

Nghiên cứu vi cấu trúc và một số tính chất của composite Ti-1vol.%MWCNT chế tạo bằng thiêu kết plasma xung điện

Đoàn Đình Phương*, Nguyễn Bình An, Trần Văn Hậu, Phạm Văn Trình

Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, 18 Hoàng Quốc Việt, phường Nghĩa Đô, Hà Nội, Việt Nam

Ngày nhận bài 7/6/2025; ngày chuyển phản biện 9/6/2025; ngày nhận phản biện 30/6/2025; ngày chấp nhận đăng 5/7/2025

Tóm tắt:

Vật liệu composite nền titan (TMC) gia cường bằng vật liệu ống nano cacbon đa tường (MWCNTs) hàm lượng 1 vol.% được chế tạo sử dụng kỹ thuật thiêu kết plasma xung điện. Ảnh hưởng của MWCNTs đến cấu trúc, tỷ trọng, độ cứng, hệ số ma sát của composite đã được nghiên cứu. Kết quả nghiên cứu cho thấy, độ cứng của vật liệu composite tăng lên đến 350 HV, lớn hơn 36% so với mẫu titan (Ti) nguyên chất (256 HV). Bên cạnh đó, composite Ti-MWCNT thể hiện khả năng chống mài mòn cao hơn trong điều kiện thử nghiệm so với mẫu Ti. Hệ số ma sát và tốc độ mài mòn của composite giảm xuống lần lượt là 18 và 31% so với mẫu Ti. Kết quả thu được chứng tỏ hiệu quả gia cường đáng kể của MWCNT đối với cơ tính và tính chất mài mòn của vật liệu composite nền Ti. Kết quả nghiên cứu mở ra những hướng ứng dụng mới của composite nền Ti trong các lĩnh vực công nghiệp hiện đại như: chế tạo máy, hàng không, vũ trụ và cấy ghép y sinh.

Từ khóa: composite nền titan, độ bền mài mòn, độ cứng, ống nano cacbon, thiêu kết plasma xung điện.

Chỉ số phân loại: 2.3, 2.5, 2.9

Investigation of microstructure and selected properties of Ti-1vol.%MWCNT composites fabricated by spark plasma sintering

Dinh Phuong Doan*, Binh An Nguyen, Van Hau Tran, Van Trinh Pham

Institute of Materials Science, Vietnam Academy of Science and Technology, 18 Hoang Quoc Viet Street, Nghia Do Ward, Hanoi, Vietnam

Received 7 June 2025; revised 30 June 2025; accepted 5 July 2025

Abstract:

Titanium matrix composites (TMCs) reinforced with 1 vol.% multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) were successfully fabricated using spark plasma sintering (SPS). The effects of MWCNTs on the microstructure, density, hardness, and friction coefficient of the composites were investigated. The results revealed that the hardness of the composite increased to 350 HV, which was approximately 36% higher than that of pure titanium (Ti) sample (256 HV). Furthermore, the Ti-MWCNT composite showed improved wear resistance under the tested conditions compared with pure Ti. The friction coefficient and wear rate of the composite decreased by 18 and 31%, respectively, compared with pure Ti. These results demonstrate the significant reinforcing effect of MWCNTs on the mechanical and wear properties of Ti matrix composites. The findings open new opportunities for the application of Ti composites in modern industries, including mechanical engineering, aerospace, and biomedical implants.

Keywords: hardness, multi-walled carbon nanotubes, spark plasma sintering, titanium composites, wear resistance.

Classification numbers: 2.3, 2.5, 2.9

*Tác giả liên hệ: Email: phuongdd@ims.vast.ac.vn

1. Đặt vấn đề

Kim loại Ti đã thu hút sự quan tâm đáng kể từ nghiên cứu cơ bản đến các ứng dụng tiên tiến khác nhau trong những năm gần đây. Điều này là do các đặc tính nổi trội của chúng như độ bền cơ học cao, trọng lượng nhẹ và khả năng chống ăn mòn tốt. Ti được ứng dụng trong nhiều ngành công nghiệp khác nhau như: hàng không vũ trụ, ô tô, điện, y tế... [1-5]. Trong đó, ngành công nghiệp hàng không vũ trụ đang thống trị phân khúc ứng dụng của Ti. Các ứng dụng chính của Ti trong ngành hàng không vũ trụ là ở những nơi cần độ bền cao, khả năng chống ăn mòn tốt và khả năng chịu được nhiệt độ cao vừa phải mà không bị chảy dẻo. Nhờ sở hữu tỷ số độ bền trên khối lượng cao, Ti được ứng dụng rộng rãi trong sản xuất khung thân và các bộ phận động cơ máy bay, góp phần giảm trọng lượng phương tiện và nâng cao hiệu quả sử dụng nhiên liệu [3]. Ngoài ra, lĩnh vực y tế và chăm sóc sức khỏe cũng là một trong những thị trường quan trọng của hợp kim Ti, hiện đứng thứ hai về mức độ tiêu thụ và có tốc độ tăng trưởng đáng kể [2, 4]. Cho đến nay, Ti và hợp kim Ti là vật liệu được dùng nhiều nhất trong lĩnh vực y sinh. Tuy nhiên, để Ti và hợp kim của nó có thể cạnh tranh với các hợp kim gốc niken (Ni) và thép độ bền cao được sử dụng trong các ứng dụng quan trọng khác, bắt buộc phải cải thiện các tính chất như độ bền, độ dẻo dai và độ cứng bằng cách phát triển vật liệu composite nền Ti. TMC là những lựa chọn thay thế tiềm năng trong nỗ lực tăng độ cứng và độ bền của Ti và hợp kim của nó [1, 6-10]. Trong hệ thống TMC, composite được gia cường bằng sợi và hạt nano đang nhận được sự quan tâm lớn [10].

