

## Nghiên cứu công nghệ đúc phôi hợp kim 49K2ΦA làm lõi stato của máy phát điện nhỏ trong quân sự

Nguyễn Văn Dương<sup>1\*</sup>, Nguyễn Thanh Hùng<sup>1</sup>, Lê Minh Đức<sup>1</sup>, Lục Vân Thương<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Học viện Kỹ thuật Quân sự; 236 Hoàng Quốc Việt, Cổ Nhuế 1, Bắc Từ Liêm, Hà Nội.

<sup>2</sup>Viện Nghiên cứu Cơ khí, 03 Phạm Văn Đồng, Cầu Giấy, Hà Nội.

\*Email: duongdmse@gmail.com

Nhận bài: 17/11/2022; Hoàn thiện: 23/01/2023; Chấp nhận đăng: 07/6/2023; Xuất bản: 25/8/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.89.2023.160-165>

### TÓM TẮT

Trong bài báo này đã tiến hành phân tích, lựa chọn công nghệ và thiết bị nấu luyện phôi hợp kim 49K2ΦA. Trong các phương pháp nấu luyện tiên tiến, phương pháp nấu luyện hợp kim 49K2ΦA trong lò cảm ứng chân không phù hợp hơn cả, do cung cấp khả năng kiểm soát tốt nhất đối với thành phần hóa học hợp kim, các nguyên tố vi lượng có lợi và tạp chất có hại. Phôi đúc hợp kim 49K2ΦA được nấu từ Fe, Co, V sạch kỹ thuật và FeV80 có chất lượng tốt, thành phần hóa học đảm bảo. Hàm lượng các tạp chất (C, P, S) ảnh hưởng xấu đến tính chất từ của hợp kim đều nhỏ hơn mẫu đối sánh của Nga. Phương pháp sử dụng FeV công nghiệp mặc dù cho hàm lượng P, S cao hơn đôi chút song có thể được xem xét lựa chọn do sử dụng nguyên liệu rẻ hơn so với phương án sử dụng V sạch kỹ thuật.

**Từ khóa:** Lò cảm ứng chân không; Hợp kim từ mềm; Hợp kim 49K2ΦA; Thiết bị nấu luyện.

### 1. MỞ ĐẦU

Công nghiệp tên lửa, hàng không vũ trụ thường sử dụng các loại máy phát điện dùng nguồn khí đẩy để phát điện điều khiển thiết bị bay trong quá trình bay đến mục tiêu. Các máy phát điện này thường có yêu cầu đạt công suất cao song phải có kích thước và khối lượng nhỏ. Vì vậy, lõi stato cho các máy điện này thường làm bằng các vật liệu từ mềm có đặc tính từ rất cao. Một trong các vật liệu từ mềm thường sử dụng cho các ứng dụng như vậy là vật liệu từ mềm hệ Fe-Co. Các hợp kim Fe-Co có cảm ứng từ kỹ thuật cao nhất, đến 2,4 T [1], trong số các hợp kim từ đang được ứng dụng. Sử dụng vật liệu này làm roto, lõi stato trong máy phát điện có thể đạt được mật độ từ thông rất cao trong cuộn dây, dẫn đến tạo ra công suất điện lớn hơn nhiều so với lõi stato cùng kích thước làm từ vật liệu khác [1]. Trong số các hợp kim từ mềm trên cơ sở Fe-Co, các hợp kim ba nguyên Fe-Co-V như 49KΦ và 49K2ΦA (ГОСТ 10994-74) chiếm vị trí rất quan trọng. Các hợp kim này tương đối đắt tiền nhưng lại là lựa chọn phù hợp cho các ứng dụng như: cuộn dây thu phát, lõi chuyển mạch và lưu trữ, các thành phần làm việc ở nhiệt độ cao, các màng ngăn trong điện thoại cầm tay bởi vì hợp kim này thể hiện độ từ hóa bão hòa cao nhất trong số các vật liệu từ thương mại. Ngoài ra, chúng có nhiệt độ Curie cao, độ từ thẩm tốt, độ bền khá cao và rất thích hợp cho các ứng dụng yêu cầu mật độ từ thông cao [2]. Ví dụ, hợp kim Fe-Co-V so với hợp kim Fe – Si tiêu chuẩn có thể dẫn đến tiết kiệm trọng lượng từ 20 - 25% [2-3].

