TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X, e-ISSN: 3093-3161
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
-JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY-

NGHIÊN CỨU NÂNG CAO ĐỘ BỀN CỦA HỢP KIM NHÔM B95 BẰNG CÔNG NGHỆ GIA CÔNG CƠ - NHIỆT

RESEARCH ON IMPROVING THE STRENGTH OF B95 ALUMINUM ALLO BY THERMO-MECHANICAL PROCESSING

TRẦN THỊ THANH VÂN

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: vanttt.vck@vimaru.edu.vn

DOI: https://doi.org/10.65154/jmst.957

Tóm tắt

Hợp kim nhôm độ bền cao hệ Al-Zn-Mg-Cu, tiêu biểu là hợp kim B95 (tương đương 7075), được sử dụng rộng rãi trong các ngành cơ khí và công nghiệp với yêu cầu cao về khả năng chịu lực. Tuy nhiên, sản phẩm hợp kim nhôm B95 chế tạo trong nước hiện vẫn chưa đạt được cơ tính tối ưu. Trên thế giới, nhiều hướng nghiên cứu đã tập trung vào hợp kim hóa vi lượng và xử lý nhiệt, song phương pháp kết hợp gia công cơ học và nhiệt luyện (cơ - nhiệt) nhằm nâng cao cơ tính hợp kim vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ, đặc biệt tại Việt Nam. Nghiên cứu này hướng tới khảo sát ảnh hưởng của các thông số công nghệ cơ - nhiệt đến tổ chức và cơ tính của hợp kim nhôm B95, từ đó đề xuất quy trình tối ưu nhằm tăng độ bền, độ cứng và khả năng ứng dụng của hợp kim trong các chi tiết chịu tải trọng cao, đặc biệt là trong các chi tiết cơ khí, hàng không, vũ trụ. Kết quả nghiên cứu có ý nghĩa khoa học và thực tiễn, góp phần hoàn thiện công nghệ sản xuất vật liệu nhôm độ bền cao trong nước.

Từ khóa: *Hợp kim nhôm độ bền cao, gia công cơ nhiệt, nhiệt luyện, hóa già.*

Abstract

High-strength aluminum alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system, typified by the B95 alloy (equivalent to 7075), are widely used in mechanical engineering and industrial applications that require superior load-bearing capacity. However, domestically produced B95 aluminum alloy products have not yet achieved optimal mechanical properties. Internationally, extensive research has focused on microalloying and heat treatment to enhance alloy performance; nevertheless, the combined approach of mechanical deformation and heat treatment (thermo-mechanical processing) aimed at improving mechanical properties has not been sufficiently investigated, particularly in Vietnam. This study aims to examine the effects of thermo-mechanical processing parameters on the microstructure and mechanical properties of B95 aluminum alloy, thereby proposing an optimized processing route to enhance strength, hardness, and overall applicability of the alloy in high-load-bearing components, especially in mechanical, aerospace, and space engineering applications. The research outcomes are expected to have both scientific and practical significance, contributing to the advancement and refinement of high-strength aluminum alloy production technologies in Vietnam.

Keywords: *High-strength aluminum alloys, thermal-mechanical processing, heat treatment, aging.*

1. Mở đầu

Hợp kim nhôm được sử dụng rộng rãi trong các lĩnh vực cơ khí và công nghiệp nhờ tỷ số bền riêng cao, khả năng chống ăn mòn tốt, khối lượng nhẹ, dễ gia công và chi phí hợp lý, đặc biệt trong ngành ô tô và hàng không vũ trụ [1]. Trong nhóm hợp kim nhôm biến dạng độ bền cao, hợp kim B95 (tương đương mác 7075) thuộc hệ Al-Zn-Mg-Cu được ứng dụng phổ biến cho các chi tiết chịu tải lớn, yêu cầu độ bền và độ cứng cao.

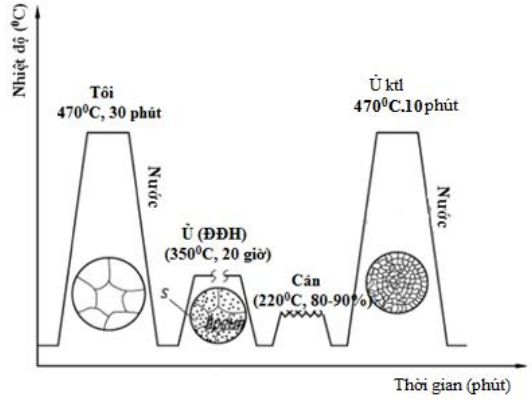
Nhiều nghiên cứu trên đã tập trung vào việc nâng cao cơ tính hợp kim B95 thông qua tối ưu hóa quy trình công nghệ. Tiêu biểu, các công trình của Doan et al. (2023) cho thấy phương pháp cơ - nhiệt luyện kết hợp hóa già, khi được tối ưu bằng thiết kế thí nghiệm Taguchi, có thể nâng cao đáng kể độ bền kéo và độ bền chảy của hợp kim B95. Kết quả chỉ ra rằng mức độ biến dạng dẻo trước hóa già là yếu tố chi phối, do làm tăng mật độ lệch và thúc đẩy sự hình thành các pha hóa bền phân tán mịn (η', η) trong nền dung dịch rắn α-Al [4].