Trong những năm qua, ống nano cacbon đã nổi lên như một vật liệu gia cường thiết yếu và mới cho các vật liệu composite nền gốm, polyme và kim loại [11-13]. Điều này là do tính chất cơ học vượt trội của chúng, hệ số giãn nở nhiệt thấp và hệ số ma sát thấp. Ống nano cacbon đã được sử dụng rộng rãi để tăng cường tính chất của các kim loại khác nhau và hợp kim của chúng, chẳng hạn như nhôm, đồng, magie và Ti [14-17]. Những vật liệu gia cường nano khác thường có tác động tiêu cực đến độ dẻo và độ dẫn dài của vật liệu composite nền kim loại vì chúng dễ gây ra các khuyết tật (vết nứt) trong quá trình thử nghiệm cơ học. Do hình thái cấu trúc nano và tỷ lệ giữa chiều dài và đường kính lớn, CNT có lợi thế lớn so với các vật liệu gia cường có kích thước dưới micron khác. Nhu cầu không ngừng nâng cao các tính chất của Ti và hợp kim của nó đã mở đường cho việc sử dụng CNT

làm vật liệu gia cường, để phát triển TMC [15, 17]. Trong số các phương pháp chế tạo vật liệu TMC, luyện kim bột được đánh giá là có nhiều ưu thế nhờ khả năng sử dụng các loại bột với kích thước, hình thái, cấu trúc và thành phần hóa học đa dạng. Điều này tạo điều kiện thuận lợi cho việc kiểm soát vi cấu trúc và tối ưu hóa các tính chất cơ học của vật liệu. Các nghiên cứu gần đây cho thấy, phương pháp này đặc biệt thích hợp để chế tạo vật liệu Ti-CNT, trong đó ống nano cacbon được phân tán tương đối đồng đều trong nền titan, góp phần cải thiện đáng kể hiệu suất của vật liệu composite [18-21]. Điều này là do tính linh hoạt và khả năng đạt được sự phân tán đồng đều của ống nano cacbon trong nền Ti vì nó đòi hỏi nhiệt độ xử lý thấp hơn và điều chỉnh phản ứng bề mặt giữa các thành phần của hỗn hợp. Ngoài ra, nó thúc đẩy việc đạt được các đặc tính vượt trội thông qua việc áp dụng các bước khác nhau của quá trình chế tạo hỗn hợp bột, các quá trình ép và thiêu kết.

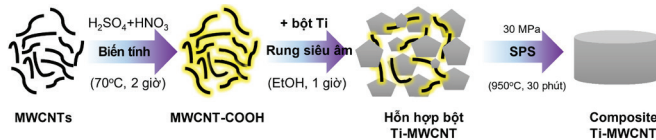
Những năm qua, tiến bộ công nghệ trong lĩnh vực luyện kim bột đã cho phép khám phá nhiều phương pháp khác nhau để nén và thiêu kết bột gốc Ti cho các ứng dụng kỹ thuật đa dạng. Các phương pháp chế tạo này bao gồm cả thiêu kết truyền thống không áp lực, các kỹ thuật hỗ trợ áp lực như ép nóng, ép đẳng tĩnh nóng hay thiêu kết plasma xung điện. Chúng được ứng dụng rộng rãi trong chế tạo kim loại titan, hợp kim titan và các vật liệu composite nền titan, nhờ khả năng nâng cao độ đặc chắc và cải thiện các tính chất của vật liệu [15, 18, 21-23]. Trong đó, thiêu kết plasma xung điện là một kỹ thuật kết khối vật liệu tiên tiến với những ưu điểm vượt trội như thời gian thiêu kết ngắn, nhiệt độ thiêu kết thấp, mật độ sít chặt vật liệu cao. Đây chính là cơ sở để chế tạo được vật liệu có các tính chất cơ, nhiệt, điện vượt trội.

