

STUDY ON THE FABRICATION OF TITANIUM ALLOY COMPOSITE REINFORCED WITH BORON NITRIDE NANOPATELETS BY SPARK PLASMA SINTERING TECHNIQUE

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

Institute of Materials Science - Vietnam Academy of Science and Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	05/5/2025	In this study, titanium alloy matrix composites reinforced with vol. 1% boron nitride nanoplatelets were fabricated by using the spark plasma sintering technique. The effect of the reinforcement material on the microstructure, density, hardness and wear properties of the composite was investigated. The obtained results indicated that with the addition of boron nitride nanoplatelets, the composite exhibited a full density with a relative density higher than 99.5%. The hardness of the composite was measured to be 442 HV, which is significantly higher than that of pure titanium alloy (418 HV). Besides, the wear resistance of the composite was improved with a decrease in the coefficient of friction and wear rate. The wear rate of the composite was reduced by more than 25% compared to the pure titanium alloy. The obtained results demonstrate the effectively reinforcing effect of boron nitride nanoplatelets on the mechanical properties and wear properties of the titanium alloy composite. With excellent mechanical strength and wear resistance, Ti alloy composites are suitable for the potential applications in machinery, aerospace, biomedical implants.
Revised:	24/9/2025	
Published:	24/9/2025	
KEYWORDS		
Ti alloy composite		
Boron nitride nanoplatelets		
Spark plasma sintering		
Hardness		
Wear resistance		

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO COMPOSITE HỢP KIM TITAN GIA CƯỜNG VỚI VẬT LIỆU TẮM BO NITRUA BẰNG KỸ THUẬT THIÊU KẾT XUNG PLASMA

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

Viện Khoa học vật liệu - Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	05/5/2025	Trong nghiên cứu này, composite nền hợp kim titan gia cường với tấm bo nitrua hàm lượng 1% theo thể tích được chế tạo bằng phương pháp thiêu kết xung plasma. Sự ảnh hưởng của vật liệu gia cường đến cấu trúc, tỷ trọng, độ cứng, hệ số ma sát của composite đã được nghiên cứu qua các phép đo tương ứng. Kết quả cho thấy, khi được gia cường tấm bo nitrua thì composite có độ sít chặt cao với tỷ trọng thực nghiệm đạt được gần như giá trị tỷ trọng lý thuyết (hơn 99,5%). Độ cứng của composite đo được là 442 HV, cao hơn đáng kể so với hợp kim titan (418 HV). Không chỉ vậy, với phép đo mài mòn đã xác định khả năng chống mài mòn của composite được cải thiện với sự giảm hệ số ma sát và tốc độ mài mòn. Tốc độ mài mòn của composite giảm xuống hơn 25% so với mẫu hợp kim titan. Kết quả thu được chứng tỏ hiệu quả gia cường độc đáo của tấm bo nitrua đối với cơ tính và tính chất mài mòn của composite nền hợp kim titan. Composite hợp kim titan có cơ tính cao, độ bền mài mòn tốt có khả năng ứng dụng trong các lĩnh vực như chế tạo máy, hàng không vũ trụ và cấy ghép y sinh.
Ngày hoàn thiện:	24/9/2025	
Ngày đăng:	24/9/2025	
TỪ KHÓA		
Composite hợp kim Titan		
Tấm nano bo nitrua		
Thiêu kết xung plasma		
Độ cứng		
Độ bền mài mòn		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.12721>

