

NGHIÊN CỨU THÔNG SỐ QUY TRÌNH PHAY COMPOSITE Al6061/SiC BẰNG KỸ THUẬT TAGUCHI KẾT HỢP THUẬT TOÁN DI TRUYỀN

STUDY OF PROCESS PARAMETERS FOR MILLING Al6061/SiC COMPOSITE USING TAGUCHI TECHNIQUE COMBINED WITH GENETIC ALGORITHM

TRẦN HỮU THÀNH¹, BÙI CÔNG NAM¹, VŨ THỊ THU TRANG^{2*}

¹Sinh viên Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

²Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email liên hệ: trangvtt.vck@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1059>

Tóm tắt

Bài báo trình bày phương pháp nghiên cứu thông số phay CNC cho vật liệu composite Al6061/SiC được chế tạo bằng phương pháp đúc khuấy cơ học. Thí nghiệm phay được thiết kế theo ma trận Taguchi L9 nhằm đánh giá ảnh hưởng của tốc độ trục chính, lượng chạy dao và chiều sâu cắt đến độ nhám bề mặt (Ra) và tốc độ bóc tách vật liệu (MRR). Kết quả ANOVA cho thấy lượng chạy dao ảnh hưởng lớn nhất đến Ra (69,25%), trong khi chiều sâu cắt chi phối MRR (56,54%). Mô hình hồi quy đa thức được xây dựng và tối ưu hóa đa mục tiêu bằng biến thể của thuật toán di truyền NSGA-II. Dựa trên phương pháp chuẩn hóa trọng số cân bằng, bộ thông số tốt nhất được xác định tại vòng quay 3932 vòng/phút, lượng chạy dao 172mm/phút và chiều sâu cắt 0,7mm, cho Ra dự đoán 0,56μm và MRR 772mm³/phút. Phương pháp Taguchi-NSGA-II đã được chứng minh hiệu quả trong tối ưu hóa gia công vật liệu composite.

Từ khóa: Al6061/SiC, Taguchi, NSGA-II, Ra, MRR.

Abstract

This study presents an approach for investigating CNC milling parameters of Al6061/SiC composite material fabricated by the stir casting method. Milling experiments were designed using the Taguchi L9 orthogonal array to evaluate the effects of spindle speed, feed rate, and depth of cut on surface roughness (Ra) and material removal rate (MRR). ANOVA results indicate that feed rate has the most significant influence on surface roughness (69.25%), while depth of cut predominantly affects the material removal rate (56.54%). Polynomial regression models were developed, and multi-objective optimization was performed using a variant of the genetic

algorithm. Based on the balanced weight normalization method, the optimal machining parameters were determined at a spindle speed of 3932 rpm, a feed rate of 172 mm/min, and a depth of cut of 0.7 mm, resulting in a predicted Ra of 0.56 μm and an MRR of 772 mm³/min. The Taguchi-NSGA-II approach demonstrates its effectiveness in optimizing the machining performance of composite materials.

Keywords: Al6061/SiC, Taguchi, NSGA-II, Ra, MRR.

1. Mở đầu

Vật liệu composite nền kim loại (MMC), đặc biệt là hợp kim nhôm Al6061 được gia cường bằng các hạt SiC đang ngày càng khẳng định vai trò chiến lược trong các ngành công nghiệp hàng không, sản xuất ô tô và quốc phòng [1, 2]. Sự kết hợp này mang lại các đặc tính cơ lý vượt trội như tỷ lệ độ bền trên khối lượng cao, độ cứng và khả năng chống mài mòn được cải thiện đáng kể. Tuy nhiên, chính sự hiện diện của các hạt gia cường SiC độ cứng cao phân tán trong nền nhôm dẻo lại khiến cho composite Al6061/SiC trở thành một trong những vật liệu khó gia công [1, 3, 4].

Trong gia công cắt gọt, đặc biệt là nguyên công phay với bản chất cắt gián đoạn, các lưỡi cắt liên tục va chạm với các hạt SiC dị hướng, dẫn đến mài mòn dụng cụ nhanh chóng và làm suy giảm độ nhẵn bóng của bề mặt gia công. Một số phân tích thực nghiệm đã chỉ ra khi bổ sung hàm lượng lớn SiC trong nền Al6061, cơ chế hình thành phoi chịu ảnh hưởng lớn bởi hiện tượng cày xước và bật hạt khỏi nền, làm tăng đáng kể độ nhám bề mặt (Ra) so với hợp kim nhôm thông thường [5-7]. Trong thực tiễn sản xuất, người kỹ sư luôn phải đối mặt với một bài toán có tính xung đột, việc gia tăng các thông số cắt để nâng cao tốc độ bóc tách vật liệu (MRR) nhằm tăng năng suất sẽ ảnh hưởng lớn đến chất lượng bề mặt, làm tăng độ nhám Ra và ngược lại. Do đó, việc xác định bộ thông số

công nghệ phù hợp để cân bằng 2 yếu tố mâu thuẫn này là một yêu cầu cấp thiết.