Các hợp kim từ mềm Fe-Co-V có yêu cầu rất cao về độ sạch, thành phần hóa học và đặc điểm tổ chức để đạt được tính chất từ mong muốn. Vì vậy, chế tạo các chi tiết bằng hợp kim này đòi hỏi phải có các phương pháp nấu luyện tạo phôi, gia công biến dạng, nhiệt luyện, gia công đặc biệt để đạt được các yêu cầu nghiêm ngặt về thành phần, tổ chức và tính chất. Theo A.A. Couto và cộng sự [4], các hợp kim Fe-Co-V thường được chế tạo bằng cách sử dụng Fe và Co sạch, V được thêm vào dưới dạng hợp kim trung gian Fe-V hoặc V sạch, quá trình nấu luyện và rót đúc được thực hiện trong môi trường chân không.

Các thiết bị thường được sử dụng để nấu chảy và tinh luyện hợp kim từ mềm bao gồm lò cảm ứng chân không và lò hồ quang chân không. Ưu điểm chính của lò hồ quang chân không đó là chi phí nấu chảy thấp và nhiệt độ nấu chảy cao hơn. Tuy nhiên, thiết bị này tồn tại khá nhiều

nhược điểm: yêu cầu vật liệu thân lò điện hồ quang tương đối nghiêm ngặt, phải sử dụng thân lò có hàm lượng cacbon thấp (do yêu cầu về thành phần hợp kim từ mềm nên lớp lót lò là thường được yêu cầu không chứa C); khả năng khử cacbon của lò hồ quang chân không có hạn chế, hàm lượng C trong thép chỉ có thể khống chế ở mức tối thiểu là 0,02% [5]. Ngoài ra, hàm lượng của các nguyên tố bao gồm như Al và Ti cũng tương đối cao ( $Al \geq 0,03\%$ ,  $Ti \geq 0,01\%$ ), có tác động lớn hơn đến thành phần hoá học của hợp kim từ mềm; khả năng khuấy kim loại lỏng trong quá trình nấu chảy kém, giảm tác dụng loại bỏ khí và tạp, dẫn đến dao động lớn về độ dẻo và các đặc tính từ của thành phẩm [5]. Ngược lại, quá trình nấu chảy trong lò cảm ứng chân không cung cấp khả năng kiểm soát tốt nhất đối với toàn bộ thành phần hóa học hợp kim, hạn chế đến mức tối thiểu tạp chất có hại. Ngoài ra, khả năng lặp lại của việc kiểm soát thành phần chính xác từ quá trình gia nhiệt sang quá trình khác là đặc biệt chính xác, và dẫn đến tính nhất quán vượt trội của các đặc tính vật liệu. Khối lượng mẻ liệu cũng thay đổi trong phạm vi rộng [6]. Chính vì vậy, lò cảm ứng chân không hoàn toàn thích hợp để nấu phối hợp kim 49K2ΦA.