* Corresponding author. Email: phuongdd@ims.vast.ac.vn

1. Giới thiệu

Titan (Ti) là nguyên tố kim loại chuyển tiếp có dư lượng rất lớn trong Trái Đất dưới dạng nhiều khoáng chất khác nhau. Đây là một trong những nguyên tố được nghiên cứu và áp dụng trong rất nhiều lĩnh vực như hàng không - vũ trụ, y học, quân sự, công nghiệp ô tô, v.v. [1]. Ti thường được hợp kim hóa với một số kim loại khác như Al, Cu, Ni, V, v.v. nhằm cải thiện các tính chất để nâng cao khả năng làm việc của chúng trong các ứng dụng đặc biệt [1], [2]. Hợp kim Ti thường sở hữu rất nhiều các tính chất độc đáo như tỷ lệ độ bền/ khối lượng cao, khả năng chống ăn mòn tốt, khả năng tương thích sinh học cao [2]. Ti và hợp kim Ti thường được nghiên cứu và sử dụng trong lĩnh vực cấy ghép y sinh [3]. So với các hệ vật liệu y sinh khác đang sử dụng như thép không gỉ, hợp kim CoCr, thì Ti và hợp kim Ti có độ bền cơ học gần với xương hơn, như: mô đun đàn hồi thấp, độ bền thấp hơn. Điều này rất quan trọng vì khi độ bền và mô đun đàn hồi của vật liệu cấy ghép quá cao so với xương sẽ dẫn đến hiện tượng chấn ứng suất, làm giảm tuổi thọ và chức năng của xương. Mô đun đàn hồi của Ti và hợp kim Ti nằm trong khoảng từ 50-110 GPa, thấp hơn một nửa so với hợp kim CoCr đúc và thép không gỉ AISI 316L hay Ta kim loại tinh khiết [1], [4]. Tuy nhiên vẫn tồn tại một số nhược điểm ở Ti và hợp kim Ti như khả năng chống mài mòn kém, độ cứng không cao cũng như tính chất cơ học không ổn định khi ở nhiệt độ cao [4]. Để khắc phục nhược điểm này, composite Ti và hợp kim Ti được nghiên cứu và phát triển như là một nhóm vật liệu tiên tiến, với nền là Ti hoặc hợp kim Ti và các vật liệu gia cường như hạt gốm SiC, TiB hay các loại vật liệu 2D như graphen, ống cacbon nano (CNTs) [5]. Gần đây, tấm nano bo nitrua (BNNP) là vật liệu dạng 2D có cấu trúc dạng lớp tương tự như graphite, trong đó vòng 6 cạnh được xen kẽ bởi 3 nguyên tử B và 3 nguyên tử N liên kết thông qua liên kết cộng hóa trị và các lớp được liên kết bởi lực Van der Waals [6]. Cấu trúc độc đáo này của BNNP mang lại nhiều tính chất độc đáo như dẫn nhiệt tốt, cách điện (5,9 eV), trơ về mặt hóa học và độ ổn định cấu trúc ở nhiệt độ cao [7], [8]. Ngoài ra, BNNP thể hiện cơ tính rất ấn tượng như mô đun đàn hồi [9], độ bền [10], [11], độ ổn định ở nhiệt độ cao [6], [12]. Những tính chất trên làm cho BNNP đơn và ít lớp trở thành loại vật liệu gia cường tiềm năng cho composite nền Ti và hợp kim Ti. Trong những năm gần đây, nghiên cứu về composite nền Ti và hợp kim Ti không chỉ tập trung vào việc cải thiện các tính chất như độ bền, khả năng chống ăn mòn và tính tương thích sinh học, mà còn mở rộng sang các hướng ứng dụng và tối ưu hóa quy trình chế tạo nhằm giảm chi phí sản xuất. Composite nền Ti và hợp kim Ti thường được chế tạo bằng các kỹ thuật luyện kim tiên tiến như thiêu kết chân không, ép nóng đẳng tĩnh (HIP), thiêu kết xung plasma (SPS) và thiêu kết laser chọn lọc (SLM) [13] - [16]. Trong những kỹ thuật kể trên, kỹ thuật SPS là một kỹ thuật luyện kim tiên tiến. Kỹ thuật này không chỉ giúp cải thiện tính chất cơ học mà còn cho phép kiểm soát về cấu trúc vi mô liên kết pha của sản phẩm; ngoài ra, hàm lượng, phân bố của các hạt gia cường cũng có thể được kiểm soát [17] - [20]. Hơn nữa, kỹ thuật này cho phép chế tạo các cấu trúc phức tạp với độ chính xác cao và thời gian chế tạo được rút ngắn nhiều lần.

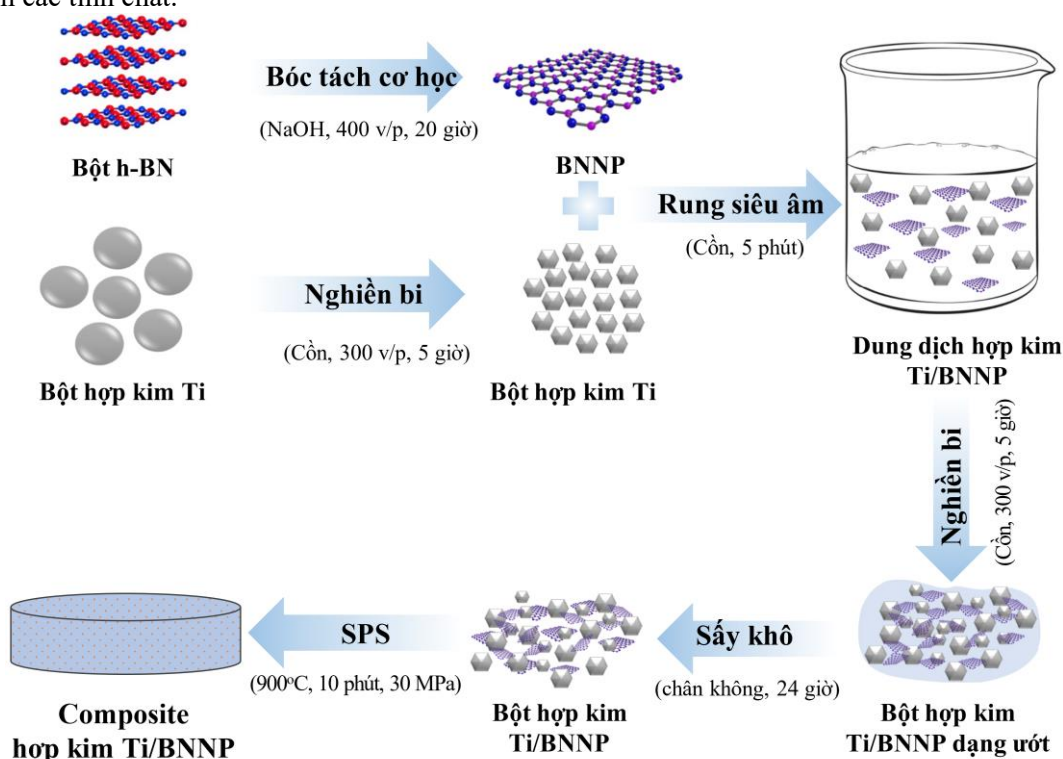
Vì vậy, trong nghiên cứu này, chúng tôi nghiên cứu chế tạo vật liệu composite nền hợp kim Ti gia cường bằng vật liệu BNNP. Composite được kết khối bằng kỹ thuật SPS để đánh giá khả năng tăng cường một số tính chất cơ học của vật liệu khi được gia cường bằng BNNP. Cấu trúc, độ cứng và các tính chất mài mòn của composite hợp kim Ti gia cường bởi BNNP với hàm lượng 1% được nghiên cứu và trình bày trong nghiên cứu này.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Chế tạo vật liệu

