

**ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG CỦA SiC ĐẾN ĐỘ CỨNG
VÀ ĐỘ DAI VÀ ĐẬP CỦA VẬT LIỆU COMPOSITE Al6061/SiC
CHẾ TẠO BẰNG PHƯƠNG PHÁP ĐÚC KHUẤY**
**EVALUATING THE EFFECT OF SiC ON THE HARDNESS AND IMPACT
TOUGHNESS OF Al6061/SiC COMPOSITE MATERIALS FABRICATED
BY THE STIR CASTING METHOD**
VŨ VIỆT QUYỀN

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

Email liên hệ: quyenvv.cndt@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.1031>

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng hạt gia cường SiC đến độ cứng và độ dai va đập của vật liệu composite nền hợp kim nhôm 6061. Vật liệu được chế tạo bằng phương pháp đúc khuấy có khí bảo vệ Ar với hàm lượng SiC thay đổi lần lượt là 0, 2, 4, 6 và 8% theo khối lượng. Kết quả cho thấy độ cứng Rockwell của vật liệu tăng tuyến tính với hàm lượng SiC, đạt giá trị cao nhất 53,8HRB tại mẫu 8% SiC, tương ứng mức tăng gần 20% so với hợp kim nền. Ngược lại, độ dai va đập Charpy có sự biến thiên khi đạt giá trị lớn nhất 24,8J tại hàm lượng 4% SiC, sau đó giảm dần xuống 19,2J với mẫu 8% SiC. Phân tích ảnh SEM bề mặt nứt gãy xác nhận sự chuyển đổi cơ chế phá hủy từ dẻo với nhiều lỗ mìn ở hàm lượng SiC thấp sang phá hủy giòn ở hàm lượng cao. Kết quả nghiên cứu chỉ ra sự đánh đổi giữa độ cứng và độ dai va đập của vật liệu composite khi tăng hàm lượng pha gia cường, phụ thuộc vào yêu cầu chế tạo có thể lựa chọn được hàm lượng SiC cân bằng giữa độ cứng và khả năng hấp thụ năng lượng va đập cho vật liệu composite.

Từ khóa: Al6061/SiC, đúc khuấy, độ cứng, độ dai va đập.

Abstract

This paper investigates the influence of SiC reinforcement content on the hardness and impact toughness of Al6061 alloy matrix composites. The materials were fabricated using the stir casting method under an Ar shielding atmosphere, with SiC weight fractions of 0, 2, 4, 6 and 8%. The results demonstrate that the Rockwell hardness of the composite increases linearly with SiC content, reaching a peak value of 53.8 HRB at 8% SiC,

which corresponds to an improvement of nearly 20% compared to the base alloy. Conversely, the Charpy impact toughness exhibits a distinct variation, reaching its maximum value of 24.8 J at 4% SiC before gradually declining to 19.2 J for the 8% SiC sample. SEM analysis of the fracture surfaces confirms a transition in the failure mechanism from ductile fracture, characterized by numerous fine dimples at low SiC concentrations, to brittle fracture at higher reinforcement levels. The findings highlight a significant trade off between hardness and impact toughness as the reinforcement phase increases. This provides a basis for selecting a SiC content that balances stiffness and impact energy absorption capacity for composite materials.

Keywords: Al6061/SiC, stir casting, hardness, impact toughness.

1. Mở đầu

Trong những thập kỷ gần đây, sự phát triển nhanh chóng của các ngành công nghiệp hàng không, ô tô, hàng hải và quốc phòng đã làm gia tăng nhu cầu về các vật liệu nhẹ nhưng có cơ tính cao và khả năng làm việc tin cậy trong điều kiện tải trọng cao [1, 2]. Trong số các hợp kim nhôm, Al6061 được sử dụng rộng rãi nhờ tỷ số độ bền/khối lượng cao, khả năng chống ăn mòn, dẫn nhiệt và khả năng gia công tốt [3]. Tuy nhiên, hợp kim Al6061 vẫn tồn tại những hạn chế đáng kể như độ cứng thấp, khả năng chống mài mòn và khả năng chịu tải động chưa cao, khiến vật liệu khó đáp ứng yêu cầu của các chi tiết làm việc trong môi trường ma sát, va đập hoặc chịu tải trọng chu kỳ. Vì vậy, việc bổ sung các vật liệu gia cường cho hợp kim nhôm đã trở thành một hướng nghiên cứu quan trọng nhằm nâng cao cơ tính và mở rộng phạm vi ứng dụng của vật liệu [4, 5].