Bên cạnh đó, các nghiên cứu về khả năng biến dạng ở nhiệt độ cao của hợp kim hệ Al-Zn-Mg-Cu,

TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X, e-ISSN: 3093-3161
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY

điển hình là công trình của Nguyen et al. (2022), đã làm rõ ảnh hưởng của nhiệt độ và tốc độ biến dạng đến sự phân bố chiều dày và tính ổn định hình học của sản phẩm nhôm tấm tạo hình siêu dẻo. Các kết quả này khẳng định rằng lịch sử biến dạng và trạng thái tổ chức tế vi trước và sau biến dạng có ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng tạo hình và cơ tính của vật liệu [5].

Tại Việt Nam, các nghiên cứu nhằm nâng cao cơ tính hợp kim B95 hiện nay vẫn chủ yếu tập trung vào hợp kim hóa và xử lý nhiệt truyền thống. Do đó, các sản phẩm nhôm tấm B95 chế tạo trong nước chưa đạt được các chỉ tiêu cơ tính tối ưu, đặc biệt là sự cân bằng giữa độ bền và độ dẻo. Trong khi đó, trên thế giới, phương pháp kết hợp cơ - nhiệt luyện với hóa già được đánh giá là hướng nghiên cứu có nhiều tiềm năng nhờ khả năng kiểm soát tổ chức tế vi và nâng cao hiệu quả hóa bền, nhưng chưa được nghiên cứu và công bố một cách hệ thống tại Việt Nam. Đây chính là khoảng trống khoa học và thực tiễn cần được tiếp tục nghiên cứu và làm rõ. Vì vậy, việc nghiên cứu cơ nhiệt luyện kết hợp hóa già nhằm nâng cao cơ tính hợp kim nhôm B95 là cần thiết, có ý nghĩa khoa học và giá trị thực tiễn cao.



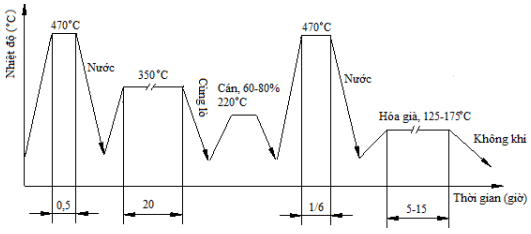
Hình 1. Chế độ cơ nhiệt luyện theo nghiên cứu [6]

Cơ - nhiệt luyện là một dạng nhiệt luyện đặc biệt có kết hợp với biến dạng dẻo, nhằm tạo ra trong tinh thể kim loại các siêu bề mặt ổn định, có tác dụng cản trở sự chuyển động tự do của lệch, từ đó làm tăng độ bền của vật liệu. Các nghiên cứu đối với hợp kim nhôm độ bền cao hệ Al-Zn-Mg-Cu cho thấy cơ - nhiệt luyện là hướng tiếp cận hiệu quả nhằm cải thiện tổ chức tế vi và cơ tính vật liệu. Nghiên cứu [7] chỉ ra rằng các chế độ xử lý nhiệt ảnh hưởng rõ rệt đến tổ chức và cơ tính của hợp kim B95, trong đó chế độ T6 cho kết quả vượt trội so với chế độ hóa già nhiều cấp T62. Việc kết hợp biến dạng dẻo với nhiệt luyện được chứng minh có khả năng tinh luyện tổ chức hạt và thúc đẩy hình thành các pha hóa bền phân tán mịn, qua đó nâng cao độ bền của hợp kim [6, 7].

Bên cạnh đó, nhằm cải thiện độ dẻo, phương pháp cán nóng kết hợp ủ kết tinh lại và hóa già T6 cho phép giảm kích thước hạt xuống dưới 10µm và đạt độ giãn dài tới 18,5 % [7]. Mặc dù nhiều phương pháp đã được áp dụng, việc đánh giá một cách hệ thống ảnh hưởng của các thông số cơ - nhiệt, đặc biệt là mức độ biến dạng, nhiệt độ và thời gian ủ sau biến dạng, đến tổ chức tế vi và cơ tính của hợp kim B95 vẫn còn hạn chế.