Quy trình chế tạo composite hợp kim Ti gia cường bằng BNNP được mô tả chi tiết như trên Hình 1. Vật liệu ban đầu là bột hợp kim Ti thương mại (Hunan Allianz Metal Products Co., Ltd, Trung Quốc) có dạng hình cầu với thành phần chính gồm 92%Ti và 8%Al (Hình 2a-b) được nghiền bằng phương pháp nghiền bi năng lượng cao (HEB) với tốc độ 300 vòng/phút trong thời

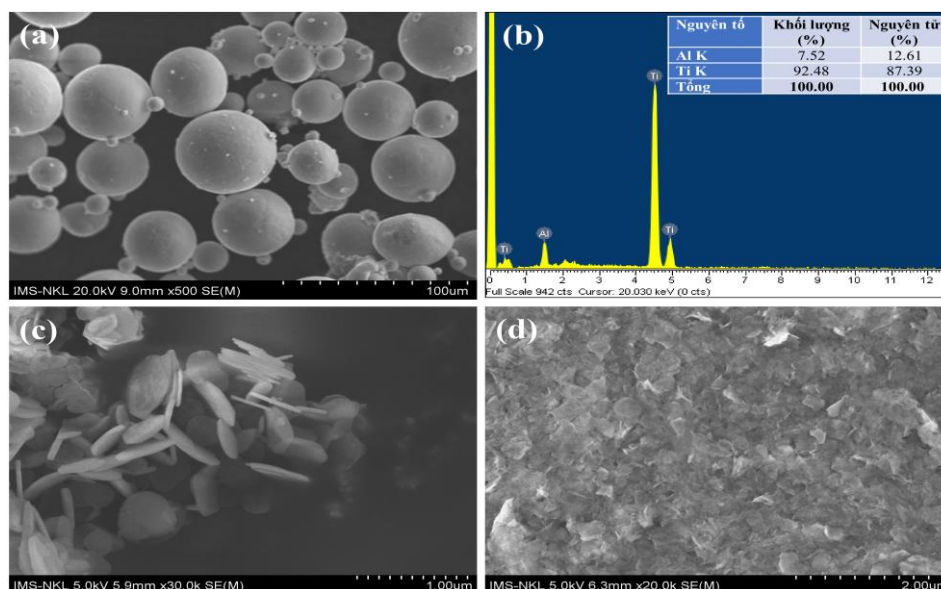
gian là 5 giờ trong môi trường cồn để làm giảm kích thước hạt. Vật liệu BNNP được chế tạo bằng phương pháp nghiền bi bột bo nitrua lục giác (hBN) trong môi trường dung dịch NaOH (2M) với tốc độ 400 vòng/phút trong thời gian 20 giờ để tách lớp đồng thời chức năng hóa bề mặt với các nhóm chức -OH (Hình 2.c-d) [21], [22]. Sau đó, vật liệu BNNP và bột hợp kim Ti trong đó hàm lượng BNNP được cố định là 1% theo thể tích được trộn với nhau bằng kỹ thuật rung siêu âm trong môi trường cồn. Hỗn hợp thu được sau quá trình rung siêu âm tiếp tục được nghiền bi với tốc độ 300 vòng/phút trong thời gian 5 giờ để tăng cường khả năng phân tán và sự kết dính giữa BNNP và bột hợp kim Ti. Sau khi nghiền, hỗn hợp được sấy khô trong môi trường chân không trong thời gian 24 giờ để thu được hỗn hợp bột hợp kim Ti/BNNP. Cuối cùng, hỗn hợp bột được kết khối bằng thiết bị SPS Labox 350 (Sinterland, Nhật Bản) (Hình 3a). Chu trình nhiệt độ thiêu kết được mô tả như trên Hình 3b. Hỗn hợp bột được kết khối ở nhiệt độ 900°C trong thời gian là 10 phút dưới áp lực là 30 MPa trong môi trường chân không để thu được vật liệu composite hợp kim Ti/BNNP (Hình 3c). Mẫu hợp kim Ti cũng được chế tạo ở cùng điều kiện để đánh giá và so sánh các tính chất.