Để giải quyết bài toán tối ưu thông số gia công, các phương pháp thống kê truyền thống như kỹ thuật thiết kế thực nghiệm Taguchi đã được ứng dụng rộng rãi nhờ khả năng giảm thiểu số lượng thí nghiệm, tiết kiệm chi phí và đánh giá tốt mức độ ảnh hưởng của từng thông số [8, 9]. Dù vậy, Taguchi thường bị giới hạn ở việc tìm kiếm các điểm tối ưu cục bộ nằm trong các mức thực nghiệm đã định sẵn và gặp nhiều khó khăn khi xử lý đa mục tiêu. Để vượt qua giới hạn này, việc tích hợp các phương pháp như ra quyết định đa tiêu chí (MCDM) hay các mô hình toán học với thuật toán tiến hóa điển hình là thuật toán di truyền (GA), tối ưu bầy đàn (PSO), lập trình tiến hóa (EP),... đang trở thành một xu hướng nghiên cứu được quan tâm [10, 11]. Trong đó, biến thể thuật toán di truyền phân loại không chi phối (NSGA-II) được đánh giá là công cụ cực kỳ ưu việt để khám phá không gian nghiệm liên tục, từ đó thiết lập một tập hợp các giải pháp lý tưởng cho các bài toán đa mục tiêu [12].

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về gia công MMC, việc xây dựng phương pháp nghiên cứu từ khâu đúc phôi đến tối ưu thông số phay bằng thuật toán NSGA-II cho riêng hệ vật liệu composite Al6061/SiC vẫn còn khá ít. Do đó, nghiên cứu này được thực hiện với mục tiêu xây dựng một nền tảng tối ưu đa mục tiêu cho nguyên công phay composite Al6061/SiC được chế tạo từ phương pháp đúc khuấy. Quá trình nghiên cứu bao gồm ba giai đoạn: (1) chế tạo phôi vật liệu Al6061/SiC bằng phương pháp đúc khuấy cơ học với hàm lượng 6% hạt SiC; (2) tiến hành phay thực nghiệm dựa trên mảng trực giao Taguchi L9 để đánh giá tác động của vòng quay trục chính, tốc độ chạy dao, và chiều sâu cắt, qua đó xây dựng phương trình hồi quy toán học cho Ra và MRR ; (3) cuối cùng, ứng dụng thuật toán NSGA-II trên môi trường MATLAB để tìm kiếm tập hợp thông số tối ưu Pareto, cung cấp cơ sở dữ liệu linh hoạt và đáng tin cậy cho quá trình thiết lập gia công trong thực tế.

2. Nguyên liệu và phương pháp thực nghiệm

2.1. Chế tạo vật liệu composite Al6061/SiC

Vật liệu nền được sử dụng trong nghiên cứu này là hợp kim nhôm Al6061 thương mại theo tiêu chuẩn ASTM B209, kết hợp với tỷ lệ 6% theo khối lượng pha gia cường là các hạt SiC kích thước 320 Grit. Hàm lượng 6% khối lượng SiC được lựa chọn dựa trên một số nghiên cứu trước đây về gia công composite Al6061/SiC. Đây là một mức gia cường trung gian nhằm cân bằng giữa khả năng cải thiện cơ tính, chống

mài mòn của nền Al6061 và khả năng chế tạo, gia công [13, 14]. Phôi composite được chế tạo thông qua phương pháp đúc khuấy cơ học nhằm đảm bảo sự phân tán đồng đều của các hạt gia cường. Thiết bị đúc khuấy được thể hiện trong Hình 1. Các thỏi nhôm Al6061 được gia nhiệt và nấu chảy trong lò nung ở nhiệt độ 750°C. Các hạt gốm SiC được nung nóng sơ bộ ở nhiệt độ 400°C trước khi được đưa vào đúc khuấy, quá trình xử lý nhiệt này có vai trò giúp loại bỏ hoàn toàn độ ẩm trên bề mặt hạt, hạn chế sự hình thành bọt khí và tăng cường độ thấm ướt giữa pha gia cường và nhôm lỏng. Sau đó, hạt SiC được đưa từ từ vào dòng xoáy kim loại lỏng tạo ra bởi hệ thống cánh khuấy với tốc độ 500 vòng/phút. Dòng nhôm lỏng được duy trì khuấy liên tục trong 15 phút để các hạt phân tán đều trước khi được rót vào khuôn kim loại để đông đặc. Các thông số đúc khuấy và hàm lượng SiC được lựa chọn dựa trên các nghiên cứu về chế tạo vật liệu Al6061/SiC nhằm đảm bảo sự cân bằng giữa các cơ lý tính của vật liệu [15, 16]. Mẫu phôi sau khi đúc được phay phẳng các mặt với kích thước $L \times B \times H = 70 \times 40 \times 20 \text{ mm}$ để thiết lập bề mặt chuẩn cho quá trình gia công thực nghiệm tiếp theo.