Do đó, bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của cơ - nhiệt luyện kết hợp hóa già nhân tạo đến tổ chức và cơ tính của hợp kim nhôm B95, nhằm làm cơ sở khoa học cho việc lựa chọn và tối ưu hóa chế độ xử lý phù hợp.

Từ phân tích trên, ta lựa chọn sơ đồ gia công cơ nhiệt luyện kết hợp hóa già đối với hợp kim nhôm B95 như sau:



Hình 2. Sơ đồ xử lý cơ nhiệt luyện hợp kim nhôm độ bền cao B95

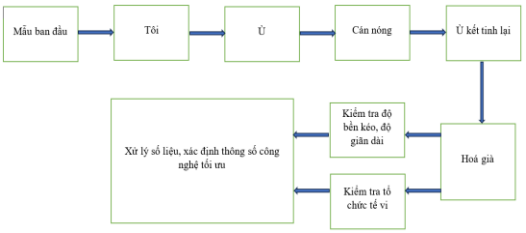
Hình 2 trình bày quy trình cơ - nhiệt luyện kết hợp hóa già cho hợp kim nhôm B95. Mẫu được xử lý nhiệt dung dịch ở 470ºC, sau đó tôi nước nhằm tạo dung dịch rắn quá bão hòa. Tiếp theo, vật liệu được ủ trung gian ở 350ºC để giải phóng ứng suất dư và ổn định tổ chức trước biến dạng. Công đoạn cán với mức độ biến dạng 60-80% ở khoảng 220ºC được lựa chọn nhằm tạo mật độ lệch cao, đóng vai trò là tâm ưu tiên cho quá trình tiết pha hóa bền. Sau cán, mẫu được dung dịch hóa lại ở 470ºC và tôi nước để điều chỉnh tổ chức nền. Cuối cùng, hóa già nhân tạo trong khoảng 125-175ºC (5-15 giờ) được áp dụng nhằm hình thành các pha hóa bền phân tán mịn, góp phần nâng cao cơ tính của hợp kim.

2. Thực nghiệm

2.1. Quy trình thực nghiệm

Tiến hành khảo sát thực nghiệm nhằm xác định tổ chức tế vi và cơ tính của hợp kim nhôm B95 khi áp dụng các phương pháp cơ - nhiệt luyện kết hợp hóa già. Trên cơ sở đó, đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến tổ chức và cơ tính của hợp kim, qua đó đề xuất định hướng lựa chọn và tối ưu hóa chế độ xử lý nhằm đạt được các chỉ tiêu công nghệ mong muốn.

Từ sơ đồ xử lý cơ nhiệt luyện hợp kim nhôm độ bền cao B95 ở Hình 2, xác định sơ đồ quy trình thực nghiệm như Hình 3:



Hình 3. Quy trình thực nghiệm hợp kim nhôm

Hình 3, mặc dù phôi đầu vào ở trạng thái cán nguội, nguyên công tôi dung dịch ở 470ºC (30 phút, tôi nước) được thực hiện nhằm loại bỏ hoàn toàn ảnh hưởng của lịch sử công nghệ trước đó, hòa tan các pha thứ cấp và tạo trạng thái dung dịch rắn quá bão hòa đồng nhất cho tất cả mẫu nghiên cứu. Sau biến dạng, nguyên công ủ kết tinh lại ở 470ºC (10 phút, tôi nước) được lựa chọn để kích hoạt kết tinh lại, giảm mật độ lệch và tinh chỉnh tổ chức hạt, đồng thời nhờ thời gian giữ nhiệt ngắn nên hạn chế thô hạt. Việc làm nguội trong nước giúp ổn định nhanh tổ chức nền, tạo điều kiện.

2.2. Phương pháp thực nghiệm

**. Phương pháp hiển vi quang học xác định kích thước hạt*

Phương pháp hiển vi quang học. Tổ chức tế vi được nghiên cứu trên các mẫu ở trạng thái cung cấp, sau tôi, sau ủ, và sau hóa già. Đầu tiên mẫu được mài trên giấy ráp với các cỡ hạt từ lớn đến nhỏ (400 đến 2000), sau đó được mài bóng trên máy đánh bóng Metaserv 2000, rồi tẩm thực bằngdung dịch keller (*100ml H_2O; 1,1ml HF; 1,7ml HCl; 11,5ml HNO_3*).

Nhược điểm của phương pháp hiển vi quang học là độ phóng đại nhỏ, không thể quan sát được các pha tiết ra có kích thước nhỏ (như vùng GP, pha trung gian kém ổn định,…).