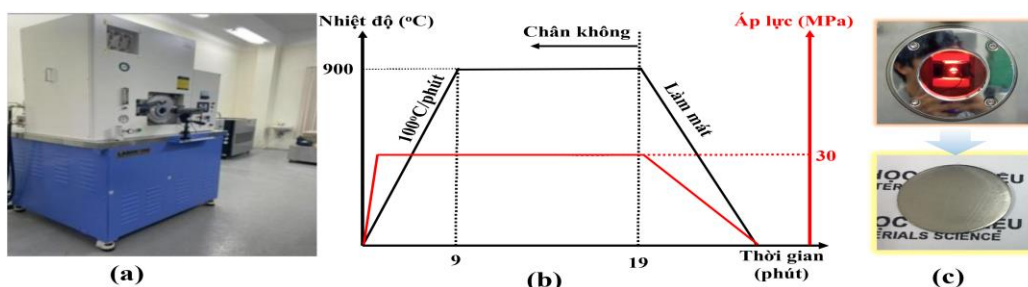
Hình 1. Quy trình chế tạo composite hợp kim Ti gia cường bằng vật liệu BNNP

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Cấu trúc, hình thái học và thành phần vật liệu được nghiên cứu bằng thiết bị hiển vi điện tử quét (SEM, Hitachi S4800). Giảm đồ nhiễu xạ tia X được đo trên thiết bị Bruker D8 Advance. Tỷ trọng của vật liệu được đo bằng phương pháp Ác-si-mét trên thiết bị AND GR-202 (Nhật Bản). Tỷ trọng tương đối được xác định bằng tỷ lệ giữa tỷ trọng thực nghiệm và tỷ trọng lý thuyết của vật liệu. Độ cứng của vật liệu được đo bằng thiết bị đo độ cứng Vickers AVK-CO (Mitutoyo, Nhật Bản). Hệ số ma sát và tốc độ mài mòn của vật liệu được đo trên thiết bị TRB³ (Anton Paar, Thụy Sĩ) với tải trọng 1N với tốc độ quay là 5 cm/s. Mỗi kết quả đo được báo cáo là giá trị trung bình của 5 phép đo tương ứng trên mỗi mẫu.

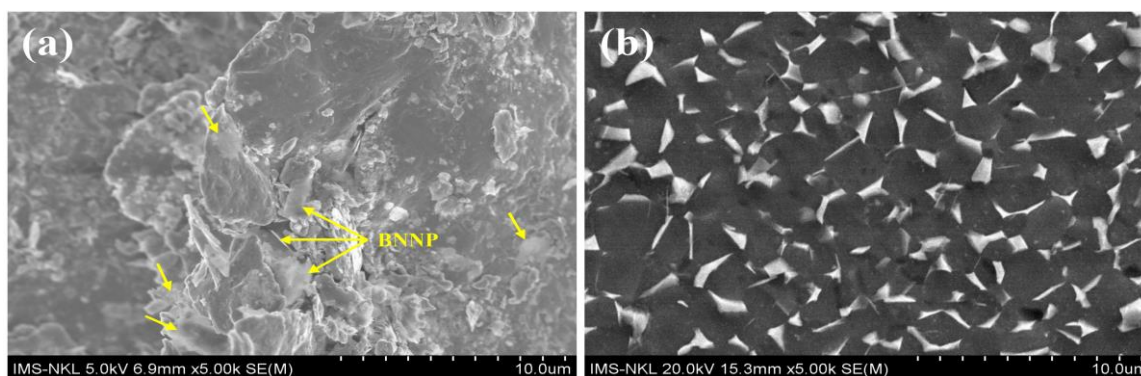


Hình 2. (a-b) Ảnh SEM và phổ EDS của bột hợp kim Ti; (c-d) ảnh SEM của bột hBN ban đầu và vật liệu BNNP sau khi bóc tách



Hình 3. (a) Thiết bị thiêu kết xung plasma Labox 350 (Sinterland, Nhật Bản), (b) chu trình nhiệt độ-áp lực sử dụng và (c) mẫu composite hợp kim Ti/BNNP sau khi chế tạo

