

TỔ CHỨC, ĐỘ CỨNG VÀ ĐỘ DAI VÀ ĐẬP CỦA VẬT LIỆU COMPOSITE AZ91/SiC ỨNG DỤNG TRONG CHI TIẾT KẾT CẤU Ô TÔ

MICROSTRUCTURES, HARDNESS AND IMPACT TOUGHNESS OF COMPOSITE AZ91/SiC IN AUTOMOTIVE STRUCTURAL APPLICATIONS

VŨ VIỆT QUYỀN

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

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

Tóm tắt

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu chế tạo vật liệu tổng hợp composite nền hợp kim Mg AZ91 được gia cường bằng SiC thông qua phương pháp đúc trong môi trường khí Ar bảo vệ. Đặc điểm tổ chức tế vi cũng như sự phân bố hạt SiC trong nền AZ91 được phân tích bằng kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường (FESEM) và phân tích tán xạ năng lượng tia X (EDX). Kết quả cho thấy sự phân bố của các hạt SiC trong pha nền và không có phản ứng nào xảy ra giữa SiC và hợp kim Mg nóng chảy trong quá trình tổng hợp. Độ cứng và độ dai va đập của vật liệu composite AZ91/SiC được đánh giá và so sánh với hợp kim AZ91 không gia cường, hợp kim nhôm và thép. Kết quả cho thấy vật liệu composite với 15% khối lượng SiC có giá trị độ cứng là 76 HRB, tương đương thép thường sử dụng trong chi tiết kết cấu ô tô. Độ dai va đập tăng 130% so với hợp kim AZ91 ban đầu. Trong khi khối lượng riêng nhẹ hơn nhiều so với thép cho thấy loại vật liệu này có tiềm năng thay thế thép trong các ứng dụng kết cấu ô tô.

Từ khóa: Hợp kim Mg, composite, hạt gia cường, hạt SiC, giảm khối lượng, cơ chế gia cường.

Abstract

This paper presents the results of research and fabrication of AZ91/SiC composite through casting method in a protective Ar atmosphere. The microscopic characteristics as well as the distribution of SiC particles in the AZ91 matrix were analyzed by field emission scanning electron microscopy (FESEM) and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The results show the distribution of SiC particles in the matrix phase and no reaction occurs between SiC and the molten Mg alloy during the synthesis. The hardness and impact toughness of AZ91/SiC composites were evaluated and compared with unreinforced AZ91 alloy, aluminum alloy and

steel. The results show that the AZ91/SiC composites with 15% by weight of SiC has a hardness value of 76 HRB, equivalent to steel commonly used in automotive structural applications and 130% increased impact toughness compared to the AZ91 alloy. While the density is much lighter than steel, this material has the potential to replace steel in automotive structural applications.

Keywords: Mg alloy, composite, reinforcement grain, SiC grain, weight reduction, reinforcement mechanism.

1. Mở đầu

Magie (Mg) và hợp kim Mg hiện đang được ứng dụng rộng rãi trong các chi tiết kết cấu nhờ có khối lượng nhẹ độ bền cao [1]. Trong những năm gần đây, hợp kim Mg đang được nghiên cứu sử dụng ngày càng nhiều trong lĩnh vực ô tô do yêu cầu về giảm khối lượng thân xe để tiết kiệm năng lượng [2]. Mặc dù có khối lượng nhẹ và khả năng đúc các bộ phận có hình dạng phức tạp, hợp kim Mg có một số nhược điểm như mô đun đàn hồi thấp, độ bền không cao, khả năng chống mài mòn và rão thấp khiến việc thay thế thép và nhôm cho kết cấu chịu tải trọng cao bị hạn chế [3]. Các nghiên cứu tăng bền cho hợp kim Mg bằng vật liệu gia cường đã tạo ra một dòng vật liệu mới hay còn gọi là vật liệu composite có khả năng khắc phục những nhược điểm này. Vật liệu gia cường được sử dụng có thể ở dạng sợi liên tục, sợi ngắn hoặc hạt. Trong đó, Silic cacbua (SiC) ở dạng hạt là chất gia cường được lựa chọn phổ biến nhất thông qua phương pháp đúc vì chi phí thấp, khả năng tương thích với nền hợp kim Mg [4-6].