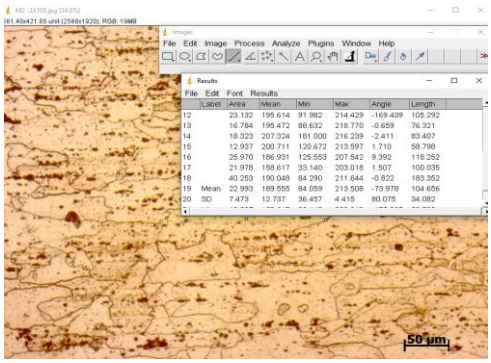
Để đo kích thước hạt trung bình, ta sử dụng phần mềm ImageJ. Với một ảnh tế vi bất kỳ đã có kích thước chuẩn, ta tiến hành Set Scale sau đó đo kích thước của các hạt có thể đo được và lấy giá trị trung bình.

**. Phương pháp đo độ cứng*

Hợp kim nhôm B95 được đo độ cứng trên máy đo độ cứng HP 250 (Đức) - Phòng Thí nghiệm Viện Công nghệ Quốc phòng, sử dụng thang đo Vicker. Tiếp tục sử dụng bảng điện tử hiện thị độ cứng.

**. Phương pháp xác định độ bền, độ dẻo*

Mẫu hợp kim nhôm được cắt với kích thước tiêu chuẩn (theo TCVN 197-1:2014) sau đó tiến hành thử kéo để xác định một số chỉ tiêu cơ tính.



Hình 4. Đo kích thước hạt bằng phần mềm ImageJ

Mẫu thực nghiệm

Mẫu thực nghiệm là hợp kim nhôm B95 sau đúc, được ủ đồng đều, sau đó đùn ép và cán nguội (trạng thái cung cấp).

Thành phần hóa học của mẫu thực nghiệm được cho trong Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học của mẫu hợp kim nhôm B95

Mác hợp kim	Thành phần hợp kim nhôm (%)				
	Al	**Zn**	**Mg**	**Cu**	**Fe**
Mẫu NC	89,444	5,818	2,282	1,543	0,219
B95 (GOST)	Còn lại	5,0-7,0	1,8-2,8	1,4-2,0	Max 0,5
	Si	**Mn**	**Ni**	**Cr**	**Ti**
Mẫu NC	0,061	0,364	<0,002	0,183	0,027
B95 (GOST)	Max 0,5	0,2-0,6	Max 0,1	0,1-0,25	Max 0,05

Từ sơ đồ gia công cơ nhiệt hợp kim nhôm B95 ở Hình 1 ta tiến hành chuẩn bị phôi thí nghiệm như sau:

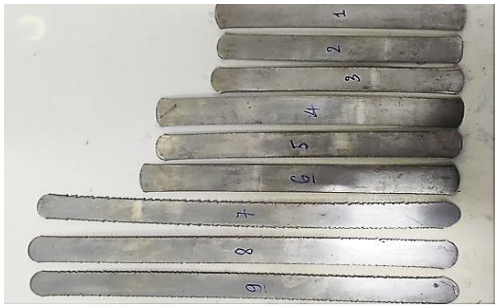
Hợp kim nhôm B95 ban đầu có kích thước ∅45mm, được cắt thành các tấm mỏng có chiều dày *s=5mm* như Hình 5.

Hình 5. Mẫu thí nghiệm hợp kim nhôm độ bền cao B95

TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X, e-ISSN: 3093-3161
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY

Trước khi cán, tất cả các phôi được tôi ở 470^{0}C (thời gian giữ nhiệt là 30 phút) và ủ đồng đều ở 350^{o}C trong 20 giờ. Sau khi ủ, tất cả các phôi được cán nóng ở 220^{0}C với các mức biến dạng 60%, 70%, 80%.

- Mức biến dạng 60%: Mẫu ban đầu dày 5mm, mẫu sau cán dày 2mm;
- Mức biến dạng 70%: Mẫu ban đầu dày 5mm, mẫu sau cán dày 1,5mm;
- Mức biến dạng 80%: Mẫu ban đầu dày 5mm, mẫu sau cán dày 1mm.



Hình 6. Mẫu biến dạng sau cán

Sau khi cán, các phôi được ủ kết tinh lại ở 470^{0}C (thời gian giữ nhiệt là 10 phút) và hóa già ở các nhiệt độ 125^{0}C, 150^{0}C và 175^{0}C trong các khoảng thời gian 5 giờ, 10 giờ và 15 giờ.

Sau khi tiến hành thí nghiệm theo sơ đồ cơ nhiệt đã chọn, các mẫu được đem đi kiểm tra cơ tính và tổ chức tế vi.