Composite nền kim loại là nhóm vật liệu được thiết kế bằng cách kết hợp nền kim loại với vật liệu gia cường nhằm tạo ra sự kết hợp tối ưu giữa độ bền, độ cứng và khả năng chống mài mòn trong khi vẫn duy trì ưu điểm nhẹ của nhôm. Tính chất của composite phụ thuộc mạnh vào loại vật liệu gia cường, hàm lượng, kích thước hạt, liên kết bề mặt cũng như công nghệ chế tạo. Trong số các vật liệu gia cường, silicon carbide (SiC) được xem là lựa chọn phổ biến nhất do có độ cứng rất cao, khối lượng riêng thấp, độ ổn định nhiệt tốt và khả năng tương thích cao với nền nhôm. Sự có mặt của các hạt SiC giúp hạn chế biến dạng dẻo của nền kim loại, tăng khả năng truyền tải tải trọng và cải thiện đáng kể độ cứng cũng như khả năng chống mài mòn của vật liệu composite [6, 7].

Trong các phương pháp chế tạo composite nền nhôm, đúc khuấy được xem là phương pháp luyện kim lỏng có tính kinh tế cao và phù hợp với sản xuất quy mô công nghiệp [8, 9]. Phương pháp này cho phép đưa các hạt gia cường vào kim loại lỏng thông qua quá trình khuấy cơ học để tạo dòng xoáy và phân tán hạt trước khi đúc. Tuy nhiên, quá trình này vẫn tồn tại các thách thức như khả năng thấm ướt kém, hiện tượng kết tụ hạt và sự hình thành rỗ xốp, các yếu tố có ảnh hưởng trực tiếp đến cấu trúc tế vi và cơ tính của vật liệu composite.

Nhiều nghiên cứu trước đây đã chứng minh hiệu quả rõ rệt của việc gia cường SiC đối với hợp kim Al6061. Nghiên cứu của Nagendra Kumar Maurya và các cộng sự đã chứng minh rằng việc bổ sung hạt SiC với kích thước trung bình 32µm giúp cải thiện đồng nhất cấu trúc vi mô và tăng dần độ cứng của composite Al6061/SiC khi hàm lượng hạt tăng từ 0 đến 5% khối lượng [10]. Kết quả cho thấy độ cứng đạt giá trị cực đại 45,5HRB tại hàm lượng 5% SiC, tương ứng với mức tăng 12,5% so với hợp kim nền ban đầu. Tương tự, tác giả Avinash Bhat cũng ghi nhận sự gia tăng độ cứng từ 81 HB lên 135

HB khi sử dụng 5% SiC có kích thước hạt 50µm, đồng thời khẳng định sự hiện diện của hạt SiC đóng vai trò quan trọng trong việc ngăn chặn biến dạng dẻo của pha nền [11].

Tuy nhiên, nhiều công trình nghiên cứu cũng chỉ ra sự gia tăng hàm lượng hạt gia cường thường đi kèm với sự suy giảm độ dẻo và độ dai va đập của vật liệu do bản chất giòn của hạt SiC và sự tập trung ứng suất tại biên giới nền và hạt [12-14]. Điều này cho thấy cơ tính của composite Al/SiC luôn tồn tại sự đánh đổi giữa độ cứng và khả năng hấp thụ năng lượng va đập. Các nghiên cứu về độ bền kéo, độ cứng và khả năng chống mài mòn hay đồng thời về độ dai va đập và độ

bền uốn của composite Al6061/SiC đã được công bố rộng rãi, tuy nhiên, nghiên cứu về mối quan hệ giữa độ cứng bề mặt và độ dai va đập chưa nhiều. Đa số các công trình trước đây thường có kết quả cho thấy độ dai va đập sẽ giảm tuyến tính khi bổ sung pha gia cường giòn như SiC, điều này dẫn đến việc thiếu hụt các dữ liệu thực nghiệm về khả năng cải thiện đồng thời cả độ cứng và năng lượng hấp thụ va đập. Trong khi đó, các chi tiết kỹ thuật trong ngành ô tô, hàng hải và hàng không thường làm việc dưới tải trọng động và va đập, đòi hỏi vật liệu phải đạt được sự cân bằng hợp lý giữa độ cứng bề mặt và khả năng hấp thụ năng lượng.

