

THIẾT KẾ THÀNH PHẦN Ni/Sn VÀ TỐI ƯU HOÁ CÂN BẰNG ĐỘ BỀN - ĐỘ DẪN ĐIỆN HỢP KIM Cu-Ni-Sn DESIGN Ni/Sn RATIO AND OPTIMIZATION OF THE STRENGTH -ELECTRICAL CONDUCTIVITY BALANCE IN Cu-Ni-Sn ALLOYS

BÙI THỊ NGỌC MAI*, BÙI THỊ DIỆU THUY

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

**Email liên hệ: maibtn@vimaru.edu.vn*

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1046>

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của thành phần Ni-Sn và chế độ hoá già đến độ bền kéo và độ dẫn điện của hợp kim Cu-Ni-Sn. Các mẫu hợp kim với tỷ lệ Ni-Sn khác nhau được chế tạo, sau đó xử lý nhiệt, tôi, biến dạng và hoá già trong khoảng nhiệt độ 350-400°C với thời gian 1-2 giờ. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm với mô hình bề mặt đáp ứng được sử dụng để khảo sát đồng thời ảnh hưởng của thông số công nghệ gồm: Nhiệt độ và thời gian hoá già đến độ bền kéo và độ dẫn điện của hợp kim. Kết quả cho thấy cả hai yếu tố này đều tác động đáng kể đến các chỉ tiêu cơ tính và độ dẫn điện, và có tương tác với nhau. Trên cơ sở đó, các phương trình hồi quy tuyến tính bậc nhất được thiết lập để mô tả mối quan hệ giữa chế độ hoá già với giới hạn bền kéo và độ dẫn điện. Kết quả cho thấy điều kiện hoá già 350°C trong 2 giờ đối với hợp kim Cu-9Ni-3Sn cho sự cân bằng tốt nhất giữa hai đặc tính, với độ bền kéo đạt khoảng 1060MPa và độ dẫn điện đạt khoảng 14,08 %IACS. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế thành phần Ni/Sn và lựa chọn chế độ xử lý nhiệt nhằm tối ưu hóa đồng thời cơ tính và khả năng dẫn điện của hợp kim Cu-Ni-Sn.

Từ khóa: Hợp kim Cu-Ni-Sn, phân rã Spinodal, hoá già, giới hạn bền kéo, độ dẫn điện, quy hoạch thực nghiệm.

Abstract

This investigates the effects of Ni-Sn composition and aging conditions on the tensile strength and electrical conductivity of Cu-Ni-Sn alloys. Alloy grades with different Ni-Sn ratios were fabricated, then subjected to solution treatment, deformation, and aging at 350-400°C for 1-2 hours. A design of experiments approach was employed to evaluate the combined effects of aging temperature and

aging time on tensile strength and electrical conductivity. The results show that both factors significantly affect the mechanical and electrical properties of experimental data, first-order linear regression equations were established to describe the relationships between aging conditions, tensile strength, and electrical conductivity. The optimum balance between these two properties was obtained for the Cu-9Ni-3Sn alloy aged at 350°C for 2 hours, giving a tensile strength of about 1060MPa and an electrical conductivity of about 14.08 %IACS. These findings provide a scientific basis for designing the Ni/Sn ratio and selecting appropriate heat treatment conditions to simultaneously the alloys, with an interaction between them. Based on the optimize the mechanical properties and electrical conductivity of Cu-Ni-Sn alloys.

Keywords: Cu-Ni-Sn alloy, spinodal decomposition, aging treatment, tensile strength, electrical conductivity, design of experiments.

1. Mở đầu

Hợp kim Cu-Ni-Sn được hóa bền dựa trên sự kết hợp của hai quá trình chuyển pha khá đặc trưng là chuyển pha spinodal và chuyển pha trật tự hóa khi xử lý nhiệt. Một trong những điều kiện quan trọng nhất của chuyển biến spinodal đó là tính đồng nhất của vật liệu khi xử lý phân rã Spinodal. Tính đồng nhất của vật liệu khi xử lý phụ thuộc nhiều vào khả năng khuếch tán của các nguyên tố trong hệ hợp kim. Chuẩn bị tổ chức đồng nhất trước khi thực hiện chuyển biến spinodal là một điều kiện công nghệ quan trọng xác định chất lượng của hợp kim.

Độ dẫn điện của hợp kim Cu-Ni-Sn phụ thuộc chặt chẽ vào trạng thái phân bố nguyên tử hợp kim trong mạng tinh thể đồng. Theo lý thuyết electron gần tự do, điện trở suất của kim loại có thể được biểu diễn như

tổng của hai thành phần: Điện trở do tán xạ phonon phụ thuộc nhiệt độ và điện trở dư do tạp chất và khuyết tật mạng tinh thể [1]. Đối với hợp kim dung dịch rắn thay thế, điện trở dư tăng theo nồng độ nguyên tử hòa tan theo quan hệ parabol Nordheim[2], dưới dạng công thức:

$$\rho_{res} = Ac(1 - c) \quad (1)$$

Trong đó c là nồng độ nguyên tử hòa tan trong dung dịch rắn. Khi các nguyên tử hợp kim như Ni và Sn hòa tan trong mạng Cu , sự khác biệt về bán kính nguyên tử và điện thế hóa học giữa các nguyên tố gây ra sai lệch hằng số mạng và biến dạng mạng tinh thể cục bộ, làm tăng tán xạ electron dẫn và do đó làm giảm độ dẫn điện của vật liệu.