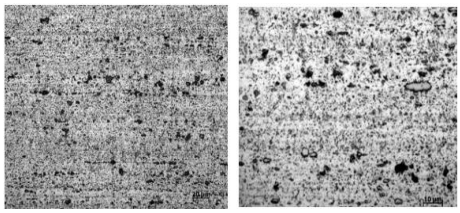
Hình 7. Mẫu thử cơ tính

3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

3.1. Tác động của cơ nhiệt luyện kết hợp hóa già tới tổ chức của HK B95

Một số hình ảnh tổ chức tế vi mẫu ở trạng thái cung cấp, sau tôi, sau ủ trước khi biến dạng:

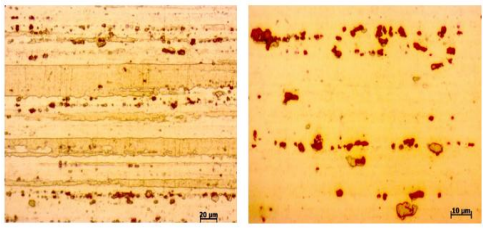
Từ Hình 8 cho thấy, tổ chức tế vi của mẫu ban đầu gồm nền là dung dịch rắn thay thế của các nguyên tố hợp kim trong nhôm, cùng với các pha liên kim phân bố không đồng đều và có xu hướng kéo dài theo phương biến dạng do quá trình đùn ép và cán. Sự phân bố không đồng đều của các pha liên kim dẫn đến tính chất vật liệu không đồng nhất, ảnh hưởng bất lợi đến cơ tính. Dựa trên thành phần hợp kim, các pha liên kim quan sát được có thể bao gồm pha η (*$MgZn_2$*), pha S (*AlCuMg*) và một số pha T giàu Mg và Zn.



a) Độ phóng đại x200 b) Độ phóng đại x500

Hình 8. Tổ chức tế vi của hợp kim nhôm ban đầu

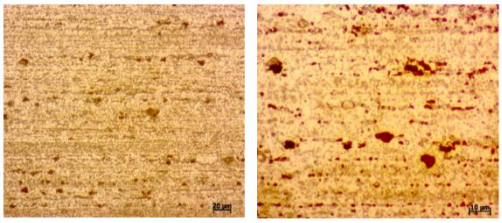
Từ Hình 9, nhận thấy, sau tôi số lượng pha đã ít hơn so với mẫu ở trạng thái cung cấp, các pha liên kim vẫn phân bố dọc trục theo phương biến dạng. Như vậy, trong quá trình tôi đã hòa tan được một lượng đáng kể các pha liên kim. Khi so sánh với lý thuyết thì có thể nhận định đây là tổ chức dung dịch rắn quá bão hòa đặc trưng chung của hợp kim nhôm sau khi tôi.



a) Độ phóng đại x200 b) Độ phóng đại x500

Hình 9. Tổ chức hợp kim nhôm sau tôi ở 470^{o}C

Từ Hình 10, có thể thấy rằng: Sau khi ủ, do có quá trình nung nóng, giữ nhiệt và làm nguội chậm cùng lò nên tổ chức có sự hoà tan pha liên kim và tiết ra đều nên các pha không còn chịu ảnh hưởng phân bố theo định hướng phương cán như trạng thái cung cấp và sau tôi.

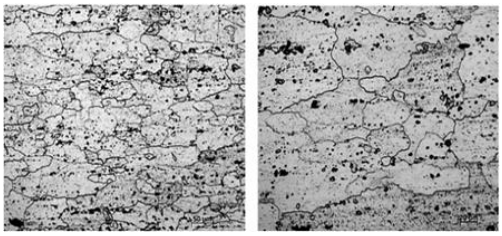


a) Độ phóng đại x200 b) Độ phóng đại x500

Hình 10. Tổ chức của HK nhôm B95 sau ủ ở 350^{o}C

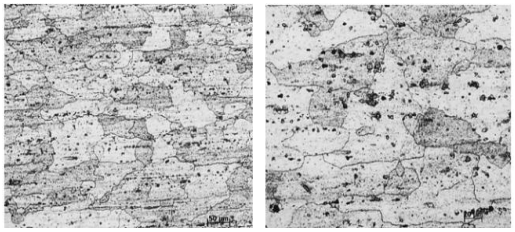
Một số hình ảnh tổ chức tế vi tương ứng với các chế độ cơ nhiệt luyện khác nhau:

Từ các ảnh tổ chức tế vi cho thấy, sau hóa già, các pha nhỏ mịn sáng màu xuất hiện nhiều trên nền dung dịch rắn α. Khi kéo dài thời gian hóa già, số lượng pha tiết ra nhiều hơn. Các pha nhỏ mịn phân tán (như các



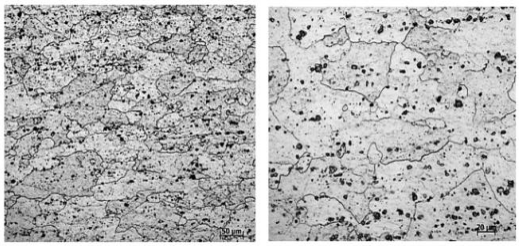
a) Độ phóng đại x100 b) Độ phóng đại x20