Hiện có nhiều kỹ thuật luyện kim có thể được sử dụng để chế tạo vật liệu composite như luyện kim bột, thấm, ủ hoặc đúc. Phương pháp luyện kim bột tồn tại một số nhược điểm như nguy cơ cháy nổ với hỗn hợp bột của hợp kim Mg, quy trình sản xuất tương đối phức tạp và khó sản xuất các sản phẩm có hình dạng phức tạp khiến giá thành sản phẩm tăng. Với kỹ thuật

đúc, các hạt gia cường được bổ sung vào hợp kim Mg nóng chảy trước khi đúc chi tiết kết cấu. Quá trình đúc được thực hiện trong môi trường khí trơ bảo vệ nhằm ngăn khả năng bắt cháy của hợp kim Mg. Kỹ thuật này đơn giản, tiết kiệm và dễ dàng áp dụng trong các xưởng đúc nên được sử dụng phổ biến. Nhược điểm phương pháp là thực hiện ở nhiệt độ cao dẫn đến xu hướng phản ứng hóa học giữa nền kim loại và các hạt gia cường chưa được khắc phục triệt để [7].

Trong nghiên cứu này, vật liệu composite trên nền hợp kim Mg AZ91 được gia cường bằng các hạt SiC được chế tạo bằng phương pháp đúc trong môi trường khí Ar. Các đặc tính tổ chức tế vi, sự phân bố của hạt gia cường trong pha nền và phản ứng bề mặt giữa hạt gia cường SiC và pha nền AZ91 được nghiên cứu bằng cách sử dụng phân tích hiển vi điện tử quét phát xạ trường FESEM và EDX. Các tính chất cơ học của vật liệu composite tổng hợp cũng được đánh giá và kết quả được so sánh với thép để đánh giá tiềm năng sử dụng loại vật liệu này trong sản xuất chi tiết kết cấu ô tô.

2. Thí nghiệm

2.1. Nguyên liệu

Hợp kim thương mại AZ91 do Hunan High Broad New Material Co., Ltd, Trung Quốc sản xuất được sử dụng trong nghiên cứu có thành phần hóa học được liệt kê trong Bảng 1. Bột silic cacbua (SiC) do Xilong Scientific - Trung Quốc sản xuất, có kích thước hạt trung bình là 74 μ m, được chọn làm hạt gia cường. Phân tích thành phần hóa học của các hạt SiC được thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 1. Thành phần hóa học hợp kim AZ91

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Mg
8,9	0,75	0,11	0,01	0,01	0,02	Còn lại

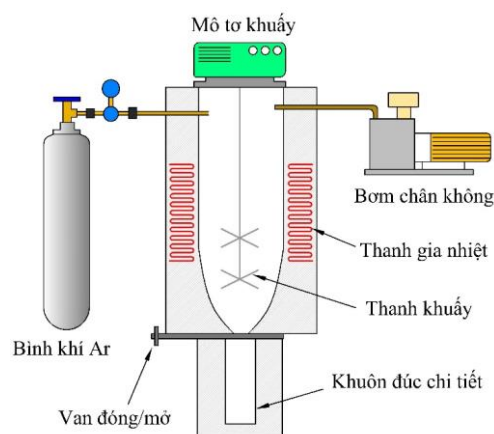
Bảng 2. Thành phần hóa học của SiC

SiC	Si	C	SiO ₂	Fe	Al ₂ O ₃	MgO
99,5	0,04	0,15	0,1	0,005	0,01	0,05

2.2. Thiết bị và thực nghiệm

Sơ đồ thiết bị thí nghiệm được thể hiện trong Hình 1. Quá trình chế tạo vật liệu composite AZ91/SiC được thực hiện theo các bước sau: Bước thứ nhất hợp kim AZ91 được đưa vào trong lò khuấy bằng thép không gỉ có phủ một lớp bo nitrua (BN), bơm chân không khởi động loại bỏ không khí còn lại trong lò; Bước thứ hai, khí Ar được bơm vào lò để tạo môi trường bảo vệ khi nấu chảy hợp kim AZ91, tiếp đó nhiệt độ lò được

