc phòng. Đề tài nghiên cứu mã số TĐANQP.02/20-22, Viện Hàn lâm KH&CN Việt Nam.
- Nguyễn, H. Ng., Phạm, Th. Th., Kiều, X. H., Nguyễn, H. Y., Đào, S. L., Phạm, V. Đ., Trần, Đ. Th., Lương, V. Đ., Trương, V. A., Nguyễn, V. Th., Phan, Ng. H., & Nguyễn, H. D. (2021). Nghiên cứu chế tạo vật liệu từ cứng Alnico bằng phương pháp đúc. *Hội nghị Vật lý chất rắn và Khoa học vật liệu lần thứ 12-SPMS 2021*. Trường Đại học Cần Thơ, 44-48.
- Rehman, S. U., Jiang, Q., Lei, W., Liu, K., Zeng, L., Ghazanfar, M., Ahmad, T., Liu, R., Ma, S., & Zhong, Z. (2019). Microstructures and magnetic properties of cast Alnico 8 permanent magnets under various heat treatment conditions. *Physica B: Condensed Matter* 552, 136-141.
- Rehman, S. U., Liu, H., Deng, Y., Liu, Z., Khan, A. J., Li, J., Yu, X., & Yang, M. (2025a). Optimization of an isotropic Alnico 8 alloy. *Journal of Alloys and Compounds* 1010, 178142.
- Rehman, S. U., Liu, Z., Deng, Y., Liu, R., Yu, X., & Yang, M. (2025b). Service performance of directionally solidified Alnico 8 alloy. *Journal of Materials Research and Technology* 36, 7476-7484.
- Rehman, S. U., Wei, C., Huang, Q., Jiang Q., Haq, A., Wang, J., & Zhong, Z. (2021). Tailoring the microstructure, magnetic properties and interaction mechanisms of Alnico-Ta alloys by magnetic field treatment. *Journal of Alloys and Compounds* 857, 157586.
- Rinko, E. A., Zhang, X., Tang, W., Lewis, L. H., Kramer, M. J., & Anderson, I. E. (2022). Effects of tensile loading during annealing of Alnico melt-spun ribbons. *AIP Advances* 12(3), 035338.
- 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.
- Sergeev V. V. & Bulygina T. I. (1980). *Hard Magnetic Materials*. Energy, Moscow, 224 pages.
- Sun, Y. L., Zhao, J. T., Liu, Z., Xia, W. X., Zhu, S. M., Lee, D., & Yan, A. R. (2015). The phase and microstructure analysis of Alnico magnets with high coercivity. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 379, 58-62.
- 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.
- Zhou, L., Guo, W., Poplawsky, J. D., Ke, L., Tang W., Anderson, I. E., & Kramer, M. J. (2018). On

- spinodal decomposition in alnico-A transmission electron microscopy and atom probe tomography study. *Acta Materialia*, 153, 15-22.
- Zhou, L., Tang, W., Ke, L., Guo, W., Poplawsky, J. D., Anderson, I. E., & Kramer, M. J. (2017). Microstructural and magnetic property evolution with different heat-treatment conditions in an Alnico alloy. *Acta Materialia* 133, 73-80.
- Zhou, M. J., Sun, J. B., Zhang, H. Q., Chi, X., Ding, H. W., & Wang, Y. L. (2025). Preparation of Alnico alloy with high magnetic properties by the two-phase composite method. *Journal of Alloys and Compounds* 1039, 183272.
- Zou, M., Johnson, F., Zhang, W., Zhao, Q., Rutkowski, S. F., Zhou, L., & Kramer, M. J. (2016). Processing of Alnico permanent magnets by advanced directional solidification methods. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 420, 152-157.