Hình 11. Tổ chức của HK nhôm B95 sau cơ nhiệt luyện (cán ở mức 60%, nhiệt độ hóa già: 150°C, thời gian hóa già: 5 giờ)



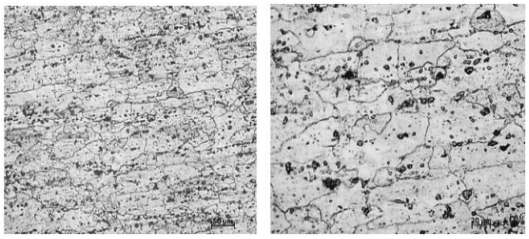
a) Độ phóng đại x100 b) Độ phóng đại x200

Hình 12. Tổ chức sau cơ nhiệt luyện của HK B95 (cán ở mức 60%, nhiệt độ hóa già: 200°C, thời gian hóa già: 15 giờ)



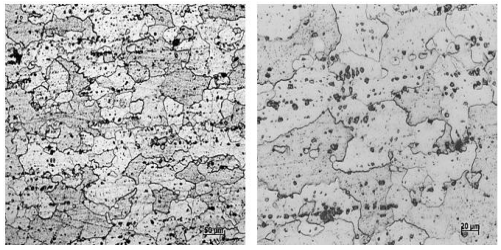
a) Độ phóng đại x100 b) Độ phóng đại x200

Hình 13. Tổ chức sau cơ nhiệt luyện của HK nhôm B95 (cán ở mức 70%, nhiệt độ hóa già: 150°C, thời gian hóa già: 10 giờ)



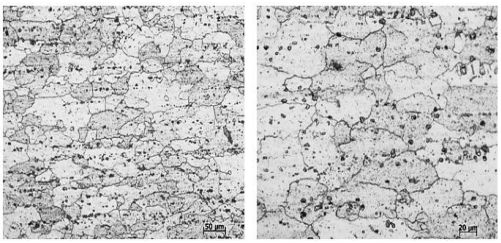
a) Độ phóng đại x100 b) Độ phóng đại x200

Hình 14. Tổ chức sau cơ nhiệt luyện của HK nhôm B95 (cán ở mức 70%, nhiệt độ hóa già: 200°C, thời gian hóa già: 5 giờ)



a) Độ phóng đại x100 b) Độ phóng đại x20

Hình 15. Tổ chức sau cơ nhiệt luyện của HK nhôm B95 (mức cán 80%, nhiệt độ hóa già: 150°C, thời gian hóa già: 15 giờ)



a) Độ phóng đại x100 b) Độ phóng đại x20

Hình 16. Tổ chức của hợp kim nhôm B95 sau cơ nhiệt luyện (mức cán 80%, nhiệt độ hóa già: 200°C, thời gian hóa già: 10 giờ)

vùng GP), với độ phân giải của kính hiển vi quang học không quan sát thấy. Tuy nhiên trong quá trình hóa già, thời gian càng dài, các pha có kích thước nhỏ luôn có trong dung dịch rắn (các pha đã tan, chưa tan hết, có kích thước nhỏ, có thể quan sát trên kính hiển vi quang học) luôn lớn lên, điều này cho thấy sự tiết pha và tích tụ pha đã và đang xảy ra trong mẫu nghiên cứu.

Với cùng nhiệt độ hóa già, khi so sánh các Hình 11, 13 và 15, khi tăng thời gian hóa già, các phần tử hóa bền trên nền dung dịch rắn phân tán nhiều hơn, có số lượng lớn hơn, kích thước lớn hơn, và có khoảng cách nhỏ hơn. Điều này chứng tỏ hiệu ứng hóa bền tăng lên. Trong khi đó, với cùng nhiệt độ hóa già, khi tăng mức độ biến dạng, so sánh các Hình 12, 14 và 16 nhận thấy rằng kích thước hạt có chiều hướng giảm do càng tăng mức độ biến dạng thì càng xuất hiện nhiều dải trượt, đường trượt bên trong hạt càng nhiều hạt mới xuất hiện.

Với cùng thời gian hóa già, khi thay đổi mức độ biến dạng, so sánh các Hình 13, 14 ta nhận thấy kích thước hạt cũng có chiều hướng giảm mạnh, điều này chứng tỏ mức độ ảnh hưởng của mức độ biến dạng đến kích thước hạt là rất lớn.

