

Tối ưu hóa theo độ bền quá trình cơ-nhiệt luyện kết hợp với hóa già hợp kim nhôm B95 sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi

Đoàn Văn Điều¹, Trần Đức Hoàn¹, Lại Đăng Giang¹,
Trương Việt Hoài^{1*}, Nguyễn Văn Hoàng²

¹Bộ môn Gia công áp lực, Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật Quân sự;

²Bộ môn Vật liệu và Công nghệ Vật liệu, Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật Quân sự.

*Email: truongviethoai0409@gmail.com

Nhận bài: 20/01/2023; Hoàn thiện: 15/3/2023; Chấp nhận đăng: 20/3/2023; Xuất bản: 28/4/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.86.2023.151-157>

TÓM TẮT

Chế độ cơ nhiệt có ảnh hưởng mạnh đến tổ chức và cơ tính của hợp kim nhôm biến dạng hóa bền bằng nhiệt luyện. Trong nghiên cứu này, 09 mẫu thí nghiệm với mức độ cán, thời gian hóa già và nhiệt độ hóa già khác nhau đã được chế tạo để nghiên cứu thực nghiệm tổ chức tế vi và cơ tính của hợp kim nhôm B95. Đồng thời, phương pháp Taguchi được sử dụng để tối ưu các thông số công nghệ của quá trình cơ nhiệt tại đó độ bền của hợp kim nhôm đạt giá trị cao nhất. Kết quả thu được cho thấy, độ bền kéo lớn nhất đạt được là 580 MPa khi cán nóng với mức độ biến dạng 70%, hóa già ở 150 °C và thời gian giữ nhiệt là 10 giờ.

Từ khóa: B95; 7075; Cơ nhiệt luyện; Hóa già; Taguchi.

1. MỞ ĐẦU

Hợp kim nhôm biến dạng độ bền cao B95 (tiêu chuẩn Nga) tương đương mác 7075 (Mỹ), thuộc hệ hợp kim Al-Zn-Mg-Cu, được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực dân sự cũng như quốc phòng, ví dụ như cánh và thân máy bay [1]. Hợp kim B95 là hợp kim nhôm có độ bền cao, σ_b có thể đạt tới 600-700 N/m². Đối với hợp kim này, các nguyên tố hợp kim như Zn, Mg, Cu hòa tan trong nhôm tạo dung dịch rắn, ngoài ra còn có các pha như η (MgZn₂), S (CuMgAl₂) và T (Mg₃Zn₃Al₂) [2]. Khi nung tôi ở khoảng nhiệt độ 460-477 °C, các pha η , S và một phần pha T hòa tan vào dung dịch rắn. Khi hóa già, từ dung dịch rắn quá bão hòa tiết ra các pha hóa bền phân tán (pha η , S, T) với kích thước rất nhỏ tạo ra hiệu ứng hóa bền rất cao với hợp kim nhôm B95 [3]. Công trình nghiên cứu [4] cũng chỉ ra chế độ xử lý nhiệt khác nhau ảnh hưởng đến tổ chức và cơ tính của hợp kim nhôm B95. Kết quả nghiên cứu [4] cho thấy, chế độ xử lý nhiệt T6 cho tổ chức và cơ tính tốt hơn so với chế độ xử lý nhiệt T62. Ở đây, T6 là chế độ nhiệt luyện tôi ở 475±5 °C, sau đó, tiến hành hóa già nhân tạo ở (120-170 °C); T62 là chế độ hóa già nhiều cấp khác nhau. Theo Hamilton [5], để thu được hợp kim có độ bền tốt hơn và có tổ chức hạt nhỏ, nhóm tác giả đã kết hợp nhiệt luyện và biến dạng, gọi tắt là cơ nhiệt luyện. Wangtu H và cộng sự [6] sử dụng phương pháp cán nguội tích lũy kết hợp ủ trong thời gian ngắn được sử dụng để tạo ra tổ chức hạt nhỏ, trong đó, một lượng lớn các pha MgZn₂ có đường kính rất nhỏ (\approx 0,2 μ m). Ngoài ra, nhóm nghiên cứu [7] đã chỉ ra chế độ cơ nhiệt để được độ dẻo cao, tổ chức hạt nhỏ, nhóm tác giả sử dụng phương pháp cán nóng kết hợp ủ kết tinh lại sau đó hóa già T6 từ đó thu được hợp kim có kích thước hạt giảm xuống dưới 10 μ m, độ giãn dài lên đến 18,5%.