Trong các hợp kim hệ $Cu-Ni-Sn$, cả Ni và Sn đều hoà tan thay thế trong mạng tinh thể lập phương tâm diện (FCC) của Cu . Do đó, tổng hàm lượng nguyên tử hợp kim hoá là yếu tố chi phối mạnh đến %IACS [3].

Theo các nghiên cứu của Cahn (1961) [4], quá trình phân rã spinodal xảy ra khi dung dịch rắn không ổn định về mặt nhiệt động học, dẫn đến sự hình thành các vùng điều biến thành phần ở kích thước nano mà không cần cơ chế tạo mầm. Đối với hệ hợp kim $Cu-Ni-Sn$, các nghiên cứu của Zhao và cộng sự (2003) [5] cũng như Jiang và cộng sự [6] cho thấy quá trình hoá già dẫn đến sự hình thành các vùng giàu $Ni-Sn$ và nghèo $Ni-Sn$ trong nền Cu , tạo ra trường ứng suất đàn hồi và làm tăng đáng kể độ bền của vật liệu. Ngoài ra, S. Ilangoan [7] đã chỉ ra rằng sự phát triển tiếp theo của các pha trật tự hóa từ cấu trúc spinodal ban đầu có ảnh hưởng quan trọng đến sự cân bằng giữa độ bền và độ dẫn điện của hợp kim.

Trong một nghiên cứu về hợp kim $Cu-9Ni-3Sn$ [10], tác giả đã áp dụng quy hoạch thực nghiệm và phương pháp bề mặt đáp ứng để đánh giá ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian hoá già đến cơ tính của vật liệu. Kết quả cho thấy chế độ hoá già tối ưu là $354^{\circ}C$ trong 2,5 giờ, tại đó hợp kim đạt độ bền kéo và độ dẻo tương đối cao. Đồng thời, nghiên cứu cho thấy quá trình hoá già góp phần cải thiện cơ tính thông qua sự thay đổi tổ chức tế vi và trạng thái mạng tinh thể của hợp kim.

2. Đối tượng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Thiết kế thực nghiệm

Việc lựa chọn các thành phần $Cu-9Ni-3Sn$, $Cu-9Ni-6Sn$, $Cu-7Ni-7Sn$ và $Cu-15Ni-8Sn$ được xây dựng trên cơ sở phân tích đồng thời 3 yếu tố chi phối tính chất của hợp kim $Cu-Ni-Sn$: (i) động lực nhiệt động của phân rã Spinodal, (ii) ảnh hưởng của tổng

hàm lượng nguyên tố hợp kim hoá đến tán xạ điện tử, và (iii) vai trò của tỷ lệ $Ni-Sn$ đối với cơ chế hoá bền và dẫn điện. Các mẫu được ký hiệu lần lượt là C1, C2, C3, C4.

Mẫu sau đúc được ủ đồng đều hóa + tôi ở $800^{\circ}C$; sau đó được biến dạng nguội với mức độ biến dạng 40% và hoá già ở các khoảng nhiệt độ và thời gian khác nhau.

Nhiệt độ hoá già được thực hiện khảo sát 2 chế độ là $350^{\circ}C$ và $400^{\circ}C$, giữ nhiệt lần lượt trong 1 giờ và 2 giờ.

Như vậy, các biến số được chọn để tối ưu hóa bao gồm thành phần $Ni-Sn$, nhiệt độ hoá già và thời gian hoá già. Kết quả nghiên cứu lựa chọn được tỷ lệ $Ni-Sn$ kết hợp với chế độ hoá già phù hợp nhất để cân bằng độ bền và độ dẫn điện.

Xác định 4 yếu tố đầu vào gồm A: Thành phần (4 mức), B: Nhiệt độ (2 mức), C: Thời gian (2 mức). Hai yếu tố đầu ra gồm giới hạn bền kéo (σ_b , MPa) và độ dẫn điện (% IACS)

Như vậy thực nghiệm cần thực hiện trên 16 mẫu được trình bày như Bảng 1.

Bảng 1. Các mẫu thí nghiệm cần khảo sát

STT	Mẫu	T, °C	t, h	σ_b , MPa	% IACS
1	C1	350	1		
2	C1	350	2		
3	C1	400	1		
4	C1	400	2		
5	C2	350	1		
6	C2	350	2		
7	C2	400	1		
8	C2	400	2		
9	C3	350	1		
10	C3	350	2		
11	C3	400	1		
12	C3	400	2		
13	C4	350	1		
14	C4	350	2		
15	C4	400	1		
16	C4	400	2		

2.2. Thực hiện thí nghiệm và phương pháp phân tích

Bài toán tối ưu được xây dựng dựa trên phương trình hồi quy, được xác định qua phương pháp quy hoạch thực nghiệm với mô hình bề mặt đáp ứng (RSM - Response Surface Methodology) kết hợp với thiết kế trung tâm hỗn hợp (CCD - Central Composite Design).

Phương trình này mô tả mối quan hệ giữa các yếu tố xử lý nhiệt và các đặc trưng về giới hạn bền kéo σ_b và độ dẫn điện IACS trong phạm vi khảo sát.

Phần mềm Design-Expert 11 được sử dụng để mô hình hóa thí nghiệm, phân tích kết quả thực nghiệm theo mô hình, xây dựng phương trình hồi quy và giải quyết bài toán tối ưu. Kết quả các thí nghiệm cần xây dựng được thể hiện trong Bảng 3.

Hợp kim sau nấu được phân tích thành phần trên máy phân tích kim loại Foundry Master của Viện Tên lửa từ đó điều chỉnh phối liệu để nấu được thành phần mong muốn (Bảng 2).