Xuất phát từ những yêu cầu thực tiễn đó, nghiên cứu này tiến hành chế tạo composite Al6061/SiC bằng phương pháp đúc khuấy với hàm lượng SiC thay đổi từ 0 đến 8% khối lượng và đánh giá một cách hệ thống ảnh hưởng của hàm lượng SiC đến độ cứng và độ dai va đập Charpy của vật liệu. Kết quả nghiên cứu kỳ vọng sẽ góp phần xác định hàm lượng gia cường tối ưu nhằm đạt được sự cân bằng giữa độ cứng và khả năng chịu va đập, qua đó cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng composite nền nhôm trong các kết cấu kỹ thuật chịu tải động.

2. Nguyên liệu và phương pháp thực nghiệm

2.1. Vật liệu nghiên cứu

Nguyên liệu nền được sử dụng trong nghiên cứu này là hợp kim nhôm Al6061 thương mại dạng thanh, một loại vật liệu có tính dẻo cao và khả năng chống ăn mòn tốt. Thành phần hóa học chủ yếu của hợp kim nhôm đáp ứng tiêu chuẩn ASTM B209 được thể hiện trong Bảng 1. Pha gia cường được sử dụng là bột SiC có kích thước hạt trung bình 50µm (Hình 1).

Bảng 1. Thành phần hóa học của hợp kim Al6061

Thành phần	Mg	Si	Cr	Cu	Fe	Mn	Zn	Al
%	0.8-0.4	0.04-0.15	<0.7	<0.15	<0.25	Còn lại		
Khối lượng	1.2	0.6	0.35	0.4				



Hình 1. Thanh nguyên liệu AL6061 và bột SiC

SiC có độ tinh khiết >99% theo công bố nhà sản xuất, có hình dạng góc cạnh, không đều được lựa chọn nhờ độ cứng cao, độ ổn định nhiệt tốt và khả năng tương thích với nền nhôm, giúp cải thiện đáng kể độ cứng và khả năng chịu mài mòn của vật liệu composite. Composite Al6061/SiC được chế tạo với các hàm lượng SiC lần lượt là 0, 2, 4, 6 và 8% theo khối lượng nhằm khảo sát ảnh hưởng của hàm lượng hạt gia cường đến độ cứng và độ dai va đập của vật liệu.

2.2. Thiết bị chế tạo và phương pháp thực nghiệm

Vật liệu composite được chế tạo bằng phương pháp đúc khuấy sử dụng hệ thống lò nấu điện trở gia nhiệt bằng dây Molybdenum, có khả năng đạt tới nhiệt độ làm việc tối đa là 1100°C. Hợp kim nhôm Al6061 được đặt trong nồi nấu bằng vật liệu graphite. Hệ thống khuấy được trang bị thanh khuấy làm bằng thép không gỉ 316 chịu nhiệt có dạng 4 cánh với đường kính 30mm và được điều khiển bởi thiết bị khuấy điện cho phép điều chỉnh tốc độ linh hoạt từ 100 đến 2000 vòng/phút. Toàn bộ quy trình nung chảy và khuấy trộn được thực hiện trong môi trường khí Ar tinh khiết để ngăn chặn sự oxy hóa và giảm thiểu bọt khí trong mẫu đúc. Sơ đồ bố trí thiết bị thí nghiệm được thể hiện trong Hình 2.