Vì vậy, nghiên cứu này được thực hiện với mục tiêu chế tạo vật liệu TMC gia cường bằng MWCNTs. Vật liệu composite với hàm lượng 1vol.%MWCNTs được kết khối bằng kỹ thuật thiêu kết plasma xung điện. Sự ảnh hưởng của MWCNTs đến cấu trúc, hình thái và một số tính chất cơ học như độ cứng, độ bền mài mòn đã được nghiên cứu và trình bày trong nghiên cứu này.

2. Vật liệu và phương pháp nghiên cứu

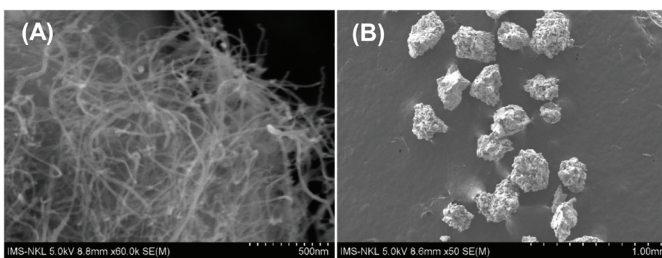
2.1. Chế tạo vật liệu

Quy trình chế tạo TMC gia cường bằng vật liệu MWCNTs với hàm lượng 1vol.% được trình bày như hình 1.

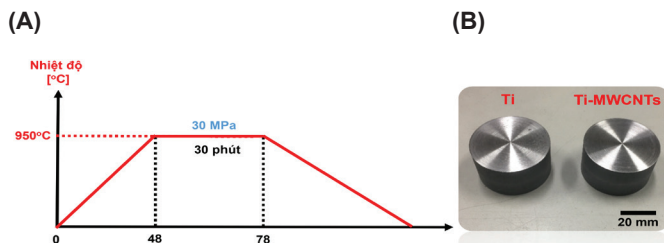


Hình 1. Quy trình chế tạo composite Ti-1vol.%MWCNT bằng kỹ thuật thiêu kết plasma xung điện.

Vật liệu MWCNTs được chế tạo bằng phương pháp lắng đọng pha hơi hóa học có độ sạch 95%, đường kính trung bình 20 nm được sử dụng làm vật liệu gia cường (hình 2A). MWCNTs được chức năng hóa bề mặt bằng hỗn hợp axit $\text{HNO}_3\text{:H}_2\text{SO}_4$ (1:3) ở nhiệt độ 70°C trong 2 giờ để thu được vật liệu MWCNT-COOH [24]. Bột Ti thương mại với độ sạch là 99,9% cung cấp bởi công ty Samhwa (Hàn Quốc) có dạng xốp Ti (hình 2B). Bột Ti được nghiền bằng phương pháp nghiền bi năng lượng cao (HEB) với tốc độ 300 vòng/phút trong thời gian 12 giờ ở môi trường hexan để làm giảm kích thước hạt. Sau đó, vật liệu MWCNT-COOH và bột Ti được trộn với nhau bằng kỹ thuật rung siêu âm trong môi trường cồn. Hỗn hợp thu được sau quá trình rung siêu âm được lọc chân không và sấy khô để thu hỗn hợp bột Ti-MWCNT. Cuối cùng, hỗn hợp bột được kết khối bằng thiết bị SPS Dr Sinter 1030S, với chu trình nhiệt độ được trình bày như trên hình 3A. Hỗn hợp bột Ti-MWCNT được kết khối ở nhiệt độ 950°C trong thời gian 30 phút, dưới áp lực 30 MPa trong môi trường chân không để thu được vật liệu composite Ti-MWCNT (hình 3B). Để so sánh sự ảnh hưởng của vật liệu gia cường MWCNT đến tính chất của composite, mẫu Ti nguyên chất cũng được chế tạo ở cùng điều kiện để đánh giá và đối chiếu.



Hình 2. Ảnh hiển vi điện tử quét (SEM) của (A) MWCNTs và (B) Bột Ti ban đầu.



Hình 3. (A) Quy trình thiêu kết vật liệu và (B) mẫu thu được sau khi chế tạo.