nâng lên 750°C; Bước thứ ba, bột SiC được trộn đều vào hợp kim AZ91 nóng chảy theo tỷ lệ 5% và 15% khối lượng bằng mô tơ khuấy với tốc độ 900 vòng/phút. Để đảm bảo các hạt SiC được trộn đều hoàn toàn, hỗn hợp nóng chảy được khuấy liên tục trong 1 phút. Sau đó van đáy lò được mở để kim loại nóng chảy được đổ vào khuôn đúc chi tiết. Hạt SiC có khả năng không thấm ướt cao, do vậy dễ có xu hướng nổi lên trên bề mặt của hợp kim Mg nóng chảy. Để khắc phục vấn đề này, các hạt SiC được xử lý bằng cách oxi hóa trước khi đưa vào khuấy trộn trong hợp kim Mg. Quá trình oxy hóa các hạt SiC được thực hiện bằng lò nung CF1400 ở 1100°C trong 2 giờ. Ngoài ra, quá trình oxy hóa này cũng nhằm mục đích loại bỏ các khí bị hấp phụ khỏi bề mặt các hạt SiC và làm cho toàn bộ bề mặt hạt hoạt động đồng đều.



Hình 1. Sơ đồ thiết bị thí nghiệm chế tạo vật liệu composite AZ91/SiC

Tổ chức tế vi của hợp kim AZ91 và vật liệu composite AZ91/SiC được nghiên cứu bằng kính hiển vi điện tử quét phát xạ trường FESEM (JEOL JSM-7600F) và quang phổ tán xạ tia X EDS được tích hợp trên kính hiển vi điện tử. Các mẫu phân tích được mài nhẵn, đánh bóng và tẩm thực bằng hỗn hợp dung dịch gồm 1ml HNO₃ đặc, 75ml (CH₂OH)₂ và 24ml nước. Độ cứng của composite AZ91/SiC được kiểm tra bằng phương pháp đo độ cứng Rockwell trên thiết bị HardRocker 150-A tại Trung tâm Thực hành - Thí nghiệm, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam, sử dụng thang đo HRB, áp dụng cho ba mẫu thử riêng biệt. Kết quả độ cứng là giá trị trung bình của các mẫu đo.

Thử nghiệm độ dai va đập của hợp kim AZ91, composite AZ91/SiC, hợp kim nhôm AA6061-T6 và thép SAPH440 được thực hiện trên các mẫu có kích thước 10x10x55 (mm), chiều sâu rãnh 2mm theo Tiêu chuẩn Việt Nam TCVN 312:1969 bằng máy đo độ dai va đập JBS-300 Jinan Precision Testing Equipment

Co., Ltd tại Trung tâm Thực hành - Thí nghiệm, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam.

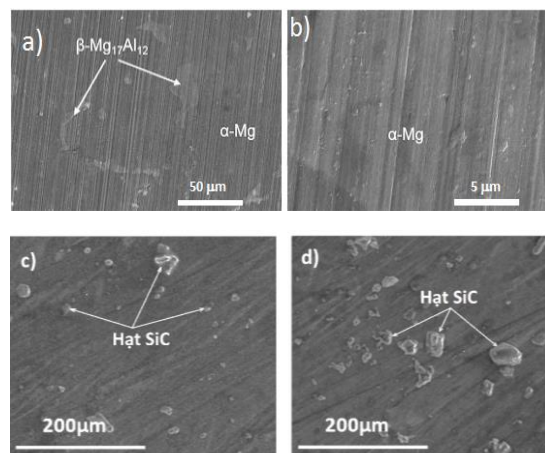
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Tổ chức tế vi