Tuy nhiên, tại Việt Nam các nghiên cứu về lò cảm ứng chân không còn khá hạn chế. Quy trình công nghệ nấu luyện hợp kim từ mềm trong thiết bị này cũng chưa được công bố nhiều. Chính vì vậy, bài báo này tiến hành nghiên cứu công nghệ nấu luyện vật liệu 49K2ΦA trong lò cảm ứng chân không - Vacuum Induction Furnace-2 (VIF-2) đảm bảo thành phần, kích thước phối phù hợp cho các bước gia công cơ khí tiếp theo của chi tiết lõi stato của máy phát điện nhỏ trong tên lửa.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

### 2.1. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu là hợp kim 49K2ΦA được dùng làm stato (lõi cuộn dây) của máy phát tuabin trong tên lửa có thành phần đăng kí như trong bảng 1. Các tính chất nhiệt lý cơ bản của hợp kim như sau: nhiệt độ nóng chảy  $T_{nc} = 1470\text{ }^\circ\text{C}$ , khối lượng riêng  $\rho = 8,15\text{ g/cm}^3$ . Hợp kim được phối liệu nấu luyện theo 2 phương án: 1) Fe, Co và V sạch kỹ thuật; 2) Fe, Co sạch kỹ thuật và FeV80 trong lò cảm ứng chân không VIF-2, khối lượng 1 mẻ nấu là 300 g. Thành phần và hình dạng nguyên liệu sử dụng trong nấu luyện được cho trong bảng 2 và hình 1.

**Bảng 1.** Thành phần của hợp kim 49K2ΦA (%wt).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Co	V	Fe
<0,03	<0,15	< 0,3	< 0,015	< 0,015	-	<0,3	48 - 50	1,7 - 2,0	còn lại

**Bảng 2.** Thành phần liệu nấu luyện (%wt).

Liệu đầu vào	Các nguyên tố									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Co	V	Fe
Fe sạch kỹ thuật	0,0005	0,0005	0,0001	0,0005	0,0003	0,0002	0,0002	0,0014	-	Còn lại
Co sạch kỹ thuật	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,005	Còn lại	-	0,003
V sạch kỹ thuật	0,02	0,003	-	-	-	0,02	0,01	-	Còn lại	0,02
FeV80	0,08	0,69	-	0,04	0,03	-	-	-	79,3	19,11

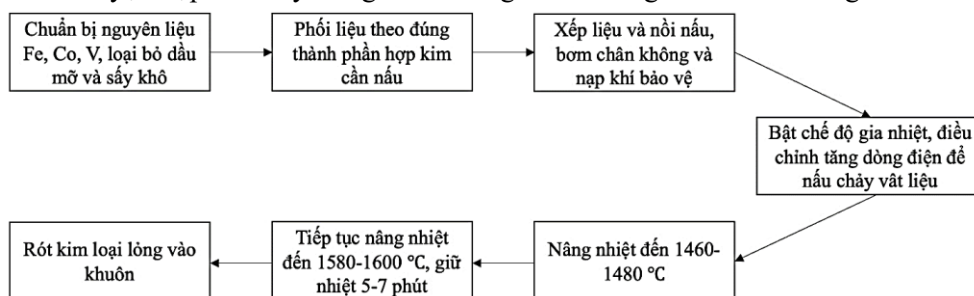


Tuy nhiên, hợp kim có nhiệt độ nóng chảy rất cao ( $T_{nc} = 1470\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), do đó, khuôn đồng phải có biện pháp làm giảm nhiệt độ mặt phân cách khuôn/kim loại lỏng. Đảm bảo nhiệt độ tại vị trí này luôn nhỏ hơn điểm sôi của chất làm mát. Chính vì vậy, khuôn Cu được chế tạo có hệ thống nước làm mát tuần hoàn bên trong.

Kích thước cụ thể của khuôn đồng được sử dụng như trong hình 3a. Kết cấu của khuôn sau khi lắp đặt trong buồng lò cảm ứng chân không VIF-2 như hình 3b.

**2.4. Quy trình công nghệ nấu luyện hợp kim 49K2ΦA trong lò cảm ứng chân không VIF-2**

Căn cứ vào đặc điểm của hợp kim 49K2ΦA, đặc tính kỹ thuật của lò nấu, các tác giả đề xuất quy trình nấu luyện hợp kim này trong lò cảm ứng chân không VIF-2 như trong hình 4.