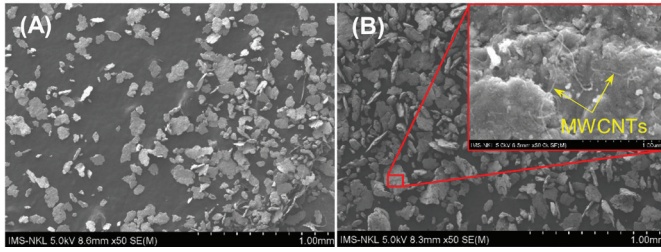
2.2. Phương pháp nghiên cứu

SEM (Hitachi S4800) được sử dụng để nghiên cứu hình thái học bề mặt của vật liệu. Phổ tán xạ năng lượng tia X (EDS) (Hitachi S4800) và máy phân tích nhiễu xạ tán xạ ngược điện tử (EBSD) (SC200) đã được sử dụng để nghiên cứu các thành phần của vật liệu. Cấu trúc tinh thể và thành phần pha của vật liệu sau thiêu kết được đo trên thiết bị Bruker D8 Advance, sử dụng nguồn phát Cu K α trong khoảng $2\theta=20\text{--}80^\circ$ với bước nhảy $0,01^\circ$. Khối lượng riêng thực nghiệm của vật liệu được đo theo nguyên lý Archimedes trên thiết bị (AND GR-202, Nhật Bản). Khối lượng riêng tương đối được xác định bằng tỷ lệ giữa khối lượng riêng thực nghiệm và khối lượng riêng lý thuyết của vật liệu. Thiết bị đo độ cứng Vickers AVK-CO (Mitutoyo, Nhật Bản) được sử dụng để khảo sát độ cứng của vật liệu. Hệ số ma sát và tốc độ mài mòn của vật liệu sau khi kết khối được đo trên thiết bị TRB³ (Anton Paar, Thụy Sĩ) sử dụng bi thép không gỉ với đường kính 6 mm, tải trọng 5 N, tốc độ quay là 5 cm/s và quãng đường dịch chuyển là 30 m.

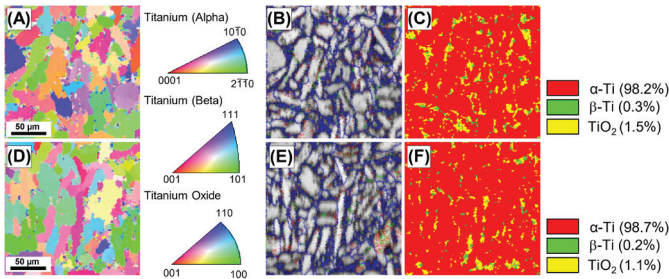
3. Kết quả và bàn luận

3.1. Kết quả nghiên cứu cấu trúc

Hình 4A là ảnh SEM của mẫu bột Ti sau khi nghiền. Quan sát trên hình, ta có thể thấy rằng, các hạt Ti đã bị nghiền và hình thành các hạt Ti dạng tấm với kích thước trong khoảng 50-200 μm , độ dày trung bình khoảng 2 μm . Kích thước của tấm Ti nhỏ hơn đáng kể so với mẫu bột ban đầu. Hình 4B là ảnh SEM của mẫu bột Ti-MWCNT sau khi trộn bằng rung siêu âm. Kết quả cho thấy, các MWCNTs đã được phân tán đồng đều trên bề mặt của các hạt Ti. So với mẫu bột Ti sau khi nghiền thì quá trình trộn bằng rung siêu âm không làm thay đổi hình dạng của bột Ti. Hình 5 thể hiện kết quả nhiễu xạ tán xạ ngược electron (EBSD) của mẫu Ti và mẫu composite Ti-MWCNT. Kết quả nghiên cứu cho thấy, kích thước hạt của mẫu Ti và composite Ti-MWCNT được xác định lần lượt vào khoảng 29,3 và 28,5 μm . Như vậy, sự có mặt của vật liệu gia cường MWCNTs không ảnh hưởng nhiều đến quá trình lớn lên của hạt. Ngoài ra, các kết quả nghiên cứu EBSD cũng cho thấy, phần lớn pha vật liệu chiếm ưu thế trong mẫu Ti và composite Ti-MWCNT là $\alpha\text{-Ti}$ với tỷ lệ lớn hơn 98%. Các pha vật liệu khác bao gồm $\beta\text{-Ti}$ chiếm tỷ lệ rất thấp, khoảng 0,2%. Đáng chú ý, có sự xuất hiện của pha oxit Ti (TiO_2) chiếm hơn 1% trong cả mẫu Ti và composite Ti-MWCNT. Đây có thể là do quá trình mài và đánh bóng vật liệu để nghiên cứu cấu trúc đã làm phát sinh các pha oxit như trên.

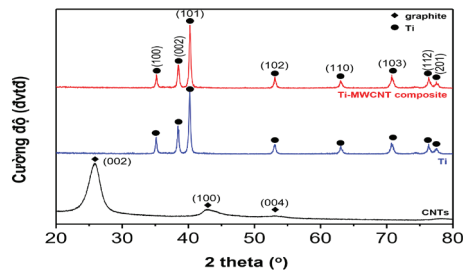


Hình 4. Ảnh SEM của bột Ti sau khi nghiền (A) và hỗn hợp bột Ti-MWCNT sau khi trộn và sấy khô (B).