Nghiên cứu tổ chức tế vi đóng vai trò quan trọng để đánh giá chất lượng của kỹ thuật xử lý hợp kim lỏng trong chế tạo composite bằng phương pháp đúc. Phân tích FESEM mẫu hợp kim AZ91 và composite AZ91/SiC được thể hiện trong Hình 2. Kết quả cho thấy, tổ chức chính trong hợp kim AZ91 chủ yếu là các pha α -Mg và các pha liên kim β - $Mg_{17}Al_{12}$ có màu sáng, kích thước lớn (Hình 2a, b). Nghiên cứu từ giản đồ pha của hệ Mg-Al cho thấy độ hòa tan tối đa của Al trong Mg là 12,7 % ở 437 C° và giảm xuống còn khoảng 2% ở nhiệt độ phòng. Khi này, Al được hòa tan một phần trong dung dịch rắn magie và một phần tạo pha liên kim $Mg_{17}Al_{12}$, thường được hình thành ở biên giới hạt, dạng lưới. Tuy nhiên, khi Zn được thêm vào hệ Mg-Al, pha liên kim $Mg_{17}Al_{12}$ có hình thái lớn, tách rời hoàn toàn và được bao quanh bởi dung dịch rắn Mg. Hình 2c, d thể hiện tổ chức hợp kim AZ91 được gia cường bằng hạt SiC ở các tỷ lệ SiC khác nhau lần lượt là 5% và 15% khối lượng. Kết quả cho thấy sự phân bố khá đồng đều của hạt SiC trong nền kim loại AZ91 và không quan sát thấy tạp chất hay oxit hình thành.

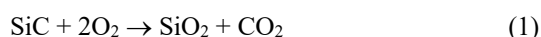
Sự phân bố của các hạt SiC đồng đều được xác định là do khả năng thấm ướt của SiC tăng sau quá trình xử lý oxi hóa trước khi đưa vào hợp kim Mg nóng chảy. Sự phân bố của các hạt gia cường này còn bị ảnh hưởng bởi một số yếu tố khác như vận tốc khuấy, chênh lệch khối lượng riêng giữa các hạt và kim loại nóng chảy, cuối cùng là tốc độ làm nguội. Tốc độ khuấy đủ lớn sẽ giúp trộn đều các hạt gia cường vào hợp kim Mg nóng chảy và ngăn cho các hạt lắng xuống do sự khác biệt về khối lượng riêng. Quá trình làm nguội cũng là một giai đoạn phức tạp, ảnh hưởng đến sự phân bố của hạt gia cường. Khi thời gian làm nguội quá lâu, các hạt SiC sẽ bị lắng xuống phía dưới của khuôn đúc và tỷ lệ khối lượng hạt lắng sẽ là một hàm phụ thuộc vào thời gian. Theo nghiên cứu của Geiger và cộng sự, tốc độ lắng cũng sẽ là một hàm của khối lượng riêng và hình dạng và kích thước hạt đóng một vai trò quan trọng trong quá trình lắng [8]. Ở các hạt có kích thước nhỏ hơn, tốc độ lắng sẽ chậm hơn. Vì vậy, vật liệu composite chứa các hạt gia cường có kích thước hạt lớn sẽ phải được khuấy liên tục cho đến khi đúc. Trong điều kiện chế tạo thực tế,

hạt SiC được sử dụng có nhiều hình dạng và kích thước khác nhau do đó tốc độ lắng sẽ khác nhau. Sự phân bố gần như đồng đều của các hạt SiC được quan sát thấy trong vật liệu composite AZ91/SiC cho thấy phương pháp xử lý vật liệu SiC và các thông số công nghệ được sử dụng trong nghiên cứu này là hiệu quả.