Hình 2. Bố trí hệ thống đúc khuấy và sản phẩm đúc

Quy trình thực nghiệm bắt đầu bằng việc sấy sơ bộ hạt SiC ở nhiệt độ 400°C trong 4 giờ bằng lò nung CF1300 để loại bỏ hoàn toàn độ ẩm. Trong quá trình chế tạo, hợp kim Al6061 được nung chảy hoàn toàn trong nồi graphite ở 750°C. Khi kim loại đạt trạng thái lỏng ổn định, hệ thống khí Ar được cấp vào buồng nấu nhằm tạo môi trường bảo vệ và giảm sự hấp thụ oxy. Bột SiC sau khi gia nhiệt sơ bộ được đưa từ từ vào kim loại lỏng trong khi tiến hành khuấy cơ học để tạo dòng xoáy và tăng khả năng phân tán hạt. Quá trình này được duy trì với tốc độ khuấy 500 vòng/phút trong

thời gian 15 phút. Thông số nhiệt độ nấu đúc được thiết lập nhằm đảm bảo độ nhớt cho quá trình phân tán hạt mà không gây ra các phản ứng pha không mong muốn, trong khi tốc độ và thời gian khuấy được kiểm soát để đạt được sự phân tán và đồng nhất về tổ chức của vật liệu composite [8, 10, 11]. Sau khi quá trình khuấy kết thúc, hỗn hợp composite lỏng được rót vào khuôn graphite đã được nung nóng ở 300°C để tránh ứng suất nhiệt và sự đông đặc quá nhanh.

2.3. Phương pháp đánh giá cơ tính

Các mẫu thử sau khi đúc được gia công cơ khí chính xác theo các tiêu chuẩn quốc tế ASTM để chuẩn bị cho các phép thử nghiệm cơ tính (Hình 3). Độ cứng của vật liệu được đánh giá bằng phương pháp thử độ cứng Rockwell, tuân thủ tiêu chuẩn của ASTM E18 có kích thước 20x20x10 mm. Đối với mỗi mẫu hàm lượng SiC, có 5 vị trí khác nhau trên bề mặt được đo để lấy giá trị trung bình, nhằm loại bỏ ảnh hưởng của sự không đồng nhất cục bộ.



Hình 3. Mẫu đo cùng thiết bị đo độ cứng, độ dai va đập

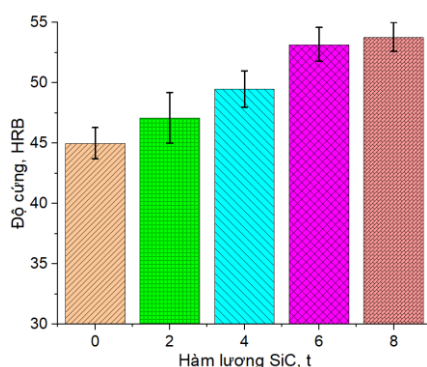
Độ dai va đập của vật liệu được xác định thông qua thử nghiệm va đập Charpy trên các mẫu có rãnh khía chữ V theo tiêu chuẩn ASTM E23 để đo năng lượng hấp thụ trong quá trình gãy vỡ. Các mẫu đo được gia công CNC với kích thước 55x10x10 mm, rãnh khía chữ V sâu 2mm và góc mở 45°. Giá trị độ dai va đập của mỗi hàm lượng SiC là giá trị trung bình của ba mẫu đo. Cuối cùng, cấu trúc bề mặt nứt gãy của các mẫu sau khi thử nghiệm được quan sát bằng kính hiển vi SEM để tìm hiểu cơ chế phá hủy.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Ảnh hưởng của hàm lượng SiC đến độ cứng vật liệu composite

Độ cứng là một trong những chỉ tiêu quan trọng phản ánh khả năng chống biến dạng dẻo cục bộ và khả