Bảng 2. Thành phần hợp kim sau nấu

Tên	Cu	Zn	Pb	Sn	Ni	Khác
C1	88.5	0.08	0.005	2.99	8.27	-
C2	83.6	0.04	0.005	6.36	9.71	-
C3	85	<0.007	<0.005	7.26	7.34	-
C4	75.2	-	-	15.4	8.95	-

Mẫu sau khi hoá già ở các chế độ khác nhau được tiến hành thử kéo trên thiết bị thử kéo WP300.

Đo độ dẫn điện hợp kim với mẫu dây dạng tám, Thí nghiệm được thực hiện tại phòng thí nghiệm Viện Tên lửa trên máy đo cầu RLC LEADER (Nhật Bản).

Phân tích tổ chức tế vi được tiến hành trên kính hiển vi quang học, hiển vi điện tử quét SEM.

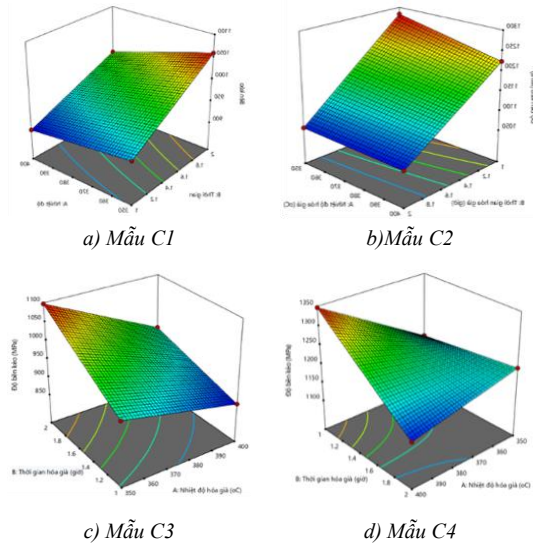
Bảng 3. Kết quả thực nghiệm

STT	Mẫu	T, °C	t, h	σ_b , MPa	%IACS
1	C1	350	1	932	13.84
2	C1	350	2	1060	14.08
3	C1	400	1	903	14.08
4	C1	400	2	991	12.5
5	C2	350	1	1282	8.24
6	C2	350	2	1060	8.4
7	C2	400	1	1224	8.4
8	C2	400	2	1056	7.43
9	C3	350	1	944.4	7.5
10	C3	350	2	1097.5	7.9
11	C3	400	1	873.7	7.1
12	C3	400	2	949.3	7.05
13	C4	350	1	1174.96	7.05
14	C4	350	2	1205	7.6
15	C4	400	1	1347	7.65
16	C4	400	2	1140	7.8

3. Kết quả thực nghiệm và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng của thông số hoá già đến độ bền kéo

Kết quả đo độ bền kéo σ_b của các hợp kim Cu-Ni-Sn sau quá trình hoá già được phân tích thông qua bề mặt đáp ứng nhằm đánh giá ảnh hưởng của hai thông số công nghệ chính là nhiệt độ (T, °C - A) và thời gian (t, giờ - B). Quan sát các bề mặt đáp ứng cho thấy độ bền kéo của các hợp kim phụ thuộc rõ rệt vào chế độ



Hình 1. Đồ thị ảnh hưởng của nhiệt độ (T, °C) và thời gian (t, h) hoá già đến độ bền kéo của các mẫu

hoá già, trong đó cả nhiệt độ và thời gian đều ảnh hưởng đáng kể đến quá trình hóa bền của vật liệu (Hình 1).

Đối với hợp kim C1, độ bền kéo tăng khi thời gian hoá già tăng từ 1 giờ lên 2 giờ ở nhiệt độ 350°C. Tuy nhiên khi nhiệt độ tăng lên 400°C, độ bền có xu hướng giảm nhẹ. Điều này cho thấy quá trình hóa bền chủ yếu xảy ra ở nhiệt độ thấp hơn, nơi quá trình khuếch tán nguyên tử diễn ra với tốc độ vừa phải, tạo điều kiện cho sự phát triển ổn định của cấu trúc điều biến do phân rã spinodal.

Ở hợp kim C2, xu hướng biến thiên của độ bền kéo có sự khác biệt. Khi nhiệt độ hoá già tăng, độ bền có xu hướng giảm, trong khi ảnh hưởng của thời gian hoá già thể hiện rõ hơn.

Đối với hợp kim C3, xu hướng biến thiên của độ bền kéo có phần khác biệt so với các mẫu hợp kim còn lại. Độ bền tăng khi thời gian hoá già tăng ở nhiệt độ thấp, nhưng giảm mạnh khi nhiệt độ hoá già tăng lên 400°C. Sự khác biệt này có thể liên quan đến tỷ lệ Ni/Sn gần cân bằng trong thành phần hợp kim, làm thay đổi

động học phân rã spinodal và khả năng duy trì trạng thái ứng suất đàn hồi đồng bộ trong mạng tinh thể.

Trong khi đó, hợp kim C4 cho thấy độ bền kéo đạt giá trị cao ở vùng nhiệt độ thấp và thời gian hoá già ngắn, sau đó giảm dần khi nhiệt độ tăng. Xu hướng này phù hợp với cơ chế hóa bền của hệ hợp kim Cu-Ni-Sn, trong đó cấu trúc spinodal và các pha trật tự hình thành ở nhiệt độ trung bình nhưng có thể bị thô hóa khi nhiệt độ tăng cao.