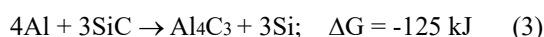
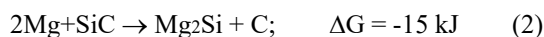


Hình 2. Tổ chức tế vi (a), (b) hợp kim AZ91, (c) composite AZ91/SiC với 5% SiC và (d) composite AZ91/SiC với 15% SiC

Trong vật liệu composite, vùng biên giới giữa hạt gia cường và pha nền đóng vai trò quan trọng đến tính chất của vật liệu tổng hợp, tải trọng từ pha nền truyền sang các hạt gia cường sẽ thông qua vùng biên giới này. Hơn nữa đây cũng là một lớp rào cản làm cản trở phản ứng khuếch tán tại vùng bề mặt giữa nền AZ91 và SiC. Trong nghiên cứu này, các hạt SiC đã được oxi hóa bằng lò điện trở ở 1100°C trong 2 giờ trước khi đưa vào khuấy trộn trong hợp kim Mg nóng chảy. Quá trình oxi hóa diễn ra theo phương trình phản ứng sau:



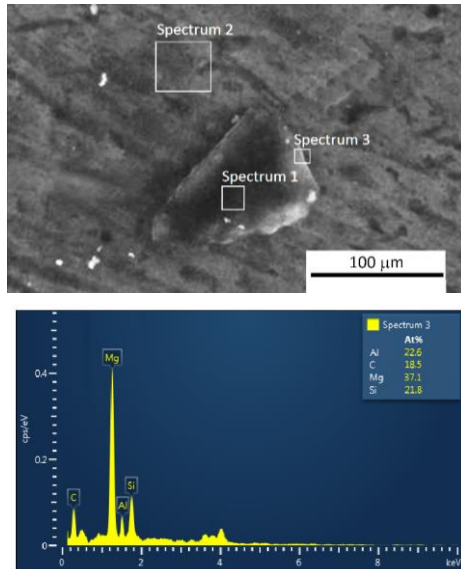
Như vậy, sau quá trình oxi hóa bề mặt SiC sẽ được phủ một lớp oxit SiO_2 . Lớp oxit này đóng vai trò một lớp màng mỏng hiệu quả trong việc ngăn các hạt SiC phản ứng với nền AZ91 để tạo thành Mg_2Si hoặc Al_4C_3 theo phản ứng sau:



Ảnh SEM và phân tích EDS hạt SiC, nền AZ91 và vùng biên giới hạt được thể hiện trong Hình 3.

Kết quả cho thấy tính toàn vẹn của bề mặt giữa hạt SiC và pha nền, khả năng liên kết và ổn định tốt cũng như không quan sát thấy sản phẩm do phản ứng tại bề mặt hình thành. Đây là kết quả của việc lựa chọn

thông số công nghệ tốt với nhiệt độ thấp (750°C), thời gian khuấy ngắn và tốc độ khuấy cao ở trạng thái lỏng giúp hạn chế khả năng hình thành phản ứng giữa SiC và AZ91. Nhiệt độ cao hơn sẽ làm tăng tốc các phản ứng hóa học tại bề mặt theo định luật Arrhenius, thời gian khuấy kéo dài có thể tạo thuận lợi cho phản ứng lan rộng giữa SiC bị oxy hóa và AZ91.



Hình 3. Ảnh SEM và phân tích EDS hạt SiC và nền AZ91

Do đó, để tổng hợp được vật liệu composite với tổ chức tế vi và tính chất mong muốn, phản ứng tại bề mặt giữa pha nền và hạt gia cường phải được hạn chế bằng việc lựa chọn hợp kim nền, xử lý bề mặt hạt gia cường và lựa chọn các thông số quy trình phù hợp.

3.2. Đặc điểm cơ tính

Kết quả đo độ cứng trong Bảng 3 cho thấy tăng tỷ lệ hạt SiC sẽ làm gia tăng giá trị độ cứng của vật liệu composite AZ91/SiC. Độ cứng của composite tăng từ 50 HRB lên 76 HRB khi tăng tỷ khối lượng SiC từ 0% lên 15%. Điều này cho thấy sự có mặt của các hạt SiC

được bao quanh bởi pha nền AZ91 có độ cứng thấp hơn đã góp phần chống mài mòn và gia tăng khả năng chống biến dạng dẻo của vật liệu. Nguyên nhân giúp vật liệu composite tăng độ cứng theo Xiao và các cộng sự là do ảnh hưởng của SiC làm nhỏ hạt AZ91 khi tổng hợp và phần thể tích của các hạt SiC trong hỗn hợp càng lớn thì kích thước hạt sẽ càng nhỏ [9].