Trong nghiên cứu thực nghiệm, phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi thường được sử dụng bởi các ưu điểm của nó như: Giảm được số thí nghiệm cần tiến hành; hàm lượng thông tin nhiều hơn rõ rệt nhờ đánh giá được vai trò qua lại giữa các yếu tố và ảnh hưởng của chúng đến hàm mục tiêu, đánh giá được sai số của quá trình thực nghiệm [8-10]. Phương pháp này cho phép xác định được điều kiện tối ưu đa yếu tố của đối tượng nghiên cứu tương đối chính xác bằng các công cụ toán học, thay cho cách giải gần đúng, tìm tối ưu cục bộ như các thực nghiệm thụ động.

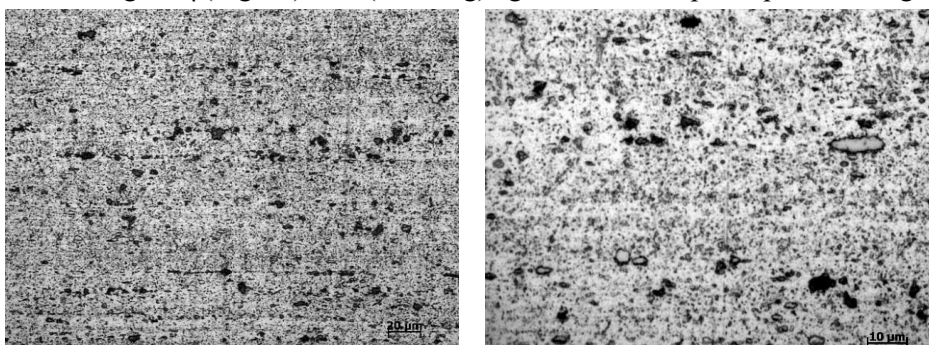
Các nghiên cứu [4-7] đã đưa ra một số phương pháp kết hợp biến dạng và xử lý nhiệt để nâng

cao cơ tính và giảm kích thước hạt của hợp kim nhôm. Tuy nhiên, việc đánh giá ảnh hưởng của các thông số cơ-nhiệt (cụ thể là mức độ biến dạng, nhiệt độ tôi hay hóa già, thời gian giữ nhiệt, thời gian hóa già,...) đến tổ chức và cơ tính còn chưa được đề cập đến và chưa có những kết quả cụ thể để có thể điều chỉnh tổ chức và cơ tính nhận được theo yêu cầu. Trong bài báo này, nhóm tác giả đã nghiên cứu, đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số công nghệ của quá trình cơ nhiệt (mức độ biến dạng, thời gian và nhiệt độ khi hóa già) đến tổ chức và cơ tính của hợp kim nhôm B95 (7075). Đồng thời, phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi được sử dụng để xem xét ảnh hưởng của các thông số công nghệ trên, qua đó xác định chế độ công nghệ tối ưu cho hợp kim.