Hình 1. Hệ thống đúc khuấy vật liệu composite

2.2. Thiết kế thực nghiệm theo Taguchi

Để xây dựng mô hình toán học dự đoán độ nhám Ra và năng suất MRR ở giai đoạn phay tiếp theo một cách hiệu quả nhất, phương pháp thiết kế thực nghiệm Taguchi đã được áp dụng. Ba thông số công nghệ có ảnh hưởng trực tiếp đến nguyên công phay được chọn làm biến độc lập bao gồm: Tốc độ quay trục chính (S), tốc độ cắt (V) và chiều sâu cắt (T).

Mỗi thông số được khảo sát ở 3 mức khác nhau được lựa chọn dựa trên nghiên cứu tổng quan của tác giả Zhigao Chen về gia công vật liệu Al6061/SiC và

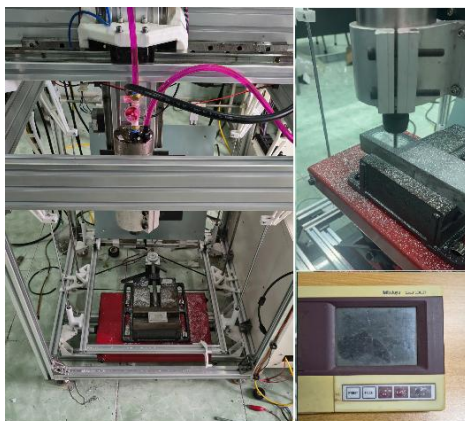
phù hợp với thiết bị phay thực nghiệm hiện có cũng như đủ rộng để phản ánh xu hướng ảnh hưởng đến Ra và MRR [1]. Với 3 yếu tố kiểm soát ở 3 mức độ, mảng trực giao $L9$ của Taguchi được lựa chọn để thiết kế ma trận thực nghiệm. Việc sử dụng mảng $L9$ vì chỉ yêu cầu thực hiện 9 lần chạy thí nghiệm nhưng vẫn đảm bảo đủ dữ liệu thống kê để phân tích phương sai (ANOVA) và thiết lập phương trình hồi quy cho cả hai mục tiêu. Bảng thông số và các mức thực nghiệm được thể hiện trong Bảng 1.

Bảng 1. Thiết kế thực nghiệm phay Al6061/SiC theo Taguchi $L9$

Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Mức 1	Mức 2	Mức 3
Vòng quay trục chính	S	vòng/phút	3000	3500	4000
Tốc độ chạy dao	V	mm/phút	100	150	200
Chiều sâu cắt	T	mm	0.3	0.5	0.7

2.3. Thiết lập máy phay và đo lường

Quá trình phay thực nghiệm được tiến hành trên máy CNC 3 trục đa năng model MCST-v1.0 với điều kiện cắt gọt không tươi nguội. Thiết bị phay có kích thước tổng thể 660x660x1650mm, công suất 2,2kW, vòng quay trục chính max 24000 vòng/phút, tốc độ chạy dao gia công lớn nhất 5000 mm/phút (Hình 2).



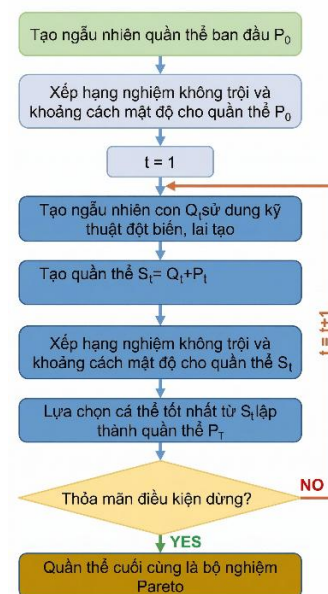
Hình 2. Máy phay CNC và thiết bị đo độ nhám SJ-301

Dụng cụ cắt được lựa chọn là dao phay ngón hợp kim cứng carbide D7xD8x60L 3F 55HRC. Để phục vụ cho bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu, hai đáp ứng đầu ra được đo lường và tính toán bao gồm độ nhám bề mặt đặc trưng cho chất lượng bề mặt chi tiết, được đo đạc bằng máy đo biên dạng nhám Mitutoyo SJ-301.

Quá trình đo được tiến hành dọc theo phương tiến dao trên bề mặt đã gia công. Tại mỗi rãnh phay, độ nhám được đo tại ít nhất 3 vị trí ngẫu nhiên khác nhau và lấy giá trị trung bình. Chỉ số MRR đại diện cho năng suất bóc tách phoi, được tính toán thông qua phương trình động học dựa trên các thông số thiết lập của quá trình phay: $MRR = V_x T_x B$, trong đó, V là tốc độ chạy dao (mm/phút), T là chiều sâu cắt (mm) và B là chiều rộng lớp cắt ngang (mm). Kết quả đo lường sau đó sẽ được phân tích Taguchi và tìm nghiệm tối ưu bằng thuật toán di truyền thông qua Matlab.

2.4. Thuật toán di truyền tối ưu đa mục tiêu

Trong thuật toán di truyền, một biến thể là thuật toán di truyền phân loại không chi phối II (NSGA-II) thường được sử dụng để giải các bài toán có nhiều hàm mục tiêu xung đột nhau. Trong quá trình phay composite Al6061/SiC, yêu cầu giảm độ nhám bề mặt thường mâu thuẫn với việc tăng năng suất bóc tách vật liệu. Vì vậy, NSGA-II được sử dụng để tìm tập nghiệm Pareto, trong đó mỗi nghiệm thể hiện sự cân bằng giữa các mục tiêu.