Để lượng hóa ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ bền kéo, dữ liệu thực nghiệm được xử lý bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm và xây dựng mô hình hồi quy tuyến tính bậc nhất có tương tác, có dạng tổng quát:

$$\sigma_b = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 B + \beta_3 AB \quad (2)$$

Trong đó A là nhiệt độ hoá già, B là thời gian hoá già và AB là thành phần tương tác giữa 2 yếu tố.

Trong mô hình trên, hệ số β_1 , β_2 phản ánh mức độ ảnh hưởng riêng biệt của nhiệt độ và thời gian hoá già đến giới hạn bền kéo σ_b . Sự thay đổi nhiệt độ hoá già làm thay đổi tốc độ khuếch tán nguyên tử trong dung dịch rắn quá bão hòa, từ đó ảnh hưởng đến quá trình hình thành và phát triển cấu trúc đặc trưng của phân rã spinodal. Hệ số β_3 cho thấy 2 yếu tố nhiệt độ và thời gian hoá già không tác động độc lập mà có sự tương tác lẫn nhau. Do đó, việc tối ưu hóa cơ tính của hợp kim không thể chỉ dựa trên một thông số công nghệ riêng lẻ mà cần xem xét đồng thời tổ hợp giữa nhiệt độ và thời gian hoá già.

Phương trình hồi quy giới hạn bền kéo các mẫu lần lượt theo công thức:

$$C1: \sigma_{b1} = 727 + 0,22A + 408B - 0,8AB$$

$$C2: \sigma_{b2} = 2288 - 2,24A - 600B + 1,08AB$$

$$C3: \sigma_{b3} = 743,7 + 0,136A + 695,6B + \beta_3 AB$$

$$C4: \sigma_{b4} = -1718,64 + 8,18A + 1689,3B - 4,74AB$$

Kết quả phân tích cho thấy sự khác biệt về dấu và độ lớn của các hệ số hồi quy phản ánh rõ vai trò của thành phần hợp kim đối với động học phân rã spinodal và quá trình thô hóa tiếp theo. Đối với phương trình σ_{b1} hợp kim C1, cho thấy hệ số của nhiệt độ (0,22) dương nhưng nhỏ, trong khi hệ số của thời gian (408) dương và lớn hơn rõ rệt. Điều này chứng tỏ trong miền khảo sát, độ bền kéo của C1 nhạy với thời gian hoá già hơn là với nhiệt độ. Nói cách khác, sự phát triển cấu trúc điều biến trong hợp kim Cu-9Ni-3Sn diễn ra tương đối chậm và cần thời gian để đạt hiệu quả hóa bền rõ rệt. Tuy nhiên, hệ số tương tác âm (-0,8AB) cho thấy khi nhiệt độ tăng, lợi ích do kéo dài thời gian bị suy giảm. Xu hướng này phù hợp với số liệu thực nghiệm, trong đó C1 đạt giá trị cao nhất tại 350°C - 2

giờ, còn ở 400°C hiệu quả tăng bền không còn rõ rệt. Mẫu C4 cho thấy tiềm năng về độ bền, nhưng do hàm lượng Sn cao, mẫu này có khả năng nhạy hơn với xu hướng hoá hoặc suy giảm tính công nghệ.

Phân tích tương tự đối với các phương trình hồi quy của 3 mẫu còn lại C2, C3, C4. Các phương trình hồi quy cho thấy cả nhiệt độ và thời gian hoá già đều ảnh hưởng đáng kể đến độ bền kéo của hợp kim, đồng thời sự tồn tại của thành phần tương tác AB trong tất cả các mẫu hợp kim chứng tỏ hiệu ứng của hai thông số công nghệ không độc lập mà có sự phụ thuộc lẫn nhau. Điều này phản ánh bản chất động học phức tạp của quá trình hóa bền trong hệ hợp kim Cu-Ni-Sn, trong đó sự phát triển của cấu trúc spinodal, sự hình thành pha trật tự và quá trình thô hóa vi cấu trúc đều chịu ảnh hưởng đồng thời của nhiệt độ và thời gian hoá già.

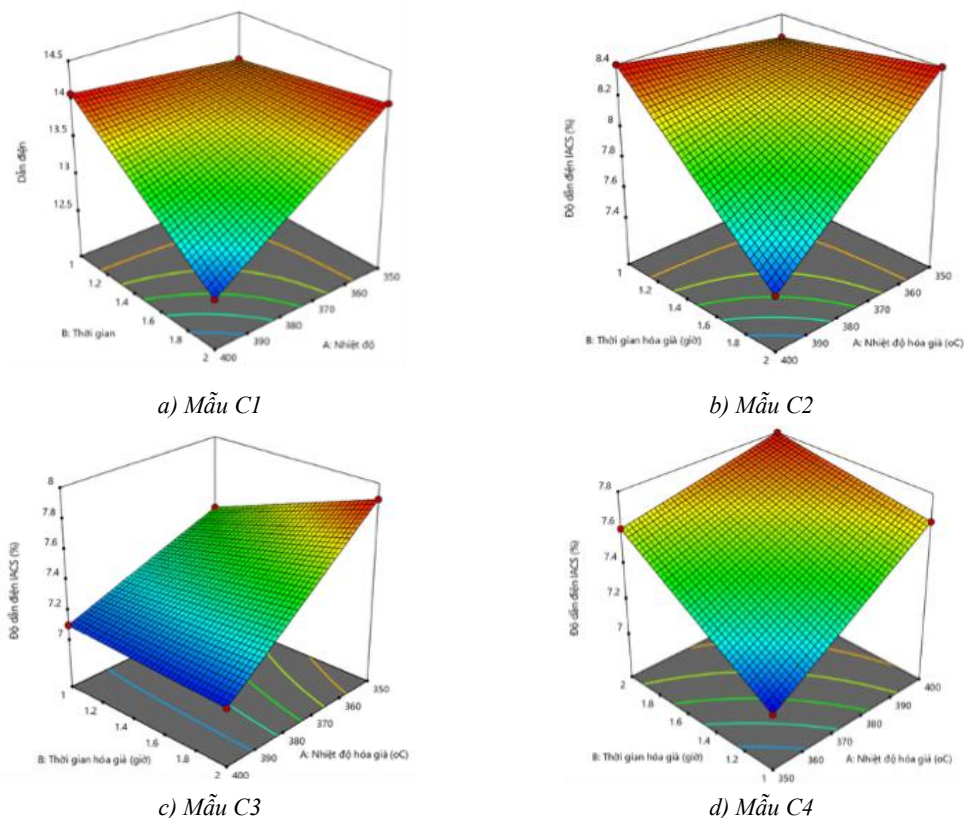
Ở 400°C, tốc độ khuếch tán của Ni và Sn tăng lên đáng kể, làm cho tổ chức tế vi đặc trưng hình thành trong giai đoạn đầu của phân rã Spinodal phát triển nhanh hơn nhưng đồng thời kích thước các hạt tinh thể có xu hướng tăng lên, từ đó làm giảm hiệu quả cản trở chuyển động lệch. Vì vậy, độ bền kéo giảm nhẹ so với điều kiện 350°C - 2 giờ, là chế độ cho cân bằng tốt hơn giữa hình thành cấu trúc hóa bền và hạn chế thô hóa.