Ngoài ra, các hiệu ứng gia cường xảy ra trong vật liệu composite có thể được chia thành hai loại, gia cường trực tiếp và gia cường gián tiếp. Cơ chế gia cường trực tiếp bao gồm khả năng truyền ứng suất từ pha nền sang các hạt gia cường có độ cứng và độ bền cao hơn. Cơ chế này đạt được khi có được sự liên kết tốt giữa nền và hạt, khi đó ứng suất tác dụng có thể được chuyển từ pha nền có độ cứng thấp sang các hạt có độ cứng cao hơn. Nếu liên kết bề mặt yếu, thì vùng biên giới nền - hạt sẽ bị phá vỡ và ứng suất không truyền được sang hạt gia cường, vì vậy cơ chế gia cường sẽ không hiệu quả. Các cơ chế gia cường gián tiếp gồm làm nhỏ hạt của kim loại nền và tạo ra sai lệch mạng cao trong composite do sự khác biệt về hệ số giãn nở nhiệt của hợp kim nền AZ91 là $26 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ và hạt gia cường SiC là $4,7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Hơn nữa, sự khác nhau về khả năng biến dạng giữa pha nền và hạt gia cường cũng thường tạo ra sai lệch mạng tại khu vực tiếp giáp giữa nền và hạt, do đó làm gia cường vật liệu composite. Một số mô hình về cơ chế gia cường trong hợp kim hai pha đã được nghiên cứu bởi tác giả Gang Chen và các cộng sự [10]. Kết quả nghiên cứu thể hiện hầu hết các mô hình đều dự đoán độ bền và độ cứng của vật liệu composite tăng lên và hệ số giãn nở nhiệt giảm khi tăng tỷ lệ chất gia cường.

Kết quả thử nghiệm độ dai va đập trong Bảng 3 của composite AZ91/SiC trong cũng tăng từ 17,5J/cm² lên 40J/cm², tương ứng với tỷ lệ tăng khối lượng hạt gia cường. Nghiên cứu của Song-Jeng Huang và các cộng sự đưa ra kết luận vật liệu composite giảm độ dai va đập là do hình thành các pha giòn như Mg₂Si hay các

Bảng 3. So sánh cơ tính của composite AZ91/SiC với hợp kim nhôm và thép

Hợp kim	Khối lượng riêng (g/cm ³)	Độ cứng (HRB)				Độ dai va đập (J/cm ²)			
		Lần 1	Lần 2	Lần 3	TB	Lần 1	Lần 2	Lần 3	TB
AZ91	1,81	52	47	51	50	18,7	16,2	17,5	17,5
AZ91- 5% SiC	1,85	63	67	62	64	23,7	27,5	23,7	25
AZ91- 15% SiC	1,95	80	77	71	76	43,7	41,2	36,2	40
AA6061-T6	2,7	62	63	62	62	78,7	81,2	87,5	82,5
Thép SAPH440	7,9	74	76	69	73	107,5	108,7	106,2	107,5

pha liên kim của Al-Mn tại biên giới nền - hạt, cùng với khả năng liên kết không tốt tại bề mặt hạt gia cường làm hình thành các vết nứt trong vật liệu tổng hợp [11]. Tuy nhiên trong nghiên cứu hiện tại, kết quả quan sát bằng phân tích SEM và EDS cho thấy vật liệu composite có khả năng liên kết bề mặt tốt và không hình thành các pha sản phẩm giòn tại vùng biên giới hạt gia cường. Do vậy, độ dai va đập của các mẫu thử chứa 15% SiC tăng gần 130% so với hợp kim AZ91.