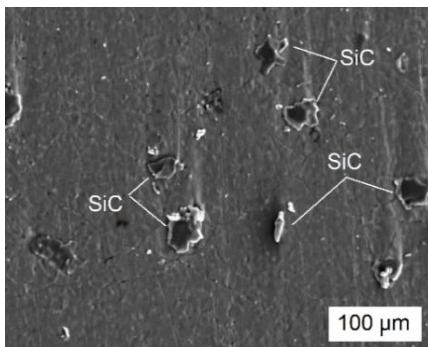
Hình 3. Sơ đồ thuật toán NSGA-II

Nguyên lý của NSGA-II dựa trên ưu thế Pareto, trong đó một nghiệm được xem là trội hơn nghiệm khác nếu nó không kém ở tất cả các mục tiêu và tốt hơn ít nhất một mục tiêu. Dựa trên tiêu chí này, quần thể được phân thành các tập nghiệm không trội $F_1, F_2, \dots$ đồng thời kết hợp với toán tử khoảng cách đám đông để duy trì sự phân bố đều của các nghiệm trên biên Pareto, tránh việc các nghiệm bị hội tụ cục bộ tại một điểm [17]. Sơ đồ thuật toán NSGA-II được thể hiện trong Hình 3.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Phân tích tổ chức Al6061/SiC sau chế tạo

Ảnh SEM bề mặt của mẫu composite Al6061/SiC sau quá trình đúc khuấy trong Hình 4 cho thấy cấu trúc hai pha rõ rệt. Trong ảnh, vùng sáng màu là nền hợp kim nhôm Al6061, trong khi các hạt màu tối, có hình dạng góc cạnh đa giác đặc trưng là pha gia cường SiC. Quan sát cấu trúc bề mặt cho thấy các hạt SiC được phân tán tương đối đồng đều trên toàn bộ nền nhôm. Không quan sát thấy hiện tượng tập trung vón cục của các hạt gia cường. Sự phân bố khá đồng đều của SiC với 6% khối lượng cho thấy hiệu quả của cơ chế khuấy tạo dòng xoáy liên tục trong quá trình nấu đúc. Bên cạnh đó, quan sát vùng biên giới giữa các hạt SiC riêng lẻ và nền nhôm không có sự xuất hiện của các lỗ xốp hay khe hở phân tách vi mô, điều này cho thấy sự liên kết mật phân cách chặt chẽ của pha gia cường và nền. Cấu trúc này đảm bảo phối vật liệu đạt được tính đẳng hướng tương đối về mặt cơ học, do đó các kết quả đo lường Ra và chỉ số MRR thu được từ ma trận thí nghiệm Taguchi L9 sẽ phản ánh được bản chất tương tác giữa dao cắt và tổ hợp nền - pha gia cường dưới sự thay đổi của các thông số công nghệ mà không bị nhiễu bởi các khuyết tật đúc gây ra.



Hình 4. Ảnh SEM hình thái bề mặt Al6061/SiC

3.2. Ảnh hưởng của thông số phay đến độ nhám bề mặt

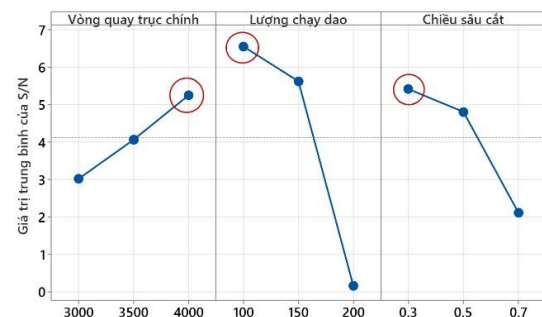
Kết quả thí nghiệm phay dựa trên thiết kế mảng trực giao L9 của Taguchi được trình bày trong Bảng 2. Tỷ số S/N của Ra được xác định theo tiêu chí "càng nhỏ càng tốt", trong khi đối với MRR là "càng lớn càng tốt".

Đánh giá hiệu ứng chính thông qua giá trị trung bình S/N thể hiện trong Hình 5, cho thấy lượng chạy dao thể hiện tác động phi tuyến đến Ra , giá trị S/N duy trì ổn định ở mức chạy dao thấp nhưng sụt giảm đột ngột khi tốc độ đẩy lên 200mm/phút. Hiện tượng này là do ở lượng chạy dao cao, lực va đập vượt sức bền liên kết của nền nhôm khiến các hạt SiC cứng bị

đứt gãy giòn và đánh bật ra khỏi ma trận, để lại vết rỗ trên bề mặt làm Ra tăng vọt. Trong khi, vòng quay trục chính lại ảnh hưởng tuyến tính hơn đến Ra và giá trị S/N đạt đỉnh ở mức 4000 vòng/phút. Nhiệt lượng sinh ra ở tốc độ cao giúp triệt tiêu đáng kể lẹo dao, cùng với đó là lớp bề mặt bị giảm biến dạng dẻo giúp cho độ nhám bề mặt giảm đi. Sự sụt giảm tính tiến của đường S/N khi tăng chiều sâu cắt từ 0,3mm lên 0,7mm là hệ quả của việc gia tăng diện tích tiếp xúc, khiến nhiều hạt SiC cào xước vào lưỡi cắt và gây rung động cho trục chính khiến Ra tăng lên. Kết quả phân tích S/N cho thấy thông số S4000-V100-T0.3 cho kết quả đơn mục tiêu Ra nhỏ nhất.