2. PHÂN THỰC NGHIỆM

2.1. Nguyên vật liệu

Hợp kim sử dụng trong nghiên cứu này là hợp kim nhôm hệ Al-Zn-Mg-Cu (tương đương mác B95) với các thành phần hóa học được liệt kê chi tiết trong bảng 1. Hình 1 là ảnh chụp tế vi của hợp kim nhôm trước khi biến dạng. Hình ảnh tổ chức tế vi của mẫu ban đầu có nền là dung dịch rắn và các pha liên kim phân bố không đồng đều dọc theo phương biến dạng (đùn ép và cán). Sự phân bố này gây ra sự không đồng đều về tính chất của vật liệu, độ bền và độ giãn dài của vật liệu có thể giảm đi. Các pha liên kim trên có xu hướng bị kéo dài theo phương biến dạng. Thông thường, các pha liên kim có thể gồm η ($MgZn_2$) và S ($AlCuMg$) ngoài ra có thêm pha T pha chứa Mg, Zn.



Hình 1. Tổ chức của hợp kim nhôm B95 ở trạng thái cung cấp.

Bảng 1. Thành phần hóa học 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

2.2. Mẫu thí nghiệm và quy trình xử lý cơ nhiệt

Hợp kim nhôm B95 ban đầu có kích thước $\varnothing 45$ mm, được cắt dọc theo đường sinh thành các tấm mỏng có chiều dày $s = 5$ mm (hình 2 (a)). Hình 2 (a), (b), (c) minh họa lần lượt phôi trước khi cán, sau khi cán và mẫu kéo nén. Quy trình cơ nhiệt được thực hiện theo sơ đồ trên hình 3. Trước khi cán, tất cả các phôi được tôi ở 470 °C (thời gian giữ nhiệt là 30 phút) và ủ đồng đều ở 350 °C trong 20 giờ. Sau khi ủ, tất cả các phôi được cán nóng ở 220 °C với các mức biến dạng 60%, 70% và 80%.

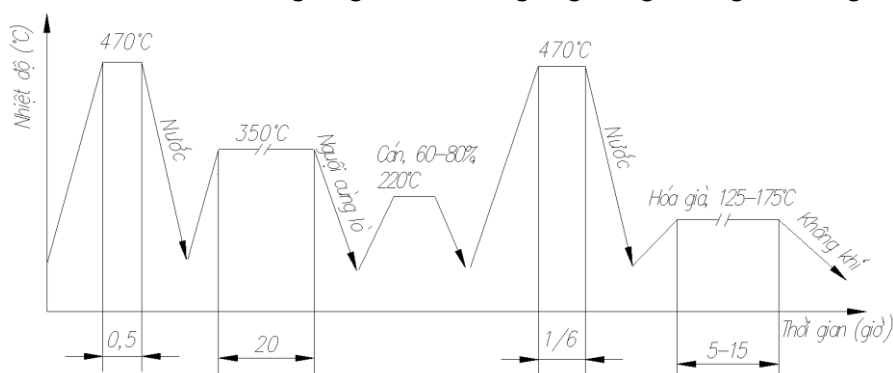
- Mức biến dạng 60%: mẫu ban đầu dày 5 mm, mẫu sau cán dày 2 mm;
- Mức biến dạng 70%: mẫu ban đầu dày 5 mm, mẫu sau cán dày 1,5 mm;

- Mức biến dạng 80%: mẫu ban đầu dày 5 mm, mẫu sau cán dày 1 mm.



Hình 2. Mẫu hợp kim nhôm độ bền cao B95:
(a) Trước khi cán; (b) Sau khi cán; (c) Mẫu thử kéo.

Sau khi cán, các phiê được tôi ở 470 °C (giữ nhiệt trong 10 phút) và hóa già ở các nhiệt độ 125 °C, 150 °C và 175 °C với thời gian giữ nhiệt tương ứng là 5 giờ, 10 giờ và 15 giờ.



Hình 3. Sơ đồ xử lý cơ nhiệt luyện hợp kim nhôm độ bền cao B95.

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.