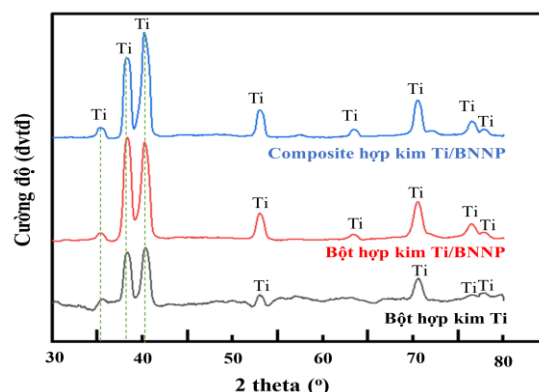
3. Kết quả và thảo luận



Hình 4. Ảnh SEM của (a) bột hợp kim Ti-BNNP và (b) composite hợp kim Ti/BNNP

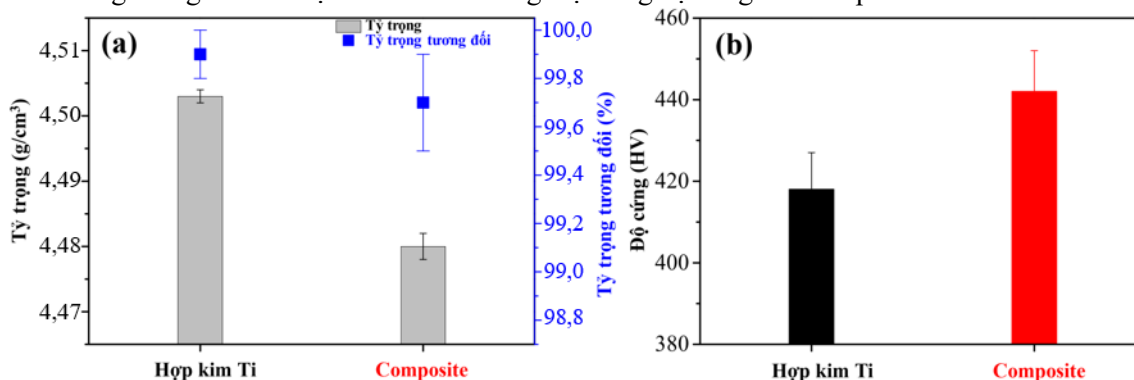
Hình thái học của vật liệu được nghiên cứu bằng SEM. Hình 4a cho thấy hình ảnh hỗn hợp bột hợp kim Ti/BNNP sau khi nghiền trộn, có thể thấy được sự hiện diện của các BNNP. Như vậy, ta có thể thấy sự phân tán đồng đều giữa bột Ti và BNNP sau khi chế tạo. Hình 4b cho thấy ảnh của mẫu sau quá trình thiêu kết. Các BNNP được phân tán đồng đều trong mẫu, bề mặt đặc khít tương đối cao. Nền hợp kim Ti được kết dính gần như hoàn toàn cho thấy độ hiệu quả kết khối cao đặc trưng của kỹ thuật SPS.

Hình 5 là giản đồ nhiễu xạ tia X của bột hợp kim Ti, hỗn hợp bột Ti/BNNP và mẫu composite sau khi thiêu kết. Ở cả ba mẫu, các đỉnh nhiễu xạ chủ yếu được xác định phù hợp các đỉnh đặc trưng của Ti. Không có đỉnh đặc trưng của các pha được hình thành giữa Ti và BNNP được phát hiện trong các mẫu hỗn hợp bột và 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, là không quan sát được sự hiện diện của các đỉnh đặc trưng của BNNP mẫu bột và mẫu composite, điều này có thể là do hàm lượng BNNP (1%) được sử dụng là tương đối thấp.



Hình 5. Giản đồ nhiễu xạ tia X của bột hợp kim Ti, bột Ti-hBN và composite Ti-hBN

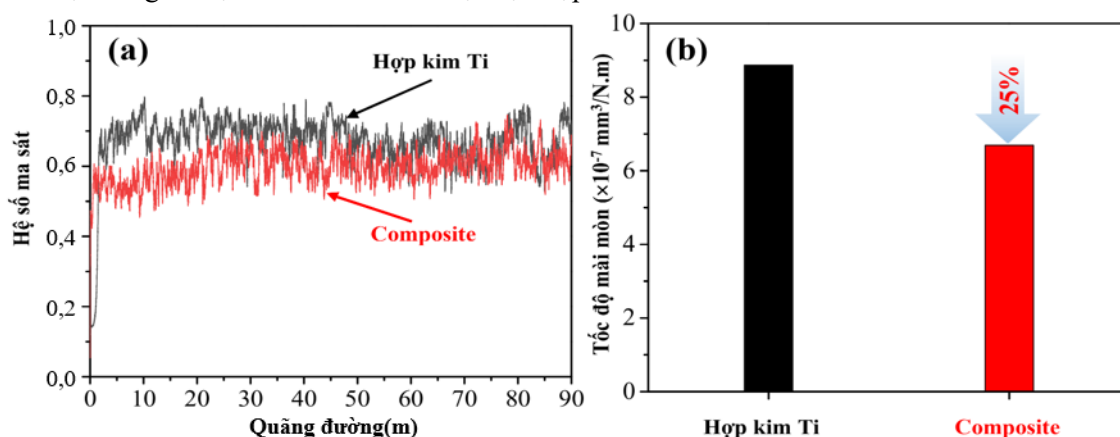
Hình 6a là tỷ trọng và tỷ trọng tương đối của các mẫu vật liệu sau khi kết khối. Kết quả thu được cho thấy, mẫu hợp kim Ti đạt được tỷ trọng thực nghiệm là $4,503 \text{ g/cm}^3$, so sánh với số liệu lý thuyết của hợp kim Ti thì đạt được tỷ trọng tương đối là 99,84%. Sau khi có thêm thành phần BNNP, thu được mẫu composite có tỷ trọng thực nghiệm là $4,48 \text{ g/cm}^3$ thấp hơn với mẫu hợp kim Ti, đây là điều hiển nhiên vì BNNP là vật liệu có khối lượng riêng tương đối thấp ($\approx 2,1 \text{ g/cm}^3$) và cũng phù hợp với mong muốn chế tạo composite tỷ trọng thấp hơn so với mẫu ban đầu. Khi so sánh tỷ trọng thực nghiệm của mẫu composite với tỷ trọng lý thuyết là $4,485 \text{ g/cm}^3$ thì tỷ trọng tương đối của composite là 99,75%. Đây là một giá trị khá tương đồng với mẫu hợp kim Ti, chứng tỏ quá trình thiêu kết có hiệu quả cao trong việc kết khối vật liệu và không bị ảnh hưởng nhiều bởi việc đưa thêm vật liệu gia cường. Hình 6b thể hiện kết quả đo độ cứng của hai mẫu vật liệu là hợp kim Ti và composite hợp kim Ti/BNNP sau thiêu kết. Như quan sát trên đồ thị ta có thể nhận thấy độ cứng của mẫu composite được xác định vào khoảng 442 HV. Giá trị này cao hơn đáng kể so với mẫu hợp kim Ti (418HV) được chế tạo ở cùng điều kiện. Như vậy, kết quả thu được chứng tỏ sự ảnh hưởng tương đối tích cực của BNNP trong việc tăng độ cứng của composite.