năng chịu mài mòn của vật liệu composite nền nhôm. Việc bổ sung hạt SiC vào nền Al6061 thường làm tăng đáng kể độ cứng do sự hiện diện của pha gồm có độ cứng cao, đóng vai trò cản trở chuyển động lệch và hạn chế biến dạng dẻo của nền kim loại. Kết quả khảo sát sự biến thiên độ cứng của vật liệu composite Al6061/SiC theo hàm lượng pha gia cường được thể hiện trong Hình 4. Đối với mẫu hợp kim nền Al6061 ban đầu, độ cứng được xác định đạt 45HRB. Khi bắt đầu bổ sung các hạt SiC với hàm lượng 2% và 4% khối lượng, độ cứng của vật liệu tăng dần và lần lượt đạt các giá trị 47,1HRB và 49,5HRB. Xu hướng tăng cường này tiếp tục đạt tới giá trị là 53,2HRB tại hàm lượng 6% SiC. Tuy nhiên, khi hàm lượng pha gia cường tăng lên mức 8%, giá trị độ cứng đạt giá trị cao nhất là 53,8HRB nhưng có dấu hiệu bão hòa. Sự gia tăng độ cứng này hoàn toàn phù hợp với các công bố trước đó, khi việc bổ sung các hạt gốm cứng vào nền kim loại dẻo giúp cải thiện đáng kể khả năng kháng lại biến dạng dẻo của vật liệu.



Hình 4. Thay đổi độ cứng của Al6061/SiC theo hàm lượng SiC

Nguyên nhân chính dẫn đến việc cải thiện độ cứng là do sự hiện diện của các hạt SiC có độ cứng rất cao so với nền nhôm, có thể đạt đến 9 - 9,5 Mohs gần xấp xỉ kim cương. Do đó, chúng đóng vai trò là các rào cản ngăn chặn biến dạng dẻo khi vật liệu chịu tải trọng uốn của bi thép. Trong quá trình đúc khuấy, với tốc độ khuấy và thời gian khuấy hợp lý thì các hạt gia cường sẽ được phân bố đồng đều, chúng sẽ tạo ra một mạng lưới liên kết chặt chẽ với nền nhôm, giúp chia sẻ một phần tải trọng đáng kể được truyền từ pha nền. Nghiên cứu của Maurya và cộng sự cũng chỉ ra rằng độ cứng có thể cải thiện tới 12,5% khi được gia cường bằng các hạt gốm cứng nhờ vào sự liên kết bề mặt tốt giữa pha nền và pha gia cường [10]. Trong nghiên cứu hiện tại, kết quả cho thấy độ cứng đã cải thiện được tới gần 20% so với hợp kim ban đầu.

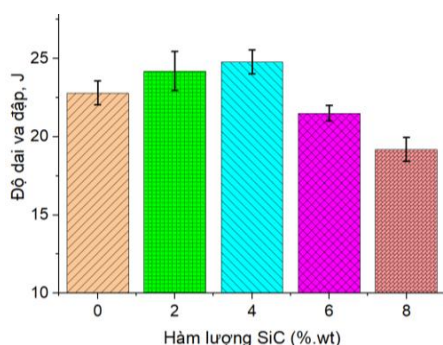
Tuy nhiên, một lưu ý trong kết quả thử nghiệm cho

thấy tại hàm lượng 8% SiC, độ cứng tăng không đáng kể so với mẫu 6% SiC. Hiện tượng này có thể được giải thích do hàm lượng hạt gia cường cao hơn, khoảng cách giữa các hạt giảm, dễ xuất hiện hiện tượng tập trung cục bộ của các hạt SiC và tăng độ xốp vi mô, tạo ra các vùng tập trung ứng suất trong cấu trúc vật liệu composite. Sự tích tụ của các lỗ xốp và các cụm hạt không chỉ làm giảm hiệu quả gia cường mà còn làm giảm tính đồng nhất của composite, dẫn đến sự chững lại của độ cứng như đã được quan sát trong thử nghiệm. Do đó, việc duy trì hàm lượng SiC ở mức tối ưu là yếu tố quyết định để đạt được độ cứng cao nhất mà không làm ảnh hưởng đến sự ổn định cấu trúc của composite.