2.3. Thiết bị thí nghiệm và phân tích mẫu

Quá trình ủ, tôi được thực hiện trên lò Nabertherm LH120/13, N31/H và N65/HA (Đức) tại Phòng thí nghiệm Bộ môn Vật liệu và Công nghệ Vật liệu và Bộ môn Gia công áp lực, Học viện Kỹ thuật Quân sự (HVKTQS). Quá trình cán mỏng mẫu được thực hiện trên thiết bị cán D200 tại Phòng thí nghiệm Bộ môn Vật liệu và Công nghệ Vật liệu, HVKTQS.

Thành phần hóa học của mẫu được phân tích bằng máy phân tích quang phổ phát xạ Q4 TASMÁN tại nhà máy Z127, Tổng cục công nghiệp quốc phòng (TCCNQP). Ảnh tổ chức tế vi được quan sát trên kính hiển vi quang học Axio Imager A2M (Đức) tại Phòng thí nghiệm Bộ môn Vật liệu và Công nghệ Vật liệu, HVKTQS. Giới hạn bền kéo của mẫu được thử trên thiết bị thử kéo Devotrans (Thổ Nhĩ Kỳ), Viện Công nghệ, TCCNQP. Các thiết bị dùng cho quá trình thực nghiệm được minh họa trên hình 4.

2.4. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi

Để đánh giá các kết quả đạt được tác giả tiến hành khảo sát bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi. Các yếu tố đầu vào là mức độ biến dạng, nhiệt độ hóa già và thời gian giữ nhiệt hóa già; hàm mục tiêu là giới hạn bền được thể hiện trong bảng ma trận thực nghiệm. Ma trận thực nghiệm Taguchi chứa 9 thí nghiệm. Thiết lập bài toán Taguchi theo tiêu chí lớn nhất, tốt nhất, xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ (mức độ biến dạng, nhiệt độ hóa già, thời gian hóa già) đến cơ tính, tổ chức của hợp kim nhôm B95 sau cơ nhiệt luyện, qua đó xác định chế độ cơ nhiệt luyện tối ưu. Dạng ma trận trực giao L9 được sử dụng để nghiên cứu ảnh hưởng của 3 thông số công nghệ ứng với 3 mức biến đổi.



Hình 4. Các thiết bị thí nghiệm: (a) Lò LH120/13; (b) Máy cán D200; (c) Lò nung Nabertherm N31/H; (d) Máy thử kéo DEVOTRANS; (e) Kính hiển vi Axio Imager A2M - Đức.

Bảng 2. Ma trận thực nghiệm của Taguchi.

Mẫu thí nghiệm	Mức độ biến dạng (%)	Nhiệt độ hóa già (°C)	Thời gian hóa già (giờ)
1	60	150	5
2	60	175	10
3	60	125	15
4	70	150	10
5	70	175	15
6	70	125	5
7	80	150	15
8	80	175	5
9	80	125	10

Ảnh hưởng của các thông số công nghệ (bảng 2) tới giới hạn bền kéo (hàm mục tiêu trong quy hoạch thực nghiệm) được khảo sát bằng phương pháp Taguchi. Các bước cụ thể được như sau:

Bước 1: Xác định tỷ số nhiễu.

Theo phương pháp Taguchi, lựa chọn tiêu chí “lớn hơn, tốt hơn” thì tỷ số nhiễu được xác định theo công thức:

$$(S/N)_i = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{Y_{ij}^2} \right); i = 1..9$$

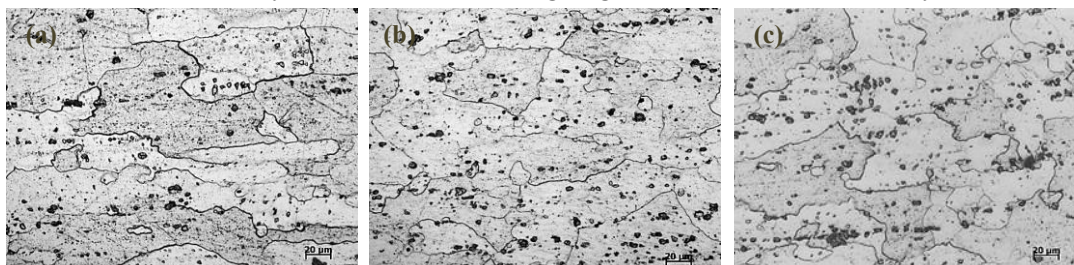
Bước 2: Xác định tỷ số nhiễu trung bình ứng với mỗi biến.