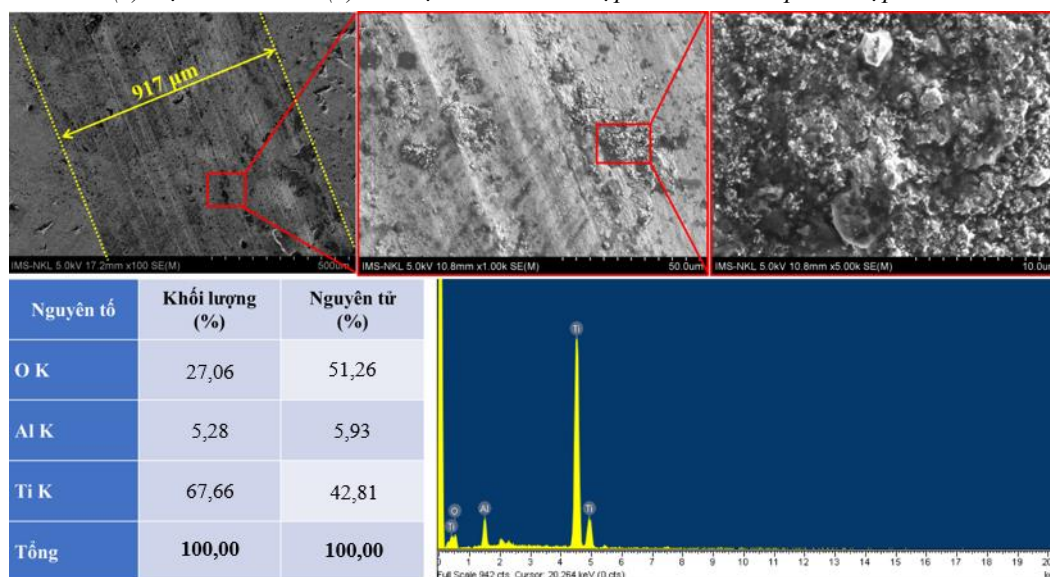
Hình 6. (a) Tỷ trọng và (b) Độ cứng của hợp kim Ti và composite hợp kim Ti/BNNP

Hình 7a cho thấy hệ số ma sát của hợp kim Ti và composite hợp kim Ti/BNNP với tải trọng $F = 1\text{N}$. Trong quá trình kiểm thử, hệ số ma sát của mẫu hợp kim Ti được xác định vào khoảng 0,68, cao hơn mẫu composite hợp kim Ti/BNNP ($\approx 0,61$). Điều này chứng tỏ khả năng bôi trơn của BNNP giúp giảm hệ số ma sát, cũng như sự đồng đều trong phân tán dẫn đến việc hệ số ma sát của mẫu composite ổn định hơn so với mẫu nguyên chất. Không chỉ vậy, tốc độ mài mòn cũng giảm đáng kể như thể hiện ở Hình 7b, với mẫu hợp kim Ti nguyên chất thì tốc độ mài mòn là $8,87 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ và sau khi được gia cường bằng BNNP thì tốc độ mài mòn còn $6,69 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/\text{N.m}$. So với mẫu nguyên chất, tốc độ mài mòn của mẫu composite giảm khoảng 25%. Kết

quả thu được chứng tỏ rằng BNNP có khả năng làm giảm hệ số ma sát và tốc độ mài mòn, qua đó cải thiện đáng kể độ bền mài mòn của vật liệu hợp kim Ti.



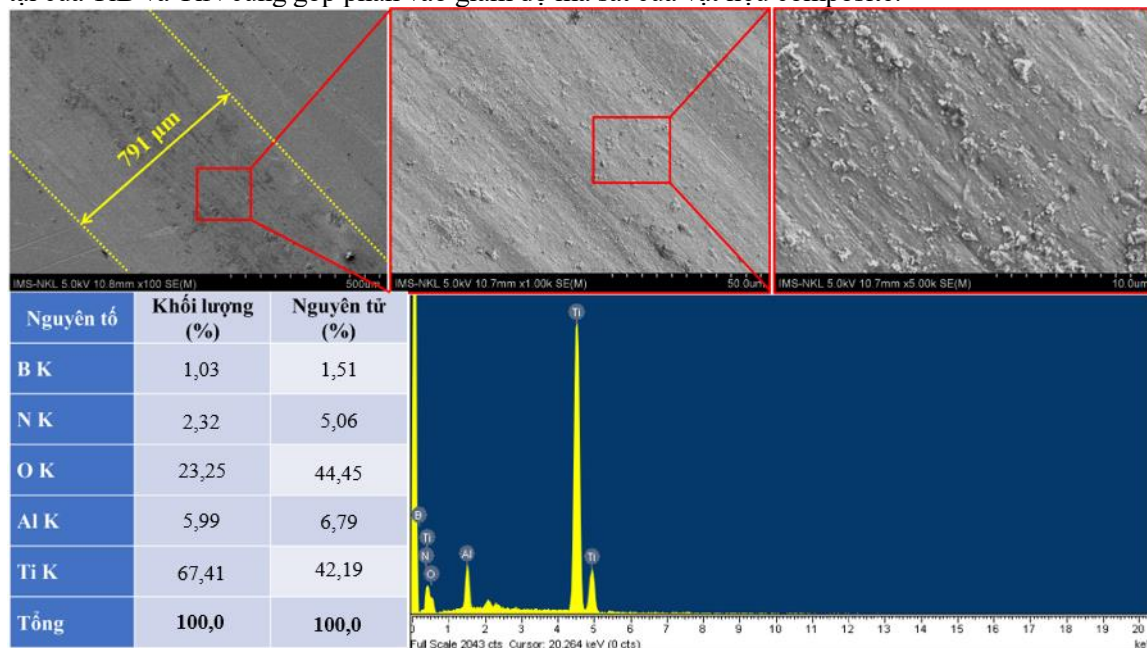
Hình 7. (a) Hệ số ma sát và (b) Tốc độ mài mòn của hợp kim Ti và composite hợp kim Ti/BNNP