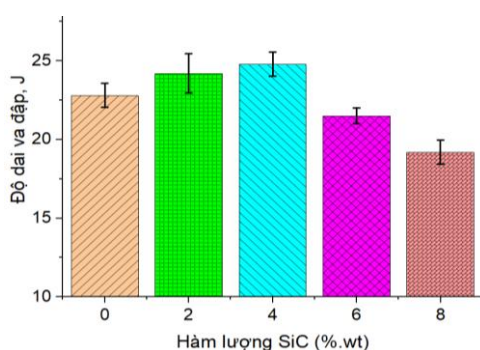
3.2. Ảnh hưởng của hàm lượng SiC đến độ dai va đập

Kết quả thí nghiệm va đập Charpy cho thấy năng lượng hấp thụ của vật liệu composite Al6061/SiC biến thiên không tuyến tính theo hàm lượng SiC, phản ánh sự tương tác phức tạp giữa pha nền dẻo và pha gia cường cứng (Hình 5). Cụ thể, năng lượng hấp thụ va đập của mẫu hợp kim nền (0% SiC) đạt giá trị 22,8J. Khi bắt đầu bổ sung hạt SiC, độ dai va đập ghi nhận sự gia tăng đáng kể, đạt 24,2J ở mẫu 2% SiC và tiếp tục tăng nhẹ đến giá trị cực đại 24,8J tại hàm lượng 4% SiC. Tuy nhiên, khi hàm lượng pha gia cường tiếp tục tăng lên mức 6% và 8%, giá trị này bắt đầu sụt giảm lần lượt còn 21,5J và 19,2J. Xu hướng này cho thấy trong dải hàm lượng từ 0% đến 4%, các hạt SiC không chỉ đóng vai trò tăng cứng mà còn giúp làm mịn cấu trúc hạt của nền nhôm, tạo ra cơ chế cản trở sự phát triển của vết nứt hiệu quả. Việc hạt SiC phân bố đồng đều đóng vai trò giúp phân tán ứng suất va đập và trở thành các điểm cản và làm lệch hướng vết nứt, nhờ đó cần nhiều năng lượng hơn để vết nứt phát triển đến phá hủy hoàn toàn. Khi hàm lượng SiC tăng lên 6-8%, độ dai va đập giảm rõ rệt, đặc biệt ở mức 8% (19,2J), thấp hơn cả mẫu nền. Điều này phản ánh sự chuyển dịch cơ chế phá hủy từ dẻo sang phá hủy giòn do các yếu tố tổ chức tế vi bất lợi tăng mạnh ở hàm lượng gia cường cao. Với đúc khuấy, khi tăng tỷ lệ hạt gia cường, xác suất xảy ra phân bố không đồng đều tăng lên, hình thành các vùng giàu hạt SiC cục bộ. Các vùng này thường là vùng tập trung ứng suất, tạo điều kiện khởi phát nứt sớm dưới tải va đập. Thêm nữa, hàm lượng hạt SiC cao làm tăng nguy cơ rỗ xốp trong quá trình khuấy, do khả năng thấm ướt không hoàn toàn giữa nền nhôm và pha SiC. Rỗ xốp là khuyết tật đặc biệt nhạy với tải trọng động vì nó làm giảm tiết diện chịu lực hiệu dụng và thúc đẩy nứt phát triển nhanh. Một vấn đề nữa là khi tăng hàm lượng SiC, diện tích bề mặt liên kết pha nền và pha gia cường

tăng mạnh, nếu liên kết bề mặt không đủ bền, cơ chế tách hạt xảy ra sẽ làm mất hiệu quả hấp thụ tải trọng và tạo một dạng lỗ rỗng thứ cấp hình thành vết nứt mới.