3.2. Ảnh hưởng của thông số công nghệ nhiệt luyện hoá già đến độ dẫn điện hợp kim

Bên cạnh giới hạn bền kéo σ_b , độ dẫn điện IACS cũng là một chỉ tiêu quan trọng đối với hợp kim Cu-Ni-Sn, đặc biệt trong các ứng dụng yêu cầu đồng thời độ bền cao và khả năng dẫn điện tốt. Như đã biết, quá trình hoá già không chỉ ảnh hưởng đến cơ chế hóa bền mà còn làm thay đổi trạng thái phân bố nguyên tử trong dung dịch rắn, từ đó tác động trực tiếp đến khả năng dẫn điện của vật liệu. Do đó, việc khảo sát ảnh hưởng của các thông số hoá già đến độ dẫn điện có ý nghĩa quan trọng trong việc chọn mẫu tối ưu 2 thông số đầu ra.

Hình 2 trình bày bề mặt đáp ứng mô tả sự phụ thuộc của độ dẫn điện vào nhiệt độ hoá già (A) và thời gian hoá già (B) đối với bốn mẫu hợp kim khảo sát.

Quan sát các bề mặt đáp ứng cho thấy độ dẫn điện của các hợp kim có xu hướng biến thiên theo chế độ hoá già, tuy nhiên mức độ ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian khác nhau giữa các mẫu hợp kim. Đối với hợp kim C1 và C2, độ dẫn điện đạt giá trị cao hơn ở vùng nhiệt độ thấp và thời gian hoá già ngắn, sau đó giảm khi nhiệt độ và thời gian tăng. Xu hướng này có thể liên quan đến sự gia tăng tán xạ điện tử do sự phát triển của các vùng điều biến thành phần và sự hình thành các pha trung gian trong quá trình hoá già.



Hình 2. Đồ thị ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian hóa già đến độ dẫn điện của các mẫu hợp kim

Đối với hợp kim C4, độ dẫn điện biến thiên tương đối ổn định trong khoảng nhiệt độ khảo sát, cho thấy cấu trúc vi mô của hợp kim này ít nhạy cảm hơn với sự thay đổi của chế độ hoá già.

Trong khi đó, hợp kim C3 thể hiện xu hướng biến thiên khác biệt so với các mẫu còn lại. Độ dẫn điện có xu hướng giảm khi nhiệt độ hoá già tăng, đồng thời thay đổi không tuyến tính theo thời gian hoá già. Sự khác biệt này có thể liên quan đến tỷ lệ $Ni/Sn \approx 1$, làm thay đổi động học phân rã spinodal và quá trình phân bố lại các nguyên tử Ni và Sn trong mạng tinh thể.

Tương tự như đối với độ bền kéo, dữ liệu thực nghiệm về độ dẫn điện được xử lý bằng phương pháp hồi quy tuyến tính bậc nhất có tương tác giữa nhiệt độ và thời gian hoá già, theo dạng phương trình tổng quát:

$$C1: IACS_1 = -0,82 + 0,0412A + 12,98B - 0,0364AB$$

$$C2: IACS_2 = -0,95 - 0,0258A + 8,07B - 0,0226AB$$

$$C3: IACS_3 = 6,75 + 0,001A + 3,35B - 0,009\beta_3AB$$

$$C4: IACS_4 = -0,5 + 0,02A + 3,35B - 0,008AB$$

Đối với hợp kim C3, xu hướng biến thiên của độ dẫn điện có sự khác biệt so với các mẫu hợp kim còn lại. Điều này có thể liên quan đến tỷ lệ Ni/Sn gần cân bằng trong thành phần hợp kim, làm thay đổi điều kiện nhiệt động của quá trình phân rã spinodal và động học