Bảng 2. Kết quả thực nghiệm theo Taguchi L9

TT	S, vòng/ph	V, mm/ph	T, mm	Ra , μm	MRR, mm^3/ph	S/N Ra	S/N MRR
1	3000	100	0.3	0.45	210	6.94	-46.44
2	3000	150	0.5	0.58	525	4.73	-54.40
3	3000	200	0.7	1.35	980	-2.61	-59.82
4	3500	100	0.5	0.42	350	7.54	-50.88
5	3500	150	0.7	0.65	735	3.74	-57.33
6	3500	200	0.3	0.90	420	0.92	-52.46
7	4000	100	0.7	0.55	490	5.19	-53.80
8	4000	150	0.3	0.38	315	8.40	-49.97
9	4000	200	0.5	0.78	700	2.16	-56.90



Hình 5. Biểu đồ hiệu ứng chính của Ra

Bảng 3. Phân tích ANOVA của Ra

Thông số	Bậc tự do	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value	Tác động, %
S	2	0.076	0.038	6.23	0.138	10.21
V	2	0.516	0.258	42.3	0.023	69.25
T	2	0.140	0.070	11.55	0.08	18.90
Lỗi	2	0.012	0.006			1.64
Tổng	8	0.745				100.00

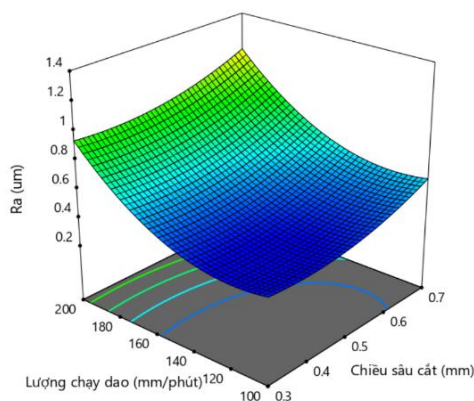
Để định lượng mức độ ảnh hưởng của từng thông số độc lập đến sự thay đổi của Ra , phân tích ANOVA

được áp dụng trong Bảng 3 cho thấy lượng chạy dao (V) là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất với mức đóng góp lên tới 69,25% và có ý nghĩa thống kê cao khi $p\text{-value}=0,023$. Đứng thứ hai là chiều sâu cắt (T) với mức ảnh hưởng 18,90%, trong khi vòng quay trục chính (S) đóng góp ít nhất với 10,21%. Đặc biệt, tỷ lệ sai số dự của mô hình chỉ chiếm 1,64%, điều này khẳng định quá trình bố trí thực nghiệm và đo lường đã được kiểm soát tốt, gần như không bị ảnh hưởng bởi các biến nhiễu từ môi trường.

Do tính phức tạp chứa các đường cong phi tuyến và sự tương tác giữa các thông số phay, mô hình hồi quy bề mặt đáp ứng (RSM) đa thức bậc hai đã được sử dụng để xác định phương trình hồi quy dự đoán Ra như sau:

$$Ra = 1.109 + 0.000197 S - 0.00943 V - 1.617 T + 0.000082 V^2 + 2.125 T^2 - 0.000003 SxV \quad (1)$$

Kiểm định mô hình hồi quy có giá trị $p\text{-value}=0,015$ cho thấy mô hình có ý nghĩa thống kê. Giá trị R^2 đạt 0,995 và R^2 dự đoán là 0,869 chứng tỏ mô hình đã mô tả tốt sự biến thiên của dữ liệu và phù hợp để sử dụng dự đoán các kết quả Ra . Mức độ tương tác của 2 thông số có ảnh hưởng lớn nhất đến Ra là lượng chạy dao và chiều sâu cắt từ mô hình hồi quy được thể hiện trong Hình 6. Phương trình (1) được sử dụng làm hàm mục tiêu trong không gian tìm kiếm của thuật toán NSGA-II ở giai đoạn tìm nghiệm tối ưu.



Hình 6. Ảnh hưởng tương tác của lượng chạy dao và chiều sâu cắt đến Ra

3.3. Ảnh hưởng của thông số phay đến chỉ số MRR.