**Hình 4.** Quy trình công nghệ nấu luyện hợp kim 49K2ΦA được đề xuất.

**3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN**

**3.1. Phôi hợp kim 49K2ΦA sau đúc**

Hợp kim Permendur 49K2ΦA nấu chảy theo 2 phương án dùng V sạch kỹ thuật và FeV80. Sau khi nóng chảy, hợp kim được rót vào khuôn đồng có nước làm nguội tuần hoàn. Thỏi đúc được lấy ra sau 15 phút. Hình dạng thỏi đúc thu được như hình 5, trong đó, hình 5a là thỏi đúc hợp kim 49K2ΦA được nấu dùng V sạch kỹ thuật, hình 5b là dùng FeV80.

Trong cả 2 trường hợp thỏi đúc có hình dạng đảm bảo, bề mặt tiếp xúc với khuôn Cu bị nhẵn một chút, có thể là do sự chênh lệch về khả năng truyền nhiệt giữa vùng mặt ngoài và trong lõi thỏi đúc. Mặt khác, do quá trình rót trực tiếp từ trên xuống vào trong khuôn dễ sinh ra dòng chảy rối, điều này cũng ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt thỏi đúc. Điều này sẽ được khắc phục ở các bước gia công biến dạng sau này. Ngoài ra, bề mặt trên cùng của thỏi đúc bị co ngót, điều này là hoàn toàn dễ lý giải, hợp kim thường bị co ngót trong quá trình chuyển từ trạng thái lỏng sang rắn, đối với phôi đặc thì hiện tượng co ngót càng rõ ràng. Tuy nhiên, bước chế tạo phôi đúc chỉ là bước chuẩn bị cho các quy trình sau này, điều cần quan tâm nhất đó là đảm bảo về thành phần hóa học.



**Hình 5.** Thỏi đúc hợp kim 49K2ΦA được nấu từ (a) V sạch kỹ thuật, (b) FeV80.

**3.2. Kết quả thành phần hóa học**

Thỏi hợp kim sau đúc được phân tích thành phần hóa học bằng phương pháp quang phổ phát xạ trên nền Fe để xác định hàm lượng các nguyên tố C, P, S và nền Co để xác định các nguyên tố hợp kim chính Fe, Co, V,... Kết quả thành phần hóa học của hợp kim 49K2ΦA sau khi nấu luyện trong lò cảm ứng chân không VIF-2 được so sánh với mẫu nguyên gốc (mẫu Nga) hiện đang được dùng cho sản xuất như trong bảng 3.

**Bảng 3.** So sánh thành phần hóa học hợp kim 49K2ΦA.

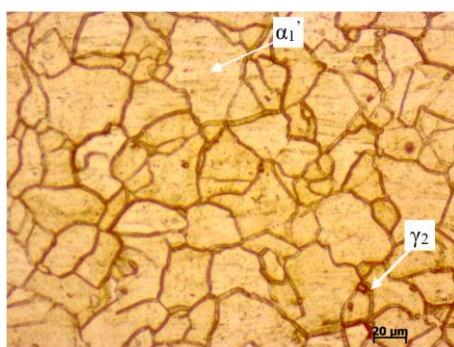
Thành phần hóa học, %										
Loại	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Co	V	Fe
Mẫu Nga	0,015	0,043	0,17	0,0258	0,0162	0,1	0,38	48,4	1,77	Còn lại
Phương án 1	0,009	0,022	0,011	0,0115	0,0132	-	0,16	49,07	2,05	Còn lại
Phương án 2	0,012	0,038	0,014	0,0124	0,0125	0,015	0,23	49,32	2,09	Còn lại