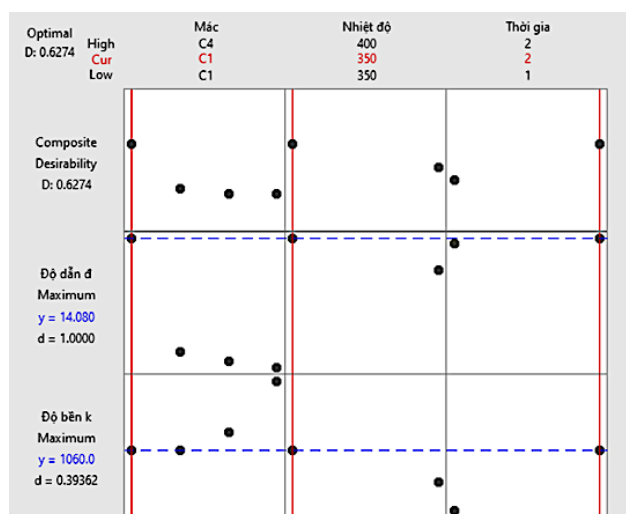
khuyết tán của các nguyên tử hợp kim. Sự thay đổi này ảnh hưởng đến quá trình phân bố lại nguyên tử trong mạng tinh thể và do đó dẫn đến xu hướng biến thiên độ dẫn điện khác so với các hợp kim còn lại.

Nhìn chung, sự biến thiên của độ dẫn điện theo chế độ hoá già phản ánh sự cạnh tranh giữa hai cơ chế chính: (i) sự giảm tán xạ electron do các nguyên tử hợp kim tách khỏi dung dịch rắn và (ii) sự gia tăng tán xạ electron do sự phát triển của cấu trúc điều biến và các pha trung gian trong quá trình hoá già. Việc lựa chọn chế độ hoá già phù hợp do đó đóng vai trò quan trọng trong việc đạt được sự cân bằng tối ưu giữa độ bền cơ học và độ dẫn điện của hợp kim Cu-Ni-Sn.

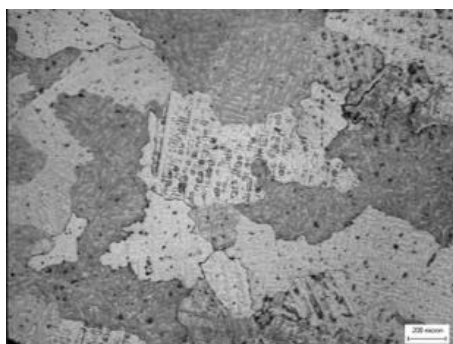
3.3. Cân bằng độ bền kéo và độ dẫn điện hợp kim Cu-Ni-Sn

Giá trị tối ưu cho độ bền kéo và độ dẫn điện, sử dụng modul Response Optimizer trong Minitab 21 với hàm hồi quy xây dựng được, thông số hoá già tương ứng với mẫu vật liệu cho độ bền kéo và độ dẫn điện tốt nhất được thể hiện trong Hình 3.

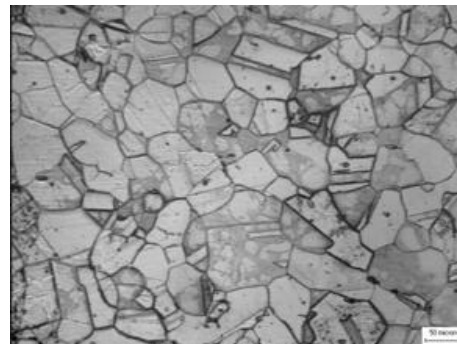
Từ biểu đồ (Hình 3), bộ thông số tốt nhất để cân bằng giữa độ bền kéo và độ dẫn điện được xác định là mẫu vật liệu C1, hoá già tại nhiệt độ 350°C trong thời gian 2 giờ với giá trị của hàm mong muốn tổng thể



Hình 3. Biểu đồ giá trị tối ưu cho hai đáp ứng là độ bền kéo và độ dẫn điện



a) Hợp kim sau đúc



b) Hợp kim sau hoá già 350°C, 2 giờ

Hình 4. Tổ chức tế vi hợp kim Cu-9Ni-3Sn

(Composite Desirability) đạt $D=0,6274$. Ở điều kiện này, mô hình dự đoán độ dẫn điện đạt khoảng 14,08 %IACS, trong khi độ bền kéo đạt khoảng 1060MPa. Giá trị hàm mong muốn của độ dẫn điện đạt $d=1,0$, cho thấy đây là điều kiện tối ưu cho khả năng dẫn điện trong phạm vi khảo sát. Trong khi đó, giá trị hàm mong muốn của độ bền kéo đạt $d=0,3936$, phản ánh sự đánh đổi nhất định giữa hai đặc tính khi thực hiện tối ưu hóa đồng thời cho thấy sự kết hợp này mang lại hiệu quả khá tốt trong việc cân bằng giữa hai đáp ứng có xu hướng trái ngược nhau.

Ngược lại, khi nhiệt độ hoá già tăng lên 400°C, tốc độ khuếch tán của các nguyên tử Ni và Sn tăng mạnh, thúc đẩy sự phát triển và thô hóa của các vùng điều biến thành phần. Quá trình này không chỉ làm giảm hiệu quả hoá bền mà còn tạo ra nhiều biên pha và vùng biến dạng mạng, dẫn đến sự gia tăng tán xạ electron và làm giảm độ dẫn điện của vật liệu.

Việc ưu tiên tối đa hoá độ dẫn điện đang làm giảm khả năng đạt tới độ bền kéo lý tưởng hơn của vật liệu. Xu hướng biến thiên của các đáp ứng cho thấy mức

C1 vượt trội hơn hẳn các mức C2, C3, C4 trong việc duy trì đồng thời cả hai đặc tính. Nhiệt độ 350°C đóng vai trò ảnh hưởng lớn để giữ độ dẫn điện ở mức cao, vì khi tăng lên 400°C, độ dẫn điện có xu hướng giảm mạnh. Trong khi đó, việc kéo dài thời gian lên 2 giờ cho thấy hiệu quả khi cải thiện độ bền kéo. Như vậy bộ thông số nhiệt luyện hoá già mẫu C1:350°C; 2 giờ cho kết quả tổng hợp hợp lý nhất để đảm bảo chất lượng tổng thể.