Bước 3: Xác định phương án công nghệ tối ưu: Là phương án với các mức biến đổi của thông số công nghệ có tỷ số S/N trung bình là lớn nhất.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của chế độ cơ nhiệt luyện kết hợp hóa già tới tổ chức của hợp kim nhôm B95

Hình 5 thể hiện sự thay đổi tổ chức tế vi tương ứng với các chế độ cơ nhiệt luyện khác nhau.



Hình 5. Tổ chức của hợp kim nhôm B95 sau cơ nhiệt luyện: (a) mức cán 60%, nhiệt độ hóa già: 150 °C, thời gian hóa già: 5 giờ; (b) mức cán 70%, nhiệt độ hóa già: 150 °C, thời gian hóa già: 10 giờ; (c) mức cán 80%, nhiệt độ hóa già: 150 °C, thời gian hóa già: 15 giờ.

Theo các tài liệu đã được công bố [6, 7], tổ chức này gồm các pha $MgZn_2$ thô to phân tán trên nền Al. Các pha này đóng vai trò các tâm mầm trong quá trình tiết pha hóa bền khi hóa già. Cục đại độ bền ứng với trạng thái tổ chức gồm tỷ lệ xác định nào đó giữa vùng GP và các pha trung gian giả ổn định. Ta cũng thấy rằng, mức độ biến dạng càng lớn, kích thước hạt của hợp kim nhôm sau cơ nhiệt luyện kết hợp hóa già càng nhỏ. Điều này đúng với cơ sở lý thuyết, khi biến dạng dẻo theo một hướng (cán), các pha khác nhau bị vuốt dài theo phương biến dạng tạo thành tổ chức dải, đồng thời với sự thay đổi hình dạng của hạt là sự xuất hiện nhiều đường trượt và dải trượt bên trong hạt, tạo điều kiện hình thành các hạt mới với kích thước nhỏ hơn.

3.2. Tối ưu hóa theo độ bền quá trình cơ nhiệt luyện kết hợp hóa già hợp kim nhôm B95

Kết quả đo giới hạn bền kéo của các mẫu cơ tính được liệt kê trong bảng 3. Tỷ số nhiễu S/N được tính toán và thể hiện trong bảng 4.

Bảng 3. Giới hạn bền kéo của quá trình thử kéo mẫu cơ tính.

Mẫu thí nghiệm	Mức độ biến dạng (%)	Nhiệt độ hóa già (°C)	Thời gian hóa già (giờ)	Giới hạn bền kéo σ_{b1} (N/mm ²)	Giới hạn bền kéo σ_{b2} (N/mm ²)	Giới hạn bền kéo σ_{b3} (N/mm ²)
1	60	150	5	577	567	570
2	60	175	10	564	554	559
3	60	125	15	299	296	299
4	70	150	10	564	566	573
5	70	175	15	550	557	555
6	70	125	5	311	312	315
7	80	150	15	567	568	568
8	80	175	5	489	552	555
9	80	125	10	314	309	307

Bảng 4. Tỷ số nhiễu S/N.

Mẫu	Mức độ biến dạng (%)	Nhiệt độ hóa già (°C)	Thời gian hóa già (giờ)	S/N
1	60	150	5	55,14
2	60	175	10	54,95
3	60	125	15	49,48
4	70	150	10	55,08
5	70	175	15	54,87
6	70	125	5	49,90
7	80	150	15	55,08
8	80	175	5	54,47
9	80	125	10	49,83

Bảng 5. Phân tích đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến giới hạn bền kéo.