3.2. Ảnh hưởng của cơ nhiệt luyện kết hợp hóa già tới độ bền kim nhôm B95

Từ số liệu Bảng 3 cho thấy độ bền kéo của vật liệu phụ thuộc rõ rệt vào mức độ biến dạng, nhiệt độ và thời gian hóa già. Trong đó, nhiệt độ hóa già có ảnh

TẠP CHÍ ISSN: 1859-316X, e-ISSN: 3093-3161
KHOA HỌC CÔNG NGHỆ HÀNG HẢI
JOURNAL OF MARINE SCIENCE AND TECHNOLOGY

Bảng 2. Kết quả đo thực nghiệm kích thước hạt trung bình

Số mẫu	Mức độ biến dạng ε (%)	Nhiệt độ hóa già (°C)	Thời gian hóa già (giờ)	Kích thước hạt (μm)	Kích thước hạt (μm)	Kích thước hạt (μm)
1	60	150	5	128	120	133
2	60	175	10	111	121	117
3	60	200	15	115	99	105
4	70	150	10	117	100	108
5	70	175	15	100	92	98
6	70	200	5	85	81	84
7	80	150	15	98	89	97
8	80	175	5	88	75	79
9	80	200	10	92	89	90

hưởng mạnh nhất: Ở 150-175°C, độ bền kéo đạt giá trị cao (khoảng 560-570 N/mm²), trong khi ở 125°C độ bền kéo rất thấp do quá trình kết tủa chưa hoàn thiện. Mức độ biến dạng tăng từ 60% lên 80% làm độ bền kéo tăng nhờ hóa bền biến dạng và tạo điều kiện thuận lợi cho hóa già. Thời gian hóa già ảnh hưởng ở mức độ thấp hơn, độ bền kéo tăng đến giá trị tối ưu rồi có xu hướng ổn định. Điều kiện cho độ bền kéo cao nhất trong phạm vi khảo sát là *ε≈80%, T≈150°C và t≈15 giờ.*

Bảng 3. Kết quả đo thực nghiệm độ bền kéo của mẫu cơ tính

Số mẫu	Mức độ biến dạng (%)	Nhiệt độ hóa già (°C)	Thời gian hóa già (giờ)	Độ bền kéo σ_{b1} (N/mm²)
1	60	150	5	570
2	60	175	10	564
3	60	125	15	299
4	70	150	10	560
5	70	175	15	550
6	70	125	5	311
7	80	150	15	567
8	80	175	5	489
9	80	125	10	314

3.3. Ảnh hưởng của cơ nhiệt luyện kết hợp hóa già tới độ giãn dài của hợp kim nhôm B95 tới độ bền kim nhôm B95

Dựa trên số liệu Bảng 4, độ giãn dài của vật liệu chịu ảnh hưởng rõ rệt bởi mức độ biến dạng, nhiệt độ và thời gian hóa già. Mức độ biến dạng tăng từ 60% lên 80% làm độ giãn dài giảm dần, do mật độ biến dạng lớn hạn chế khả năng biến dạng dẻo của vật liệu. Nhiệt độ hóa già ảnh hưởng theo hướng: Ở 150-175°C, độ giãn dài đạt giá trị cao hơn và ổn định (khoảng 10,2-13,2%), trong khi ở 125°C độ giãn dài thấp nhất (khoảng 9,2-9,6%) do tổ chức chưa ổn định. Thời gian hóa già có ảnh hưởng nhưng không lớn; khi thời gian tăng, độ giãn dài có xu hướng giảm nhẹ. Nhìn chung, điều kiện cho độ giãn dài cao là mức độ biến dạng thấp đến trung bình kết hợp với nhiệt độ hóa già trung bình (150-175°C).

Bảng 4. Kết quả đo độ giãn dài của quá trình thử kéo mẫu cơ tính

Số mẫu	Mức độ biến dạng Σ (%)	Nhiệt độ hóa già (°C)	Thời gian hóa già (giờ)	Độ giãn dài δ_1 (%)
1	60	150	5	13,2
2	60	175	10	11,7
3	60	125	15	13,1
4	70	150	10	11,9
5	70	175	15	11,7
6	70	125	5	9,2
7	80	150	15	10,7
8	80	175	5	10,2
9	80	125	10	9,6

4. Kết luận

Nghiên cứu ảnh hưởng của cơ nhiệt luyện kết hợp hóa già đến tổ chức tế vi và tính chất cơ học của hợp kim nhôm B95 cho thấy các thông số công nghệ, bao gồm mức độ biến dạng, nhiệt độ và thời gian hóa già, có ảnh hưởng rõ rệt đến quá trình tiết pha và cơ tính của vật liệu. Trong quá trình hóa già, các pha hóa bền phân tán mịn được hình thành và phát triển trên nền dung dịch rắn *α*; khi tăng thời gian hóa già, mật độ và kích thước các pha tăng lên, khoảng cách giữa các pha giảm, qua đó nâng cao hiệu quả hóa bền. Việc tăng mức độ biến dạng làm gia tăng mật độ lệch mạng và dải trượt, thúc đẩy quá trình kết tủa và tinh luyện tổ

chức hạt, trong đó mức độ biến dạng thể hiện vai trò chi phối đối với sự tinh mịn tổ chức.