Hình 5. Thay đổi độ dai và đập của Al6061/SiC theo hàm lượng SiC

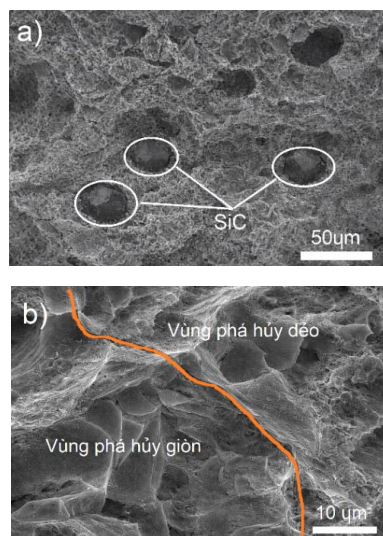


Hình 6. Thay đổi độ dai và đập của Al6061/SiC theo hàm lượng SiC

So sánh với kết quả độ cứng được thể hiện trong mục 3.1, có thể thấy sự tương tác giữa độ cứng và khả năng chịu va đập. Khi tăng hàm lượng SiC, độ cứng tăng nhờ cơ chế cản trở biến dạng dẻo, nhưng đến một ngưỡng nhất định, vật liệu bắt đầu có hiện tượng giòn hơn khiến khả năng hấp thụ năng lượng giảm. Như vậy, độ cứng tăng cho thấy khả năng chống biến dạng cục bộ tốt hơn, nhưng đồng thời vật liệu trở nên kém dẻo hơn trong điều kiện tải trọng động. Cơ chế này cũng phù hợp với nhận định tổng quát trong các nghiên cứu về Al6061/SiC là tăng SiC thường làm tăng độ cứng và các tính chất chịu mài mòn, song có xu hướng làm giảm độ dai khi hàm lượng gia cường cao. Tuy nhiên, kết quả trong nghiên cứu hiện tại còn có chút sự khác biệt khi vẫn ghi nhận độ dai và đập được cải thiện khi bổ sung một hàm lượng nhỏ SiC chứ không hoàn toàn giảm tuyến tính.

Phân tích ảnh SEM bề mặt nứt gãy trên Hình 7.a của mẫu 2% SiC cho thấy đặc tính phá hủy dẻo chiếm ưu thế với mật độ dày các lỗ nhỏ mịn ở bề mặt, đây là đặc trưng của bề mặt phá hủy do dẻo. Điều này cho thấy nền

Al6061 của mẫu 2% SiC vẫn duy trì được khả năng biến dạng dẻo lớn, cho phép hấp thụ năng lượng va đập hiệu quả. Các hạt SiC ở hàm lượng này phân bố tương đối đều và khả năng liên kết với nền tốt do vậy đóng vai trò là tác nhân cản trở và làm lệch hướng sự phát triển của vết nứt phá hủy. Ngược lại, bề mặt nứt gãy của mẫu 8% SiC cho thấy một sự thay đổi cơ chế phá hủy khi các lỗ nhỏ mịn bị thay thế và sự xuất hiện các mặt trượt phẳng lớn đặc trưng của phá hủy giòn, điều này dẫn đến năng lượng hấp thụ va đập giảm.