Mức biến đổi	S/N trung bình theo các mức		
	Mức độ biến dạng (%)	Nhiệt độ hóa già (°C)	Thời gian hóa già (giờ)
1	53,19	55,10	53,17
2	53,28	54,76	53,28
3	53,13	49,74	53,15
Mean (m)	53,20	53,20	53,20
Max	53,28	55,10	53,28
Delta	0,16	5,36	0,14
% ảnh hưởng	2,78	94,76	2,47

Kết quả phân tích, đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến giới hạn bền kéo được liệt kê trong bảng 5, cho thấy:

- Phương án công nghệ tối ưu sẽ là phương án với các mức biến đổi của thông số công nghệ có tỷ số S/N trung bình là lớn nhất. Đó là phương án tương ứng với:

Mức độ biến dạng: 70%; Nhiệt độ hóa già: 150 °C; Thời gian hóa già: 10 giờ.

Khi đó tỷ số nhiễu của phương án tối ưu sẽ là:

$$(S/N)_{tu} = m + [(S/N)_{\max 1} - m] + [(S/N)_{\max 2} - m] + [(S/N)_{\max 3} - m] = 53,28 + 55,10 + 53,28 - 2.53,20 = 55,27$$

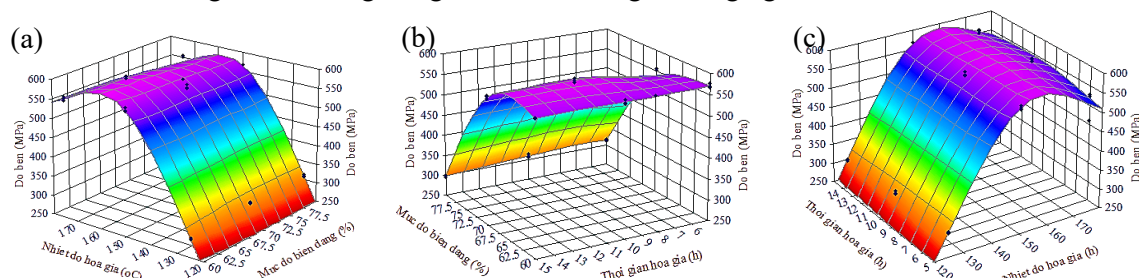
Suy ra:

$$\sigma_b(tu) = 10^{\frac{[(S/N)_{tu}]}{20}} = 10^{\frac{55,27}{20}} = 580 \text{ MPa}$$

- Mức độ ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến giới hạn bền kéo được xếp theo thứ tự sau:

Nhiệt độ hóa già: chiếm 94,76%; Mức độ biến dạng, chiếm 2,78%; Thời gian hóa già: chiếm 2,47%.

- Đồ thị đánh giá ảnh hưởng riêng rẽ của các thông số công nghệ đến biến đầu ra như sau:



Hình 6. Ảnh hưởng của nhiệt độ hóa già mức độ biến dạng và thời gian hóa già đến giới hạn bền kéo của hợp kim nhôm B95.

Hình 6 mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến giới hạn bền kéo của hợp kim, khi tăng mức độ biến dạng từ 60% đến 80%, độ bền tăng nhẹ trong khoảng 60-70% và giảm trong khoảng 70-80%. Độ bền đạt giá trị lớn nhất khi mức độ biến dạng khoảng 70%. Khi tăng nhiệt độ hóa già từ 125 °C lên 175 °C, độ bền tăng nhanh ở giai đoạn đầu tiên, sau đó giảm dần, giới hạn bền kéo đạt giá trị lớn nhất tại nhiệt độ khoảng 150 °C. Khi tăng thời gian hóa già từ 5 giờ lên 15 giờ, độ bền có xu hướng giảm.