Hình 8. Ảnh SEM và phổ EDS của rãnh sau khi đo ma sát của hợp kim Ti

Hình thái học của rãnh sau phép đo ma sát được thể hiện trên ảnh SEM ở các mức độ phóng đại khác nhau (Hình 8). Ở ảnh đầu tiên, với độ phóng đại 100 lần cho thấy độ rộng của rãnh là 917 μm . Ở độ phóng đại mức lớn hơn cho ta thấy bề mặt rãnh sau mài có nhiều chỗ không đồng đều, lồi lõm khác nhau với nhiều hạt kết đám lại với nhau. Phổ EDS cho thấy thành phần chính của vật liệu hình thành trong rãnh gồm các nguyên tố chính là Ti, Al 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 chủ yếu là TiO_2 và Al_2O_3 . Những hạt này đóng vai trò quan trọng trong việc giảm ma sát và ngăn sự bóc tách từ quá trình đo ma sát tạo khi chuyển ma sát trượt thành ma sát lăn. Hình 9 cho thấy ảnh SEM ở các mức độ phóng đại khác nhau của rãnh sau khi đo ma sát của mẫu composite hợp kim Ti/BNNP. Độ rộng của rãnh sau khi kiểm tra ma sát được xác định là 791 μm . Như vậy, so với mẫu hợp kim Ti nguyên chất đã giảm 15% tương ứng với tốc độ bóc tách của mẫu sau gia cường cũng giảm. Hơn nữa với các độ phóng đại lớn hơn, vẫn cho thấy bề mặt rãnh đồng đều hơn so với mẫu hợp kim Ti nguyên chất. Kết quả nghiên cứu phổ EDS cho thấy sự có mặt của các nguyên tố B và N bên cạnh các nguyên tố khác là Ti, Al và O. Như vậy, trong quá trình mài mòn không chỉ hình thành các hạt TiO_2 , Al_2O_3 mà còn có sự hiện diện của vật liệu gia cường BNNP ở trên bề mặt. Sự

có mặt của BNNP với khả năng bôi trơn tốt đã góp phần làm giảm hệ số ma sát cũng như tốc độ mài mòn của composite. Ngoài ra, trong quá trình kiểm tra ma sát cũng có thể phát sinh nhiệt do đó cũng có thể tạo nên các hạt TiB và TiN là kết quả của sự hợp kim hóa giữa Ti với B và N. Sự tồn tại của TiB và TiN cũng góp phần vào giảm độ ma sát của vật liệu composite.



Hình 9. Ảnh SEM và phổ EDS của rãnh sau khi đo ma sát của composite hợp kim Ti/BNNP

4. Kết luận

Vật liệu composite hợp kim Ti gia cường với BNNP đã được nghiên cứu chế tạo thành công bằng kỹ thuật SPS. Kết quả nghiên cứu cho thấy vật liệu gia cường BNNP đã được phân tán đồng đều với hợp kim Ti. Độ cứng của vật liệu composite được tăng cường so với mẫu hợp kim Ti nguyên chất. Kết quả đo hệ số ma sát cho thấy composite có kết quả thấp hơn đồng thời biên độ thay đổi cũng ít hơn so với vật liệu hợp kim Ti. Tốc độ mài mòn của composite cũng giảm khoảng 25% so với mẫu hợp kim Ti. Kết quả nghiên cứu hình thái học và thành phần cho thấy sự khác biệt tương đối rõ ràng giữa hai loại vật liệu. Trong khi hợp kim Ti có độ rộng rãnh ma sát lớn hơn đáng kể so với mẫu composite. Sự xuất hiện của các hạt như TiO_2 , Al_2O_3 và các tấm BNNP trên bề mặt đã góp phần làm giảm hệ số ma sát và tốc độ mài mòn của vật liệu composite so với mẫu hợp kim Ti nguyên chất. Kết quả nghiên cứu đạt được đã mở ra các hướng ứng dụng tiềm năng của composite hợp kim Ti gia cường bằng BNNP trong các lĩnh vực chế tạo máy, hàng không vũ trụ và cấy ghép y sinh.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện bởi sự tài trợ kinh phí của Bộ Khoa học và Công nghệ (MOST) Việt Nam theo đề tài mã số ĐTĐLCN.21/23.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] W. Abd-Elaziem, M. A. Darwish, A. Hamada, and W. M. Daoush, "Titanium-Based alloys and composites for orthopedic implants Applications: A comprehensive review," *Materials & Design*, vol. 241, 2024, Art. no. 112850.
- [2] M. Najafizadeh, S. Yazdi, M. Bozorg, et al., "Classification and applications of titanium and its alloys: A review," *Journal of Alloys and Compounds Communications*, vol. 3, 2024, Art. no. 100019.