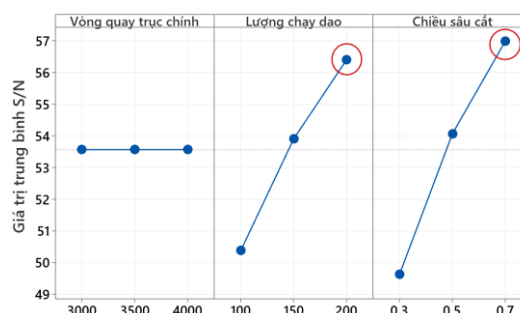
Bên cạnh Ra , MRR là một chỉ số quan trọng phản ánh trực tiếp năng suất gia công. Phân tích ANOVA đối với chỉ số MRR trong Bảng 4 cho thấy chiều sâu cắt là yếu tố đóng vai trò chi phối lớn nhất với tỷ lệ đóng góp lên tới 56,54% và mang ý nghĩa thống kê

cao khi giá trị $p\text{-Value}=0,036$. Đứng thứ hai là lượng chạy dao với mức đóng góp 39,27% và $p\text{-Value}=0,051$ cũng xấp xỉ mức ý nghĩa thống kê 0,05 thường dùng trong các nghiên cứu. Ngược lại, vòng quay trục chính gần như không có tác động đến MRR khi chỉ đóng góp vào 2,09%. Tỷ lệ sai số của mô hình dừng ở mức thấp là 2,09%, một lần nữa khẳng định độ tin cậy của quá trình thực nghiệm.

Bảng 4. Phân tích ANOVA của MRR

Thông số	Bậc tự do	Adj SS	Adj MS	F-Value	p-Value	Tác động, %
S	2	9800	4900	1.00	0.500	2.09
V	2	183750	91875	18.75	0.051	39.27
T	2	264600	132300	27.00	0.036	56.54
Lỗi	2	9800	4900			2.09
Tổng	8	467950				100.00

Sự phân bố mức độ ảnh hưởng này cũng được phản ánh trực quan thông qua biểu đồ hiệu ứng chính thể hiện trong Hình 7. Đường đồ thị nằm ngang hoàn toàn đối với vòng quay trục chính xác nhận sự độc lập của MRR với vùng tốc độ cao của trục chính. Trong khi đó, các đường đồ thị có độ dốc lớn đối với lượng chạy dao và chiều sâu cắt minh chứng cho mối tương quan tuyến tính thuận chiều. Về bản chất quá trình cắt gọt, điều này hoàn toàn phù hợp với thực tế vì thể tích phoi bóc tách trong một đơn vị thời gian tỷ lệ thuận trực tiếp với tiết diện lớp cắt được quyết định bởi chiều sâu cắt và vận tốc tiến của dao.



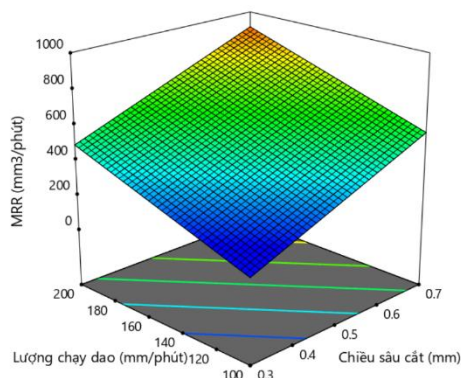
Hình 7. Biểu đồ hiệu ứng chính của MRR

Mối quan hệ tuyến tính này được mô hình hóa thông qua phương trình hồi quy (2):

$$MRR = -280 - 0.07 S + 3.5 V + 1050 T \quad (2)$$

Mô hình dự đoán MRR đạt độ tin cậy cao với giá trị $p\text{-value} = 0,0001$, hệ số R^2 lên tới 97,38% và R^2 dự đoán đạt 89,22%. Mức độ tương tác của 2 thông số có ảnh hưởng lớn nhất đến MRR là lượng chạy dao và chiều sâu cắt từ mô hình hồi quy được thể hiện trong

Hình 8. Việc so sánh phương trình (2) với phương trình hồi quy (1) của Ra ở mục 3.2 cho thấy sự mâu thuẫn trong quá trình gia công. Để tối đa hóa năng suất MRR bắt buộc phải tăng lượng chạy dao và chiều sâu cắt, nhưng chính hành động này lại ảnh hưởng lớn đến chất lượng bề mặt. Điều này đòi hỏi phải ứng dụng các thuật toán tối ưu hóa đa mục tiêu như NSGA-II để tìm ra các tập Pareto cân bằng giữa năng suất và chất lượng.