Về cơ tính, độ bền kéo của hợp kim B95 phụ thuộc đáng kể vào các thông số xử lý, đặc biệt là nhiệt độ hóa già, với giá trị cao đạt được trong khoảng 150-175°C. Ở nhiệt độ 125°C, quá trình kết tủa chưa hoàn thiện nên độ bền thấp. Tăng mức độ biến dạng từ 60% lên 80% làm tăng đáng kể độ bền kéo nhờ sự kết hợp giữa hóa bền biến dạng và hóa bền kết tủa, trong khi ảnh hưởng của thời gian hóa già ở mức thứ yếu, độ bền tăng đến giá trị tối ưu rồi có xu hướng ổn định.

Độ giãn dài biến đổi ngược chiều với độ bền kéo, giảm khi mức độ biến dạng và thời gian hóa già tăng do mật độ lệch mạng và pha hóa bền gia tăng; tuy nhiên, trong khoảng nhiệt độ hóa già 150-175°C, vật liệu vẫn duy trì được độ giãn dài tương đối cao và ổn định, cho thấy sự cân bằng hợp lý giữa độ bền và độ dẻo.

Tổng hợp các kết quả cho thấy, chế độ cơ nhiệt luyện kết hợp hóa già tối ưu trong phạm vi nghiên cứu đối với hợp kim nhôm B95 là mức độ biến dạng khoảng 80%, nhiệt độ hóa già khoảng 150°C và thời gian hóa già khoảng 15 giờ, tại đó vật liệu đạt độ bền kéo cao đồng thời vẫn bảo đảm độ dẻo cần thiết, đáp ứng yêu cầu ứng dụng trong thực tế kỹ thuật.

So sánh với các nghiên cứu đã công bố trong và ngoài nước cho thấy, giá trị độ bền kéo đạt được trong nghiên cứu này tương đương với các kết quả thu được khi chỉ áp dụng xử lý nhiệt và hóa già truyền thống cho hợp kim B95. Một số công trình quốc tế sử dụng cơ - nhiệt luyện kết hợp hóa già cũng ghi nhận xu hướng tăng bền tương tự; chế độ công nghệ trong nghiên cứu này cho phép đạt độ bền cao ở nhiệt độ hóa già thấp hơn và thời gian xử lý hợp lý, đồng thời vẫn duy trì được độ dẻo cần thiết. Điều này khẳng định tính hiệu quả và khả năng ứng dụng thực tiễn của quy trình đề xuất đối với hợp kim nhôm B95 trong điều kiện sản xuất trong nước

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.48**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Phùng Tuấn Anh (2015), *Nhôm và hợp kim nhôm thông dụng trên thế giới*, NXB Khoa học và Kỹ thuật.

[2] Lê Công Dưỡng (1997), *Vật liệu học*, NXB Khoa học và Kỹ thuật.

[3] Nguyễn Hồng Hải (2006), *Lý thuyết quá trình kết tinh và đông đặc*, NXB Khoa học và Kỹ thuật.

[4] V. D. Doan, Duc Hoan Tran, Dang Giang Lai, V. H. Truong, and V. H. Nguyễn (2023), *Optimization according to strength of thermo-mechanical process combined with aging of B95 aluminum alloy using Taguchi experimental planning method*, Journal of Military Science and Technology, Vol.86, pp.151-157.

[5] M. T. Nguyen, T. A. Nguyen, and D. H. Tran (2022), *Effect of process parameters on the distribution of wall thickness in superplastic forming of a hemispherical part from Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloy*, Journal of Science and Technique, Vol.14, No.03.

[6] Ortiz, D.; Abdelshehid, M.; Dalton, R.; Soltero, J.; Clark, R .; Hahn, M.; Lee, E.; Lightell, W.; Pregger, B.; Ogren, J.; Stoyanov, P.; andEs-Said, Omar S. (2007), *Work on the Tensile Properties of 6061, 2024, and 7075 Al Alloys*, Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 16, pp. 515- 520.

[7] Hamilton, C. and A. Ghosh (1988), *Superplastic sheet forming*, ASM Handbook. Vol.14, pp.852-873.

[8] Wangtu Huo (2017), *An improved thermo-mechanical treatment of high-strength Al-Zn-Mg-Cu alloy for effective grain refinement and ductility RI-ITMT*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 239, pp. 304-314.

Ngày nhận bài: 06/01/2026
Ngày nhận bản sửa: 19/01/2026
Ngày duyệt đăng: 27/01/2026