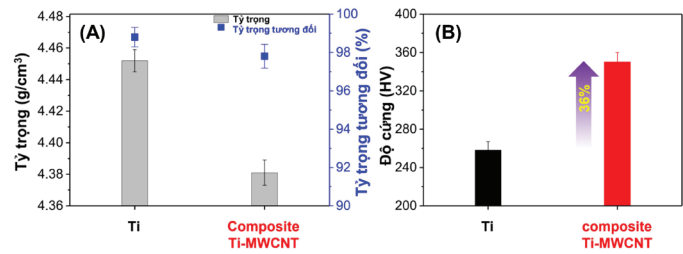
Hình 5. Ảnh EBSD, biên hạt và thành phần pha của mẫu Ti (A, B, C) và composite Ti-MWCNT (D, E, F) sau khi kết khối bằng thiêu kết plasma xung điện.

Giản đồ nhiễu xạ tia X của MWCNTs, mẫu Ti nguyên chất và composite Ti-MWCNT được thể hiện trên hình 6. Giản đồ XRD của MWCNTs xuất hiện các đỉnh đặc trưng tại các vị trí 26,18; 43,04 và 54,38° tương ứng với các mặt mạng (002), (100) và (004) của mạng graphite. Trong khi đó, đối với mẫu Ti và composite Ti-MWCNTs chỉ xuất hiện các đỉnh đặc trưng của pha α -Ti. Không quan sát thấy đỉnh của các pha đặc trưng TiO_2 và β -Ti như quan sát được trong nghiên cứu EBSD. Kết quả này có thể do hàm lượng các pha đó quá thấp, nên điều kiện đo XRD đã dùng không phát hiện được. Ngoài ra, các pha được hình thành giữa Ti và MWCNTs như TiC cũng không được phát hiện trong mẫu composite sau khi thiêu kết, chứng tỏ quá trình nghiền và quá trình thiêu kết không ảnh hưởng đến thành phần pha của vật liệu. Đáng chú ý, không quan sát được sự hiện diện của các đỉnh đặc trưng của MWCNTs trong mẫu composite, điều này có thể là do hàm lượng MWCNTs (1vol.%) được sử dụng tương đối thấp.



Hình 6. Giản đồ nhiễu xạ tia X của MWCNTs, Ti và composite Ti-MWCNT.

3.2. Khối lượng riêng, độ đặc tương đối và độ cứng



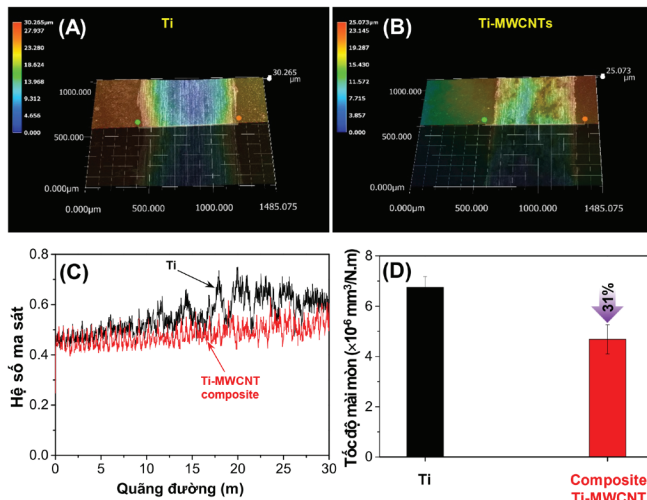
Hình 7. Khối lượng riêng và khối lượng riêng tương đối (A) và độ cứng của Ti và composite Ti-MWCNT sau khi chế tạo (B).

Khối lượng riêng và khối lượng riêng tương đối của Ti và composite Ti-MWCNT sau khi chế tạo được thể hiện trên hình 7A. Quan sát trên hình ta thấy, mẫu Ti nguyên chất có khối lượng riêng xác định vào khoảng 4,452 g/cm³ tương đương với khối lượng riêng tương đối là 98,8%. Trong khi đó, đối với mẫu composite Ti-MWCNT thì khối lượng riêng và khối lượng riêng tương đối được xác định tương ứng là 4,381 g/cm³ và 97,8%. Như vậy, khối lượng riêng và khối lượng riêng tương đối của mẫu composite thấp hơn so với Ti nguyên chất. Kết quả này là do MWCNTs có khối lượng riêng tương đối thấp ($\approx 1,8$ g/cm³) và cũng phù hợp với mong muốn chế tạo composite khối lượng riêng thấp hơn so với mẫu nguyên chất. Điều này có thể là do sự có mặt của vật liệu gia cường MWCNTs đã ngăn cản quá trình kết khối vật liệu. Tuy nhiên, đánh giá một cách tổng thể thì kỹ thuật thiêu kết plasma xung điện cho thấy, khả năng kết khối vật liệu composite khá hiệu quả khi khối lượng riêng tương đối của vật liệu đạt được là tương đối cao. Độ cứng của mẫu Ti nguyên chất và composite Ti-MWCNT sau khi chế tạo được thể hiện như trên hình 7B. Kết quả nghiên cứu cho thấy, độ cứng của mẫu Ti và composite Ti-MWCNT được xác định lần lượt là 256 và 350 HV. Như vậy, độ cứng của vật liệu composite Ti-MWCNT cao hơn 36% so với mẫu Ti nguyên chất được chế tạo ở cùng điều kiện. Kết quả thu được chứng tỏ sự ảnh hưởng tương đối tích cực của MWCNTs trong việc tăng độ cứng của vật liệu composite.