Hình 7. Ảnh SEM bề mặt phá hủy của mẫu (a) 2%SiC và (b) 8% SiC

4. Kết luận

Nghiên cứu đã chế tạo thành công vật liệu composite Al6061/SiC bằng phương pháp đúc khuấy và đánh giá ảnh hưởng của hàm lượng SiC đến một số cơ tính của vật liệu này. Kết quả thực nghiệm cho thấy độ cứng của vật liệu tăng tỷ lệ thuận với hàm lượng SiC, đạt giá trị lớn nhất 53,8HRB tại mẫu 8% SiC. Độ cứng có dấu hiệu bão hòa khi hàm lượng SiC tăng từ 6-8%. Đối với đặc tính va đập, năng lượng hấp thụ đạt lớn nhất 24,8J tại mẫu 4% SiC nhờ duy trì được khả năng biến dạng dẻo của nền Al6061 và khả năng liên kết tốt giữa pha nền và hạt gia cường. Sau đó, kết quả giảm dần khi tăng hàm lượng SiC, nguyên nhân do phá hủy giòn đã được tìm thấy khi phân tích ảnh SEM bề mặt phá hủy. Kết quả nghiên cứu cho thấy việc bổ sung SiC trong nền hợp kim nhôm tồn tại một phạm vi có thể cân bằng giữa hai đặc tính độ cứng và độ dai va đập thường có xu hướng trái chiều nhau.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT25-26.44.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] E.G. Hertwich, S. Ali, L. Ciacci, T. Fishman, N. Heeren, E. Masanet, F.N. Asghari, E. Olivetti, S. Pauliuk, Q. Tu, P. (2019). *Wolfram, Material efficiency strategies to reducing greenhouse gas emissions associated with buildings, vehicles, and electronics - A review*, Environmental Research Letters, Vol.14.
Doi: 10.1088/1748-9326/ab0fe3.
- [2] S. Siengchin (2023), *A review on lightweight materials for defence applications: Present and future developments*, Defence Technology, Vol.24 pp.1-17.
Doi: 10.1016/j.dt.2023.02.025.
- [3] S.S. Li, X. Yue, Q.Y. Li, H.L. Peng, B.X. Dong, T.S. Liu, H.Y. Yang, J. Fan, S.L. Shu, F. Qiu, Q.C. Jiang (2023), *Development and applications of aluminum alloys for aerospace industry*, Journal of Materials Research and Technology, Vol.27, pp. 944-983.
Doi: 10.1016/j.jmrt.2023.09.274.
- [4] P.B. Pawar, R.M. Wabale, A.A. Utpat (2018), *A Comprehensive Study of Aluminum Based Metal Matrix Composites: Challenges and Opportunities*, in: Mater. Today Proc.
Doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.186.
- [5] M.K. Surappa (2003), *Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities*, Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences, Vol.28.
Doi: 10.1007/BF02717141.
- [6] H.K. Garg, S. Sharma, R. Kumar, A. Manna, S.P. Dwivedi, M. Abbas, A. Kumar, M.I. Khan, Y.S. (2024). *Bisht, Mechanical, tribological, and morphological properties of SiC and Gr reinforced Al-0.7Fe-0.6Si-0.375Cr-0.25Zn based stir-casted hybrid metal matrix composites for automotive applications: Fabrication and characterizations*, Journal of Materials Research and Technology, Vol.28, pp.3267-3285.
Doi: 10.1016/j.jmrt.2023.12.171.
- [7] A. Lakshmikanthan, S. Angadi, V. Malik, K.K. Saxena, C. Prakash, S. Dixit, K.A. (2022). *Mohammed, Mechanical and Tribological Properties of Aluminum-Based Metal-Matrix Composites*, Materials, Vol.15.
Doi: 10.3390/ma15176111.
- [8] A. Kumar, V.P. Singh, R.C. Singh, R. Chaudhary, D. Kumar, A.H.I. Mourad (2024), *A review of aluminum metal matrix composites: fabrication route, reinforcements, microstructural, mechanical, and corrosion properties*, J. Mater. Sci. Vol.59, pp.2644-2711.
Doi: 10.1007/s10853-024-09398-7.
- [9] P. Sarmah, K. Gupta (2024), *Recent Advancements in Fabrication of Metal Matrix Composites: A Systematic Review*, Materials, Vol.17.
Doi: 10.3390/ma17184635.
- [10] N.K. Maurya, M. Maurya, A.K. Srivastava, S.P. Dwivedi, A. Kumar, S. Chauhan (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.
- [11] A. Bhat, G. Kakandikar (2019), *Manufacture of silicon carbide reinforced aluminium 6061 metal matrix composites for enhanced sliding wear properties*, Manuf. Rev. (Les Ulis). Vol.6.
Doi: 10.1051/mfreview/2019021.
- [12] P. Beldar, H.R. Kumavat (2024), *Comparative analysis of mechanical properties of SiC particle addition on Al6061/Ni and Al6061/Cr metal matrix composites*, Mater. Lett. Vol.369, p.136745.
Doi: 10.1016/j.matlet.2024.136745.
- [13] J. Zhu, W. Jiang, G. Li, F. Guan, Y. Yu, Z. Fan (2020), *Microstructure and mechanical properties of SiCnp/Al6082 aluminum matrix composites prepared by squeeze casting combined with stir casting*, J. Mater. Process. Technol. Vol.283 p. 116699.
Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2020.116699.
- [14] X. Xi, B. Chen, C. Tan, X. Song, J. Feng (2020), *Microstructure and mechanical properties of SiC reinforced AlSi10Mg composites fabricated by laser metal deposition*, J. Manuf. Process. Vol.58, pp.763-774.
Doi: 10.1016/j.jmapro.2020.08.073.

Ngày nhận bài:	26/02/2026
Ngày nhận bản sửa:	08/03/2026
Ngày duyệt đăng:	25/03/2026