Có thể thấy, về cơ bản thành phần các nguyên tố chính (Fe, Co, V) trong cả 2 phương án nấu luyện và của mẫu nguyên gốc Nga đều đáp ứng tốt yêu cầu của tiêu chuẩn. Hàm lượng 2 nguyên tố tạp chất (P, S) thấp hơn yêu cầu khá nhiều so với mẫu Nga hiện đang sử dụng. Kết quả này có được có thể do quá trình nấu luyện ở đây trong quy mô phòng thí nghiệm và sử dụng liệu sạch hơn. Phương án 1 (nấu từ Fe, Co, V sạch) cho hàm lượng các nguyên tố tạp chất có hại (C, P, S) thấp hơn so với phương án 2 (nấu từ Fe, Co, FeV80). Điều này được giải thích là do phương án 2 sử dụng ferro vanadi FeV của công nghiệp luyện thép nên hàm lượng tạp chất P, S, C cao hơn. Tuy nhiên, dù hàm lượng tạp chất khi phối liệu theo phương án 2 có cao hơn đôi chút so với phương án 1, song chi phí nguyên liệu phương án này thấp hơn hẳn so với phương án 1 sử dụng V nguyên chất kỹ thuật.

Từ kết quả phân tích cho thấy các mẫu sau nấu luyện có hàm lượng tạp chất P, S cao hơn đáng kể so với nguyên liệu sạch ban đầu. Vì vậy, đã có quá trình tương tác nôi lò với kim loại lỏng làm tăng hàm lượng P, S từ nôi nấu đi vào trong kim loại. Quá trình tương tác hóa học của kim loại lỏng với nôi lò ở nhiệt độ cao, trên 1500 °C, là không tránh khỏi. Vì vậy, cần có các nghiên cứu tiếp theo về vật liệu nôi lò và quá trình công nghệ nấu luyện để tạo ra vật liệu có hàm lượng tạp chất có hại (C, P, S) thấp hơn nữa, đáp ứng yêu cầu cao cho một số trường hợp đặc biệt: P < 0,001%, S < 0,001%.

### 3.3. Kết quả tổ chức tế vi hợp kim sau đúc

Mẫu sau đúc được chuẩn bị để quan sát tổ chức trên kính hiển vi quang học AxioVert A2M. Dung dịch tẩm thực: 15 ml HNO<sub>3</sub> + 85 ml Metanol, ngâm mẫu khoảng (4 - 9) phút. Kết quả tổ chức tế vi được biểu diễn trong hình 6. Kết quả đo độ cứng Vicker với tải trọng 5 kg trên máy đo độ cứng Wilson Worlpert cho độ cứng phối sau đúc 254 HV<sub>5</sub>.



**Hình 6.** Tổ chức tế vi sau đúc của hợp kim 49K2ΦA (x200).

Thấy rằng, tổ chức của thỏi hợp kim 49K2ΦA sau đúc bao gồm pha nền có trật tự α<sub>1</sub>' đều trực. Đây là pha có cấu trúc siêu mạng B2 được tạo thành từ pha α<sub>1</sub> khi làm nguội xuống dưới 700 °C [3, 7, 8]. Kích thước trung bình của pha nền α<sub>1</sub>' khoảng 50 μm. Ngoài ra, với tốc độ nguội như trong khuôn đồng nguội nước cưỡng bức, pha γ<sub>2</sub> giàu V có cấu trúc trật tự L1<sub>2</sub> có thể được tiết ra từ pha nền α<sub>1</sub>' [7, 8]. Song sự có mặt của pha này trong cấu tạo hợp kim ở điều kiện cụ thể này được nghiên cứu thêm.

Với cấu tạo gồm pha  $\alpha_1'$  hoặc  $\alpha_1' + \gamma_2$  hợp kim có độ cứng khoảng 254 HV. Tổ chức và độ cứng này hợp kim có thể gia công cắt gọt song chưa thể cán nguội, dập nguội để chế tạo các chi tiết mỏng lắp ghép thành lõi stato của máy phát tuabin. Vì vậy, cần có các nghiên cứu tiếp theo để tạo tính gia công rèn dập cho hợp kim này.