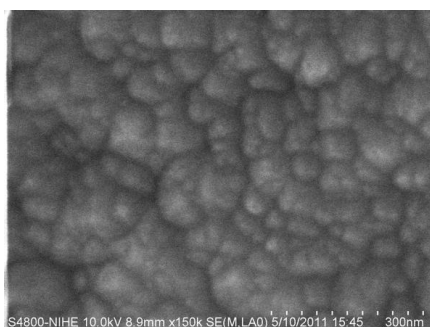
3.4. Phân tích tổ chức tế vi và giá trị cơ tính

a) Tổ chức tế vi

Kết quả ảnh tổ chức (Hình 4) cho thấy kích thước hạt sau đúc khá thô khoảng $200\mu\text{m}$. Kích thước các hạt sau đúc thường thô do quá trình kết tinh khi đúc gây nên.

Tổ chức sau đúc có thiên tích nhánh cây, đây là dạng thiên tích thường gặp khi nấu đúc. Hạt tinh thể sau hoá già đã có sự giảm kích thước rõ rệt (khoảng $70-80\mu\text{m}$). Hạt đồng đều và tròn cạnh hơn. Kích thước hạt giảm được giải thích là do có sự tiết pha và phân

hóa dẫn đến sự chia tách của hạt khiến cho kích thước hạt giảm đi, có xuất hiện song tinh là kết quả tạo ra bởi nguyên công tôi và thường xuất hiện trong một số hợp kim đồng. Điều này cho thấy sau khi hoá già đã có sự sắp xếp lại thành phần ở quy mô nhỏ trong toàn bộ tổ chức của vật liệu.



Hình 5. Hợp kim Cu-9Ni-3Sn biến dạng + tôi I + hoá già 350°C, 2 giờ

Ảnh hiển vi điện tử quét-SEM (Hình 5) ở độ phóng đại $\times 150k$ hợp kim Cu-9Ni-3Sn sau tôi đồng nhất, cán, hoá già 350°C - 2 giờ cho thấy có thể quan sát thấy vi cấu trúc của hợp kim gồm các vùng tương phản sáng - tối phân bố tương đối đồng đều trong toàn bộ nền vật liệu, tổ chức tế vi gồm các hạt nhỏ mịn. Cấu trúc này được hình thành do quá trình phân rã spinodal của dung dịch rắn siêu bão hòa, trong đó các nguyên tử Ni và Sn tách khỏi dung dịch rắn nền Cu và tạo thành các vùng giàu và nghèo nguyên tố hợp kim với sự phân bố tuần hoàn trong mạng tinh thể. Ngoài ra, sự phân bố tương đối đồng đều của các vùng cấu trúc trong toàn bộ nền hợp kim cho thấy quá trình tôi dung dịch và hoá già đã được thực hiện hiệu quả, đảm bảo sự phân tán đồng nhất của các nguyên tử hợp kim trước khi xảy ra quá trình phân tách thành phần.

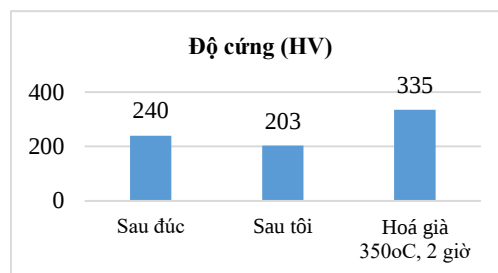
Kết quả đo độ cứng tế vi của hợp kim Cu-9Ni-3Sn ở các trạng thái xử lý khác nhau cho thấy sự thay đổi rõ rệt theo quá trình xử lý nhiệt (Bảng 4).

Bảng 4. Độ cứng tế vi hợp kim Cu-9Ni-3Sn

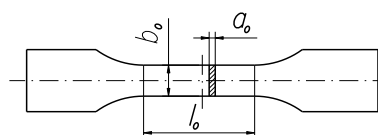
Chế độ mẫu	Độ cứng (HV)
Sau đúc	240
Sau tôi	203
Hoá già 350°C, 2 giờ	335

Đồ thị độ cứng tế vi hợp kim (Hình 6) chỉ ra rằng, ở trạng thái sau đúc, độ cứng đạt khoảng 240HV, phản ánh tổ chức đúc với các pha phân bố không đồng đều và sự tồn tại của ứng suất dư trong vật liệu. Sau quá trình tôi dung dịch, độ cứng giảm xuống còn 203HV do các pha thứ cấp được hòa tan vào dung dịch rắn, làm giảm hiệu ứng hóa bền kết tủa và tạo nên tổ chức

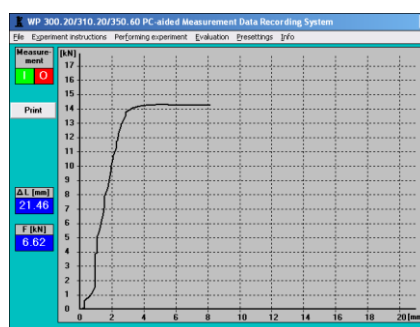
dung dịch rắn quá bão hòa tương đối đồng nhất. Sau khi hoá già ở 350°C trong 2 giờ, độ cứng tăng mạnh lên 335HV. Sự gia tăng đáng kể này liên quan đến quá trình phân rã spinodal và sự hình thành các vùng điều biến giàu Ni-Sn trong nền Cu, tạo ra các trường ứng suất đàn hồi cục bộ và cản trở mạnh chuyển động của lệch mạng. Đồng thời, sự phát triển của các pha trật tự hóa kích thước nano trong quá trình hoá già cũng góp phần làm tăng hiệu quả cơ chế hoá bền.