Độ cứng và độ dai va đập của composite AZ91/SiC được so sánh với hợp kim nhôm AA6061-T6 và thép SAPH440 thường được dùng trong chế tạo các chi tiết kết cấu ô tô. Kết quả cho thấy sau khi được gia cường với 15% SiC, vật liệu composite có cơ tính tăng đáng kể, tiềm năng để thay thế nhôm và thép. Đặc biệt, với khối lượng riêng nhẹ hơn nhiều so với thép, giúp giảm đáng kể khối lượng kết cấu thân xe ô tô, qua đó đáp ứng yêu cầu tiết kiệm năng lượng.

4. Kết luận

Nghiên cứu đã chế tạo thành công vật liệu tổng hợp composite AZ91/SiC bằng phương pháp đúc với kỹ thuật đơn giản, chi phí thấp. Sự có mặt của các hạt gia cường SiC trong hợp kim nền AZ91 làm thay đổi cấu trúc tế vi của pha nền. Kết quả phân tích SEM và EDS cho thấy không có pha oxit hay pha tạp nào tại vùng liên kết giữa hạt SiC và nền AZ91. Việc bổ sung các hạt SiC vào nền AZ91 làm tăng giá trị độ cứng, độ dai va đập so với hợp kim không gia cường và giá trị độ cứng, độ bền tương đương với thép. Kết quả này cho thấy tiềm năng sử dụng composite AZ91/SiC nhằm thay thế thép trong chi tiết kết cấu ô tô.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT22-23.39**.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] N. Sezer, Z. Evis, S. M. Kayhan, A. Tahmasebifar, and M. Koç. (2018), *Review of magnesium-based biomaterials and their applications*, Journal of Magnesium and Alloys, Vol.6 No.1, pp.23-43.

[2] J. Tan and S. Ramakrishna (2021), *Applications of magnesium and its alloys: A review*, Applied Sciences, Vol.11 No.15.

[3] T. S. Srivatsan, T. S. Sudarshan, and E. J. Lavernia. (1995), *Processing of discontinuously-reinforced metal matrix composites by rapid solidification*, Progress in Materials Science, Vol.39 No.4-5, pp.317-409.

[4] S. C. V. Lim, M. Gupta, and L. Lu. (2001), *Processing, microstructure, and properties of Mg - SiC composites synthesised using fluxless casting process*, Materials Science and Technology, Vol.17 No.7, pp.823-832.

[5] A. Kumar, S. Kumar, and N. K. Mukhopadhyay. (2018), *Introduction to magnesium alloy processing technology and development of low-cost stir casting process for magnesium alloy and its composites*, Journal of Magnesium and Alloys, Vol.6 No.3, pp.245-254.

[6] A. Kumar, S. Kumar, N. K. Mukhopadhyay, A. Yadav, and J. Winczek. (2020), *Effect of sic reinforcement and its variation on the mechanical characteristics of AZ91 composites*, Materials, Vol.13 No.21, pp.1-16.

[7] A. Mortensen and M. C. Flemings. (1996), *Solidification of binary hypoeutectic alloy matrix composite castings*, Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, Vol.27 No.3, pp.595-609.

[8] A. Doostmohammadi and A. M. Ardekani. (2015), *Suspension of solid particles in a density stratified fluid*, Physics of Fluids, Vol.27 No.2.

[9] P. Xiao et al. (2019), *An investigation on grain refinement mechanism of TiB₂ particulate reinforced AZ91 composites and its effect on mechanical properties*, Journal of Alloys and Compounds, Vol.780, pp.237-244.

[10] G. Chen, J. Wan, N. He, H. Ming Zhang, F. Han, and Y. Min Zhang. (2018), *Strengthening mechanisms based on reinforcement distribution uniformity for particle reinforced aluminum matrix composites*, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol.28 No.12, pp.2395-2400.

[11] S. J. Huang, S. Diwan Midyeen, M. Subramani, and C. C. Chiang. (2021), *Microstructure evaluation, quantitative phase analysis, strengthening mechanism and influence of hybrid reinforcements (β -SiCp, Bi and Sb) on the collective mechanical properties of the AZ91 magnesium matrix*, Metals, Vol.11 No.6.

Ngày nhận bài:	08/12/2022
Ngày nhận bản sửa:	18/12/2022
Ngày duyệt đăng:	23/12/2022