#### **4. KẾT LUẬN**

Phôi hợp kim 49K2ΦA được nấu luyện trong lò cảm ứng chân không VIF-2 có thành phần hóa học được kiểm soát tốt, hàm lượng các tạp chất có hại (C, P, S) ảnh hưởng xấu đến tính chất từ đều nhỏ hơn so với mẫu đối sánh của Nga. Đây là cơ sở cho quy trình gia công biến dạng và nhiệt luyện tiếp theo.

Quy trình công nghệ nấu luyện hợp kim 49K2ΦA từ Fe, Co, V sạch kỹ thuật và FeV80 đều nấu được phôi hợp kim có thành phần đảm bảo. Có thể sử dụng ferro vanadi công nghiệp để hợp kim hóa vanadi song vẫn cơ bản đảm bảo được thành phần, độ sạch của hợp kim nấu luyện. Hàm lượng các nguyên tố tạp chất P, S, C cao hơn nguyên liệu đầu vào có thể do phản ứng giữa nôi nấu và hợp kim lỏng ở nhiệt độ cao. Điều này cần có các nghiên cứu chuyên sâu tiếp theo.

*Lời cảm ơn:* Nhóm tác giả cảm ơn sự tài trợ về kinh phí của đề tài cấp BQP, mã số: 2022.73.24.

#### **TÀI LIỆU THAM KHẢO**

- [1]. И.Б. Кекало Б.А. Самарин, “*Физическое металловедение прецизионных сплавов. сплавы с особыми магнитными свойствами.*” Москва “металлургия”, pp. 307-309, (1989).
- [2]. E.P. Wohlfarth, “*Handbook of Ferromagnetic Materials,*” Vol. 2, North-Holland Publishing Company, pp. 168-170, (1980).
- [3]. R.S. Sundar and S.C. Deevi, “*Soft magnetic FeCo alloys: alloy development, processing, and properties,*” International Materials Reviews, Vol. 50, No. 3, pp. 157-192, (2005).
- [4]. A.A. Couto and P.I. Ferreira, “*Phase transformations and properties of Fe-Co alloys,*” J. Mater. Eng., Vol. 11, pp. 31-36, (1989).
- [5]. Yuan Yu et al., “*Soft magnetic alloy smelting production method,*” CN Patent, No. 1594626A, (2005).
- [6]. ASM Handbook, “*Volume 15: Casting, Vacuum Induction Melting,*” pp. 1-8, (2008).
- [7]. Cheryl Denise Pitt, “*The microstructure and mechanical properties of FeCo alloys with various alloying additions,*” Thesis submitted for the degree of doctor of philosophy, pp. 3-13, (1980).
- [8]. Cohen Persiano, “*Structure and physical properties of soft magnetic FeCo based alloys*”, Thesis submitted for the degree of doctor of philosophy of the university of London, pp 7-9, (1986).

#### **ABSTRACT**

##### **Research on casting technology of 49K2ΦA alloy ingots for stator cores of small electric generators for military applications**

*In this paper, analysis and selection of technology and equipment for smelting 49K2ΦA alloy were conducted. Among the advanced smelting methods for 49K2ΦA alloy, smelting in a vacuum induction furnace is the most suitable, as it provides good control over the alloy's chemical composition and beneficial and harmful impurities. 49K2ΦA alloy ingots were made from technically pure Fe, Co, V and FeV80 master alloy with good quality and guaranteed chemical composition. The content of impurities (C, P, S) that adversely affect the magnetic properties of the alloy are all smaller than the Russian sample. Using industrial FeV80 master alloy for producing this alloy should be considered as it provides a slightly higher content of impurities with a lower cost of raw materials in comparison with using technically-purified vanadium.*

**Keywords:** Vacuum induction furnace; Soft magnetic alloy; 49K2ΦA alloy; Smelting equipment.