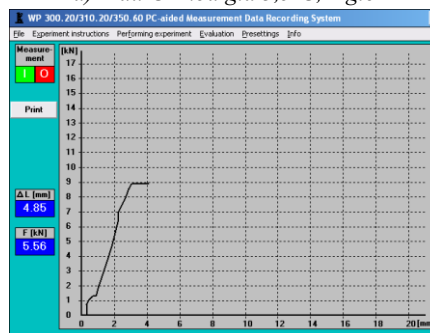
Hình 6. Đồ thị độ cứng tế vi hợp kim



Hình 7. Mẫu thử kéo



a) Mẫu C1 hoá già 3,5°C, 1 giờ



b) Mẫu C1 hoá già 3,5°C, 2 giờ

Hình 8. Giảm đồ kéo mẫu C1

Phân tích, đánh giá kết quả tăng bền của hợp kim qua xử lý nhiệt được thực hiện đo độ bền kéo trên máy WP 300. Mẫu được chế tạo theo TCVN 197-1:2014 (tương đương ISO 6892-1:2009) với các thông

số được thể hiện trên Hình 7.

Trong đó: l_0 , a_0 , b_0 : Chiều dài, chiều rộng, và chiều dày ban đầu của mẫu.

Độ bền kéo mẫu C1-a: $\sigma_{b1} = 932\text{MPa}$;

Độ bền kéo mẫu C1-b: $\sigma_b = 1060\text{MPa}$.

4. Kết luận

Bài báo đã nghiên cứu ảnh hưởng của tỷ lệ Ni/Sn và chế độ hoá già đến độ bền kéo và độ dẫn điện của hợp kim Cu-Ni-Sn bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm. Kết quả cho thấy nhiệt độ và thời gian hoá già đều ảnh hưởng đáng kể đến các tính chất của hợp kim và tồn tại sự tương tác giữa hai thông số này. Các mô hình hồi quy tuyến tính được xây dựng cho phép mô tả và dự đoán sự phụ thuộc của độ bền kéo và độ dẫn điện vào chế độ xử lý nhiệt.

Mẫu thí nghiệm nhận định ở chế độ tối ưu tới 2 tham số $T, ^\circ\text{C}=350^\circ\text{C}$ và $t=2$ giờ đối với hợp kim Cu-9Ni-3Sn (Mẫu C1) cho sự cân bằng tốt nhất giữa hai đặc tính, với độ bền kéo khoảng 1060MPa và độ dẫn điện khoảng 14,08 %IACS.

Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở cho việc thiết kế thành phần Ni/Sn và lựa chọn chế độ hoá già phù hợp nhằm tối ưu hóa đồng thời cơ tính và độ dẫn điện của hợp kim Cu-Ni-Sn.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.49**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Davis, J. R. (Ed.). (2001), *Copper and copper alloys*, ASM International.
- [2] Nordheim, L. (1931), *Zur Elektronentheorie der Metalle*. Annalen der Physik, Vol.401(3), pp.607-640.
- [3] C. Le Thi, T. S. Manh, N. N. Duong, and K. P. Mai (2016), *The Effect of Deformation on Microstructure of Cu-Ni-Sn Aging Alloy*, Key Eng. Mater., Vol.682, pp.113-118.

- [4] Cahn, J. W. (1961), On spinodal decomposition. Acta Metallurgica, Vol.9(9), pp.795-801.
Doi: 10.1016/0001-6160(61)90182-1.
- [5] Chao Zhao, Li Daoxi, (2018), *A low Sn content Cu-Ni-Sn alloy with high strength and good ductility*, Materials Science and Engineering A 746.
Doi: 10.1016/j.msea.2018.12.120.
- [6] Y. Jiang, Z. Li, Z. Xiao, Y. Xing, Y. Zhang, and M. Fang (2019), Microstructure and Properties of a Cu-Ni-Sn Alloy Treated by Two-Stage Thermomechanical Processing, JOM, Vol.71, No.8.
Doi: 10.1007/s11837-019-03606-5.
- [7] S. Ilangoan, R. Vaira Vignesh, R. Padmanaban, and J. Gokulachandran (2019), *Effect of composition and aging time on hardness and wear behavior of Cu-Ni-Sn spinodal alloy*, J. Cent. South Univ., Vol.26, No.10.
Doi: 10.1007/s11771-019-4200-x.
- [8] GS. Đỗ Minh Nghiệp, PGS. Trần Quốc Thắng (2012), *Độ dẻo và độ bền kim loại*. NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
- [9] M. Kato, S. Katsuka, S. Okamine, and A. Sato (1986), *Deformation behaviour and microstructure of Cu-10Ni-6Sn spinodal alloy single crystals*, Mater. Sci. Eng., Vol.77, no. C.
Doi: 10.1016/0025-5416(86)90357-5.
- [10] Bùi Thị Ngọc Mai (2025), *Nghiên cứu tối ưu hoá chế độ hoá già hợp kim đồng có độ bền cao*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 82 (04/2025), tr.85-90.

Ngày nhận bài:	11/03/2026
Ngày nhận bản sửa:	08/04/2026
Ngày duyệt đăng:	09/04/2026