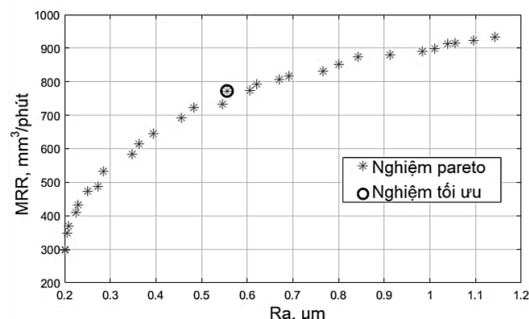
Hình 8. Ảnh hưởng tương tác của lượng chạy dao và chiều sâu cắt đến MRR

3.4. Tối ưu hóa đa mục tiêu bằng thuật toán di truyền NSGA-II

Như đã phân tích, sự tương phản giữa độ nhám bề mặt và năng suất bóc tách vật liệu đòi hỏi một phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu để tìm ra các điểm cân bằng lý tưởng. Các phương trình hồi quy đa thức của Ra và MRR thu được từ phân tích ANOVA được mã hóa trực tiếp thành các hàm mục tiêu trong MATLAB. Điều kiện biên của thuật toán được giới hạn dựa trên các thông số thực nghiệm của máy CNC với S từ 3000 đến 4000 vòng/phút, V từ 100 đến 200mm/phút và T 0,3 đến 0,7mm. Nhằm đảm bảo duy trì tính đa dạng của quần thể và khả năng hội tụ, kích thước quần thể được lựa chọn là 100 cá thể và cho phép tiến hóa liên tục qua 1000 thế hệ. Sau mỗi vòng lặp tiến hóa, số lượng cá thể được giữ lại là 30 cá thể. Tiêu chí duy trì đa dạng nghiệm được sử dụng là hàm khoảng cách đám đông (crowding distance), trong khi hàm lai ghép được sử dụng hàm trung gian.

Thông qua các toán tử chọn lọc, lai ghép và đột biến, thuật toán NSGA-II đã cho kết quả là một tập Pareto bao gồm một loạt các nghiệm không chi phối lẫn nhau. Biểu đồ phân tán nghiệm Pareto trong Hình 8 phác họa rõ nét đường cong đánh đổi đặc trưng giữa chất lượng bề mặt và năng suất gia công. Đồ thị cho thấy sự gia tăng liên tục của năng suất bóc tách phiêu luôn phải đánh đổi bằng sự suy giảm độ nhám bề mặt

chi tiết. Tập hợp nghiệm Pareto này mang tính linh hoạt cao trong thực tiễn sản xuất, cho phép người sử dụng tùy chọn một chế độ gia công tương ứng với từng ưu tiên riêng biệt.



Hình 9. Đồ thị tập nghiệm Pareto và nghiệm tối ưu
Bảng 5. So sánh kết quả tối ưu và kiểm nghiệm

TT	Thông số	NSGA-II	Kiểm nghiệm	Sai số, %
1	S (vòng/phút)	3932	3932	
2	V (mm/phút)	172	172	
3	T (mm)	0.7	0.7	
4	Ra (μm)	0.56	0.59	5.1
5	MRR ($mm^3/phút$)	772	842	8.3

Tuy nhiên, để xác định một bộ thông số vận hành tối ưu duy nhất mang tính cân bằng cho các mục tiêu, một phương pháp ra quyết định dựa trên trọng số đã được áp dụng. Cụ thể, các giá trị Ra và MRR trong tập nghiệm đã được chuẩn hóa, sau đó một hàm mục tiêu tổng hợp được thiết lập bằng cách gán trọng số 0,5 cho cả hai chỉ số, qua đó đảm bảo sự đóng góp của năng suất và chất lượng là hoàn toàn ngang nhau đối với quyết định cuối cùng. Thông qua quá trình chuẩn hóa và tính toán trọng số, nghiệm tối ưu được xác định trong Bảng 5. Tại điều kiện gia công này, mô hình toán học dự đoán $Ra=0,56\mu m$, $MRR=772mm^3/phút$. Kết quả kiểm nghiệm bộ thông số cho thấy sai số giữa kiểm nghiệm và dự đoán trong khoảng 5~8%, cho thấy NSGA-II cung cấp là một giải pháp có độ tin cậy và có thể áp dụng vào sản xuất thực tế.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã chế tạo và thực nghiệm phay thành công vật liệu composite Al6061 gia cường SiC bằng phương pháp đúc khuấy cơ học. Thực nghiệm Taguchi L9 được sử dụng để xây dựng mô hình dự đoán độ nhám bề mặt và tốc độ bóc tách vật liệu với độ tin cậy cao (R^2 đạt 99,51% và 97,38%). Phân tích

ANOVA chỉ ra rằng lượng chạy dao ảnh hưởng mạnh nhất đến độ nhám bề mặt là 69,25%, trong khi chiều sâu cắt chỉ phối năng suất gia công là 56,54%.