4. KẾT LUẬN

Ảnh hưởng của các thông số công nghệ quá trình cơ nhiệt luyện kết hợp hóa già đến tổ chức và độ bền của hợp kim nhôm B95 đã được khảo sát và nghiên cứu. Chín mẫu thí nghiệm với mức độ cán, thời gian hóa già và nhiệt độ hóa già khác nhau đã được chế tạo để nghiên cứu thực nghiệm tổ chức tế vi và cơ tính của hợp kim nhôm. Tổ chức của hợp kim thu được gồm các pha $MgZn_2$ thô to phân tán trên nền Al. Các pha này đóng vai trò các tâm mầm trong quá trình tiết pha hóa bền khi hóa già. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi được sử dụng đã giảm đáng kể thời gian thực nghiệm và số lượng các mẫu thí nghiệm. Kết quả tối ưu bằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi cho thấy, hợp kim nhôm B95 đạt giới hạn bền kéo tốt nhất 580 MPa với bộ thông số công nghệ: Cán nóng tại nhiệt độ 220 °C với mức độ biến dạng 70%, nhiệt độ hóa già 150 °C và thời gian giữ nhiệt là 10 giờ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. E.A. Starke Jr, J.T. Staley, “Application of modern aluminum alloys to aircraft”, Progress in Aerospace Sciences, Vol. 32, pp. 131 – 172, (1996).
- [2]. Phùng Tuấn Anh, “Nhôm và hợp kim nhôm” - Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật, (2015).

- [3]. Nghiêm Hùng, “*Kim loại học và nhiệt luyện*” - Nhà xuất bản đại học và trung học chuyên nghiệp và kỹ thuật, (1979).
- [4]. D. Ortiz, M. Abdelshehid, R. Dalton, J. Soltero, R. Clark, M. Hahn, E. Lee, W. Lightell, B. Pregger, J. Ogren, P. Stoyanov, O.S. Es-Said, “*Effect of Cold Work on the Tensile Properties of 6061, 2024, and 7075 Al Alloys*”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 16, pp. 515 - 520 (2007).
- [5]. Hamilton, C. and A. Ghosh, “*Superplastic sheet forming, ASM Handbook*”, Vol. 14B, (1988).
- [6]. Wangtu Huo, “*Improved thermo-mechanical processing for effective grain refinement*”, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 626, pp. 86 – 93, (2014).
- [7]. Wangtu Huo, “*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, (2017).
- [8]. Shyam Kumar Karna, Dr. Ran Vijay Singh, Dr. Rajeshwar Sahai, “*Application of Taguchi Method in Indian Industry*”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 2, issue 11, (2012).
- [9]. Saran Raj, S. Garesan “*Process parameter analysis of deep cryogenic treated EN 52 Silicon chromium valve steel through Taguchi technique*”, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.37, Issue 16, (2022).
- [10]. Senthil, T. Selvaraj and S. Vinodh, “*Modelling of turning parameters of Al-Cu/TiB₂ insitu metal matrix composites using artificial neural network*”, *International Journal of Advanced Operations Management*, Vol. 4, No. 4, (2012).

TÓM TẮT

Optimization according to strength of thermo-mechanical process combined with aging of B95 aluminum alloy using Taguchi experimental planning method

The structure and mechanical characteristics of heat-treated deformable aluminum alloys are significantly impacted by the thermo-mechanical process. In this study, a number of 9 specimens with different rolling ratio, aging time and aging temperature were conducted to experimentally investigate the microstructures and mechanical properties. Besides, the Taguchi method is applied to optimize the thermo-mechanical and aging parameters of the process at which the alloys achieved the highest tensile strength. The findings demonstrate that the obtained highest tensile strength for alloy was 580 MPa at the hot rolling deformation of 70%, aging temperature 150 °C, and the 10-hour aging time.

Từ khoá: B95; 7075; Thermo-mechanical; Aging; Taguchi.