3.3. Tính chất ma sát - mài mòn

Hình 8A, 8B là ảnh bề mặt rãnh của mẫu Ti và composite Ti-MWCNT sau khi kiểm tra ma sát. Phép đo được thực hiện với tải trọng 5 N và bi thép không gỉ đường kính 6 mm được sử dụng để làm vật liệu mài mòn mẫu. Quan sát trên hình ta thấy rằng, đối với mẫu Ti nguyên chất thì rãnh có độ rộng và sâu lớn hơn đáng kể so với mẫu composite Ti-MWCNT. Kết quả này chứng tỏ rằng, khối lượng vật liệu mất đi sau quá trình

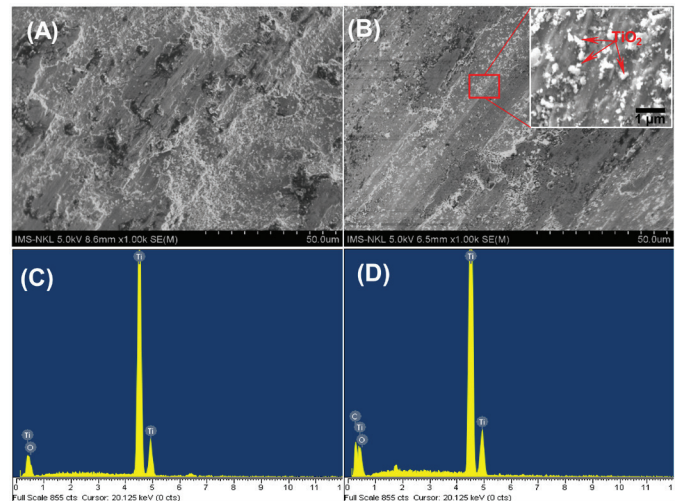
kiểm tra ma sát của mẫu Ti lớn hơn đáng kể so với mẫu composite. Hệ số ma sát của Ti và composite Ti-MWCNT được thể hiện trên hình 8C. Kết quả thu được cho thấy, hệ số ma sát của mẫu composite được xác định vào khoảng 0,51. Giá trị này thấp hơn khoảng 18% so với mẫu Ti nguyên chất (0,62). Điều này chứng tỏ khả năng bôi trơn của MWCNTs đã giúp giảm hệ số ma sát của vật liệu composite. Hình 8D là kết quả khảo sát tốc độ mài mòn của mẫu Ti và composite Ti-MWCNT. Kết quả cho thấy, tốc độ mài mòn của composite giảm đáng kể so với mẫu Ti nguyên chất. Trong đó, mẫu Ti có tốc độ mài mòn được xác định là $6,75 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ và sau khi được gia cường bằng MWCNT thì tốc độ mài mòn giảm xuống là $4,68 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{N.m}$. Như vậy, tốc độ mài mòn của composite Ti-MWCNT giảm khoảng 31% so với mẫu Ti nguyên chất. Kết quả này chứng tỏ rằng, MWCNTs có ảnh hưởng và làm giảm đáng kể hệ số ma sát và tốc độ mài mòn của composite Ti-MWCNT.



Hình 8. Ảnh bề mặt rãnh sau khi kiểm tra ma sát (A, B), hệ số ma sát (C) và tốc độ mài mòn của Ti và composite Ti-MWCNT (D).

Để tìm ra cơ chế mài mòn của vật liệu, bề mặt rãnh ma sát của các mẫu Ti và composite Ti-MWCNT đã được nghiên cứu bằng SEM và phổ EDS (hình 9). Hình 9A là ảnh SEM bề mặt rãnh của mẫu Ti. Quan sát trên hình ta thấy, bề mặt rãnh tương đối gồ ghề với nhiều hố và các hạt nhỏ bị bóc tách ra khỏi bề mặt vật liệu. Kết quả này phù hợp với kết quả đo tốc độ mài mòn. Trong khi đó, với mẫu composite Ti-MWCNT, bề mặt rãnh nhẵn hơn với nhiều hạt kích thước nhỏ ở trên bề mặt và không xuất hiện các hố do sự bóc tách vật liệu như trường hợp của Ti nguyên chất (hình 9B). Kết quả phân tích EDS của rãnh ma sát của mẫu Ti nguyên chất được thể hiện như