Sự đánh đổi giữa chất lượng bề mặt và năng suất được tối ưu bằng thuật toán di truyền đa mục tiêu NSGA-II, từ đó xác định bộ thông số gia công tối ưu cho sự cân bằng giữa chất lượng và năng suất gồm tốc độ trục chính 3932 vòng/phút, lượng chạy dao 172mm/phút và chiều sâu cắt 0,7mm. Ở điều kiện này, kết quả dự đoán $Ra=0,56\mu m$ đồng thời duy trì MRR đạt 772mm³/phút. Kết quả kiểm nghiệm cho thấy mức sai số phù hợp với dự đoán. Nghiên cứu cung cấp cơ sở thiết lập thông số gia công hiệu quả và khẳng định tiềm năng của việc kết hợp mô hình thống kê với các thuật toán di truyền trong tối ưu hóa gia công vật liệu composite.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, đề tài mã số: **SV25-26.22**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Chen, Z., Ding, F., Zhang, Z., Liao, Q., Qiao, Z., Jin, Y., Chen, M., & Wang, B. (2024), *A Review on Machining SiCp/Al Composite Materials*, Micromachines (Basel), Vol.15.
Doi: 10.3390/mi15010107.
- [2] Vũ, V. Q. (2023), *Tổ chức, độ cứng và độ dai va đập của vật liệu composite AZ91/SiC ứng dụng trong chi tiết kết cấu ô tô*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 73 (01/2023), tr.35-39.
- [3] Teferi, F. T., Kolhe, K. P., Tsegaw, A. A., Borena, T. G., & Avvari, M. (2022), *The Advancement of Aluminum Metal Matrix Composite Reinforced with Silicon Carbide Particles (Al-6061/SiCp): A Review*, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, LNICST.
Doi: 10.1007/978-3-030-93712-6_22.
- [4] Manickam, B. K., Dennison, M. S., Kuppusamy Vellingiri, S. K., & Sellasamy, S. (2025), *Optimization of drilling parameters for Al6061/Al6063-SiC-ZrO₂ composites using TOPSIS considering microstructure and machinability*, Sci. Rep., Vol.15.
Doi: 10.1038/s41598-025-23094-9.
- [5] Balonji, S., Tartibu, L. K., & Okokpujie, I. P. (2023), *Prediction Analysis of Surface Roughness of Aluminum Al6061 in End Milling CNC Machine Using Soft Computing Techniques*, Applied Sciences (Switzerland), Vol.13.
Doi: 10.3390/app13074147.
- [6] Dabade, U. A., & Joshi, S. S. (2009), *Analysis of chip formation mechanism in machining of Al/SiCp metal matrix composites*, J. Mater. Process. Technol., Vol.209.
Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.10.057.
- [7] Wang, R., Zhao, M., Mao, J., & Liang, S. Y. (2022), *Force Prediction and Material Removal Mechanism Analysis of Milling SiCp/2009Al*, Micromachines (Basel), Vol.13.
Doi: 10.3390/mi13101687.
- [8] Setyo Pradana, E., & Sulistiyowati, W. (2022), *Literature Review: Use of the Taguchi Method for Quality Improvement*, PROZIMA (Productivity, Optimization and Manufacturing System Engineering), Vol.6.
Doi: 10.21070/prozima.v6i2.1575.
- [9] Vũ, V. Q., Đình, X. T., & Vũ, T. T. T. (2026), *Nghiên cứu tối ưu thông số in 3D FDM sử dụng kết hợp thiết kế thực nghiệm Taguchi và TOPSIS*, Tạp chí Khoa học Công nghệ Hàng hải, Số 85 (01/2026), tr.21-29.
Doi: 10.65154/jmst.787.
- [10] Shams, A., Bozorgi, E., Darbandi, M. R. N., Amirian, S., & Rasheed, K. (2026), *Evolutionary Computing Applications and Trends from 2010 to 2025: A Brief Review*.
Doi: 10.1007/978-3-032-13056-3_18.
- [11] Vikhar, P. A. (2017), *Evolutionary algorithms: A critical review and its future prospects*, Proceedings - International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication, ICGTSPICC 2016.
Doi: 10.1109/ICGTSPICC.2016.7955308.
- [12] Zhang, Y. (2025), *Review of evolutionary computation*, International Conference on Computer Application and Information Security (ICCAIS 2024), SPIE, pp.856-868.
Doi: 10.1117/12.3060608.
- [13] Jayashree, P. K., Sharma, S., Kumar, S., Bhagyalaxmi, Bangera, M., & Bhat, R. (2023), *Tension and Impact Analysis of Tungsten Inert Gas Welded Al6061-SiC Composite*, Journal of

Composites Science, Vol.7.

Doi: 10.3390/jcs7020078.

- [14] Venkatesh, B. N., Hebbal, U., Yogesha, K. B., Mruthunjaya, M., & Swamy, G. M. (2024), *Enhancing Tribological Characteristics of AA6061-SiC Composites via Response Surface Methodology*, Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, Vol.105.

Doi: 10.1007/s40033-023-00610-7.

- [15] Maurya, N. K., Maurya, M., Srivastava, A. K., Dwivedi, S. P., Kumar, A., & Chauhan, S. (2020), *Investigation of mechanical properties of Al 6061/SiC composite prepared through stir casting technique*, Mater. Today Proc., Vol.25, pp.755-758.

Doi: 10.1016/j.matpr.2019.09.003.

wear properties, Manuf. Rev. (Les. Ulis), Vol.6.

Doi: 10.1051/mfreview/2019021.

- [17] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002), *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol.6.

Doi: 10.1109/4235.996017.

Ngày nhận bài:	13/03/2026
Ngày nhận bản sửa:	23/03/2026
Ngày duyệt đăng:	30/03/2026

- [16] Bhat, A., & Kakandikar, G. (2019), *Manufacture of silicon carbide reinforced aluminium 6061 metal matrix composites for enhanced sliding*