trên hình 9C. Kết quả thu được cho thấy, thành phần chính của vật liệu hình thành trong rãnh gồm các nguyên tố là Ti và O. Kết hợp kết quả đo EDS và SEM có thể kết luận rằng, các hạt hình thành trên bề mặt của rãnh sau khi kiểm tra ma sát đối với mẫu Ti chủ yếu là TiO_2 . Những hạt này đóng vai trò quan trọng trong việc giảm ma sát và ngăn sự bóc tách từ quá trình đo ma sát khi chuyển ma sát trượt thành ma sát lăn. Hình 9D là kết quả phân tích EDS của mẫu composite Ti-MWCNT. Kết quả thu được cho thấy, ngoài hai nguyên tố chính là Ti và O còn có sự có mặt của nguyên tố C. So sánh với mẫu Ti nguyên chất thì bề mặt rãnh ma sát của mẫu composite không chỉ tồn tại các hạt TiO_2 , mà còn có sự tồn tại của vật liệu gia cường MWCNTs. Chính sự xuất hiện của MWCNTs trên bề mặt của rãnh ma sát đã làm giảm đáng kể hệ số ma sát và tốc độ mài mòn của vật liệu. Ngoài ra, việc cải thiện đáng kể tính chất cơ học của vật liệu như độ cứng cũng đã góp phần làm giảm hệ số ma sát và tốc độ mài mòn của composite.



Hình 9. Ảnh SEM và phổ EDS của rãnh sau khi kiểm tra ma sát (A, C) Ti và composite Ti-MWCNT (B, D).

4. Kết luận

Vật liệu TMC gia cường bằng vật liệu MWCNTs đã được nghiên cứu chế tạo thành công bằng kỹ thuật thiêu kết plasma xung điện. Kết quả nghiên cứu cho thấy, độ cứng của vật liệu composite được cải thiện khoảng 36% so với mẫu Ti nguyên chất. Bên cạnh đó, hệ số ma sát và tốc độ mài mòn của composite giảm xuống lần lượt là 18 và 31% so với mẫu Ti. Kết quả nghiên cứu hình thái học và thành phần của rãnh ma sát cho thấy, sự tồn tại của các hạt TiO_2 và MWCNTs trên bề mặt đã góp phần làm giảm hệ số ma sát và tốc độ mài mòn của vật liệu composite. Kết quả nghiên cứu này chứng tỏ khả năng

nâng cao các tính chất cơ và mài mòn của MWCNT đối với composite nền Ti.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được thực hiện bởi sự tài trợ kinh phí của Bộ Khoa học và Công nghệ Việt Nam theo đề tài mã số ĐTĐLCN.21/23. Các tác giả xin chân thành cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] H. Yang, X. Chen, G. Huang (2022), "Microstructures and mechanical properties of titanium-reinforced magnesium matrix composites: Review and perspective", *Journal of Magnesium and Alloys*, **10**(9), pp.2311-2333, DOI: 10.1016/J.JMA.2022.07.008.
- [2] A. Kurup, P. Dhattrak, N. Khasnis (2021), "Surface modification techniques of titanium and titanium alloys for biomedical dental applications: A review", *Mater. Today Proc.*, **39**(1), pp.84-90, DOI: 10.1016/J.MATPR.2020.06.163.
- [3] Q. Zhao, Q. Sun, S. Xin, et al. (2022), "High-strength titanium alloys for aerospace engineering applications: A review on melting-forging process", *Materials Science and Engineering: A*, **845**, DOI: 10.1016/J.MSEA.2022.143260.
- [4] J. Alipal, T.C. Lee, P. Koshy, et al. (2021), "Evolution of anodised titanium for implant applications", *Heliyon*, **7**(7), DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e07408.
- [5] M. Najafizadeh, S. Yazdi, M. Bozorg, et al. (2024), "Classification and applications of titanium and its alloys: A review", *Journal of Alloys and Compounds Communications*, **3**, DOI: 10.1016/J.JACOMC.2024.100019.
- [6] M.D. Hayat, H. Singh, Z. He, et al. (2019), "Titanium metal matrix composites: An overview", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **121**, pp.418-438, DOI: 10.1016/J.COMPOSITESA.2019.04.005.
- [7] R. Shetty, A. Hegde, U.K. Shetty, et al. (2022), "Processing and mechanical characterisation of titanium metal matrix composites: A literature review", *Journal of Composites Science*, **6**(12), DOI: 10.3390/JCS6120388.
- [8] Y. Jiao, L. Huang, L. Geng (2018), "Progress on discontinuously reinforced titanium matrix composites", *J. Alloys Compd.*, **767**, pp.1196-1215, DOI: 10.1016/J.JALLCOM.2018.07.100.
- [9] W.A. Elaziem, M.A. Darwish, A. Hamada (2024), "Titanium-based alloys and composites for orthopedic implants applications: A comprehensive review", *Mater. Des.*, **241**, DOI: 10.1016/J.MATDES.2024.112850.
- [10] H. Attar, S.E. Haghighi, D. Kent, et al. (2018), "Recent developments and opportunities in additive manufacturing of titanium-based matrix composites: A review", *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **133**, pp.85-102, DOI: 10.1016/J.IJMACTOOLS.2018.06.003.
- [11] K.S. Munir, P. Kingshott, C. Wen (2015), "Carbon nanotube reinforced titanium metal matrix composites prepared by powder metallurgy - A review", *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, **40**(1), pp.38-55, DOI: 10.1080/10408436.2014.929521.
- [12] V. Srinivasan, S. Kunjiappan, P. Palanisamy (2021), "A brief review of carbon nanotube reinforced metal matrix composites for aerospace and defense applications", *International Nano Letters*, **11**(4), pp.321-345, DOI: 10.1007/S40089-021-00328-Y.
- [13] F. Ogawa, C. Masuda (2021), "Fabrication and the mechanical and physical properties of nanocarbon-reinforced light metal matrix composites: A review and future directions", *Materials Science and Engineering: A*, **820**, DOI: 10.1016/J.MSEA.2021.141542.
- [14] L.L. Dong, W. Zhang, Y.Q. Fu, et al. (2021), "Synergetic enhancement of strength and ductility for titanium-based composites reinforced with nickel metallized multi-walled carbon nanotubes", *Carbon*, **184**, pp. 583-595, DOI: 10.1016/j.carbon.2021.08.030.
- [15] Y. Wang, H. Wang, Y. Chen, et al. (2025) "Directing CNTs into micropore on Ti-6Al-4V adherend via ultrasonic for enhancing interfacial adhesive bonding", *Surfaces and Interfaces*, **56**, DOI: 10.1016/J.SURFIN.2024.105628.
- [16] G. Li, K. Munir, C. Wen, et al. (2020), "Machinability of titanium matrix composites (TMC) reinforced with multi-walled carbon nanotubes", *J. Manuf. Process*, **56**, pp.131-146, DOI: 10.1016/J.JMAPRO.2020.04.008.
- [17] L.L. Dong, J.W. Lu, Y.Q. Fu, et al. (2020), "Carbonaceous nanomaterial reinforced Ti-6Al-4V matrix composites: Properties, interfacial structures and strengthening mechanisms", *Carbon*, **164**, pp.272-286, DOI: 10.1016/J.CARBON.2020.04.009.
- [18] K.S. Munir, Y. Zheng, D. Zhang, et al. (2017a), "Microstructure and mechanical properties of carbon nanotubes reinforced titanium matrix composites fabricated via spark plasma sintering", *Materials Science and Engineering: A*, **688**, pp.505-523, DOI: 10.1016/J.MSEA.2017.02.019.
- [19] K.S. Munir, Y. Zheng, D. Zhang, et al. (2017b), "Improving the strengthening efficiency of carbon nanotubes in titanium metal matrix composites", *Materials Science and Engineering: A*, **696**, pp.10-25, DOI: 10.1016/J.MSEA.2017.04.026.
- [20] F.C. Wang, Z.H. Zhang, Y.J. Sun, et al. (2015), "Rapid and low temperature spark plasma sintering synthesis of novel carbon nanotube reinforced titanium matrix composites", *Carbon*, **95**, pp.396-407, DOI: 10.1016/J.CARBON.2015.08.061.
- [21] S. Sharma, P. Kumar, R. Chandra (2018), "Carbon nanotube reinforced titanium composites: An experimental and molecular dynamics study", *J. Compos. Mater.*, **52**(29), pp.4117-4123, DOI: 10.1177/0021998318774931.
- [22] J. Fang, Y.C. Tan, V.C. Tai, et al. (2024), "Selective laser melting of titanium matrix composites: An in-depth analysis of materials, microstructures, defects, and mechanical properties", *Heliyon*, **10**(22), DOI: 10.1016/J.HELIYON.2024.E40200.
- [23] Y. Zeng, J. Wang, X. Liu, et al. (2024), "Laser additive manufacturing of ceramic reinforced titanium matrix composites: A review of microstructure, properties, auxiliary processes, and simulations", *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, **177**, DOI: 10.1016/J.COMPOSITESA.2023.107941.
- [24] P.V. Trinh, N.N. Anh, N.T. Tam, et al. (2017), "Influence of defects induced by chemical treatment on the electrical and thermal conductivity of nanofluids containing carboxyl-functionalized multi-walled carbon nanotubes", *RSC Adv.*, **7**(79), pp.49937-49946, DOI: 10.1039/C7RA08552D.