- [3] D. K. Ammisetti, S. S. H. Kruthiventi, and S. Vinjavarapu, "A review on reinforcements, fabrication methods, and mechanical and wear properties of titanium metal matrix composites," *Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 71, 2024, doi: 10.1186/s44147-024-00392-z.
- [4] S. X. Liang, K. Y. Liu, L. X. Yin, G. W. Huang, Y. D. Shi, L. Y. Zheng, and Z. G. Xing, "Review of major technologies improving surface performances of Ti alloys for implant biomaterials," *Journal of Vacuum Science & Technology A*, vol. 40, 2022, Art. no. 030801.
- [5] P. E. Markovsky, J. Janiszewski, O. O. Stasyuk, V. I. Bondarchuk, D. G. Savvakina, K. Cieplak, *et al.*, "Mechanical behavior of titanium based metal matrix composites reinforced with TiC or TiB particles under quasi-static and high strain-rate compression," *Materials*, vol. 14, 2021, Art. no. 6837.
- [6] S. Ali, P. M. Ismail, M. Humayun, and M. Bououdina, "Hexagonal boron nitride: From fundamentals to applications," *Desalination*, vol. 599, 2025, Art. no. 118442.
- [7] C. Zhi, Y. Bando, T. Terao, M. Mitome, C. Tang, and D. Golberg, "Towards thermoconductive, electrically insulating polymer composites with boron nitride nanotubes as fillers," *Advanced Functional Materials*, vol. 19, no. 12, pp. 1857-1862, 2009.
- [8] L. Song, L. Ci, H. Lu, P. B. Sorokin, C. Jin, J. Ni, *et al.*, "Large scale growth and characterization of atomic hexagonal boron nitride layers," *Nano Letters*, vol. 10, no. 8, pp. 3209-3215, 2010.
- [9] J. S. Lim, I. S. Oliveira, S. Azevedo, A. Freitas, *et al.*, "Mechanical and electronic properties of boron nitride nanosheets with graphene domains under strain," *RSC Advances*, vol. 11, no. 56, pp. 35127-35140, 2021.
- [10] M. Topsakal, S. Cahangirov, and S. Ciraci, "The response of mechanical and electronic properties of graphane to the elastic strain," *Applied Physical Letters*, vol. 96, no. 9, 2010, Art. no. 091912.
- [11] A. Falin, Q. Cai, E. J. G. Santos, D. Scullion, D. Qian, *et al.*, "Mechanical properties of atomically thin boron nitride and the role of interlayer interactions," *Nature Communication*, vol. 8, no. 1, 2017, Art. no. 15815.
- [12] T. Han, Y. Luo, and C. Wang, "Effects of temperature and strain rate on the mechanical properties of hexagonal boron nitride nanosheets," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 47, no. 2, 2013, Art. no. 025303.
- [13] H. Zhou, J. Zhu, Z. Liu, Z. Yan, X. Fan, J. Lin, G. Wang, *et al.*, "High thermal conductivity of suspended few-layer hexagonal boron nitride sheets," *Nano Research*, vol. 7, no. 8, pp. 1232-1240, 2014.
- [14] H. Feng, Y. Zhou, D. Jia, and Q. Meng, "Microstructure and mechanical properties of in situ TiB reinforced titanium matrix composites based on Ti-FeMo-B prepared by spark plasma sintering," *Composites Science and Technology*, vol. 6, no. 16, pp. 2495-2500, 2004.
- [15] D. K. Ammisetti and S. S. H. Kruthiventi, "Recent trends on titanium metal matrix composites: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, pp. 9730-9735, 2021.
- [16] J. Benzing, N. Hrabec, T. Quinn, R. White, R. Rentz, and M. Ahlfors, "Hot isostatic pressing (HIP) to achieve isotropic microstructure and retain as-built strength in an additive manufacturing titanium alloy (Ti-6Al-4V)," *Materials Letters*, vol. 257, 2019, Art. no. 126690.
- [17] O. E. Falodun, B. A. Obadele, S. R. Oke, *et al.*, "Titanium-based matrix composites reinforced with particulate, microstructure, and mechanical properties using spark plasma sintering technique: a review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 102, pp. 1689-1701, 2019.
- [18] K. A. Kusters, S. E. Pratsinis, S. G. Thoma, and D. M. Smith, "Ultrasonic fragmentation of agglomerate powders," *Chemical Engineering Science*, vol. 48, no. 24, pp. 4119-4127, 1993.
- [19] F. Rikhtegar, S. G. Shabestari, and H. Saghafian, "The homogenizing of carbon nanotube dispersion in aluminium matrix nanocomposite using flake powder metallurgy and ball milling methods," *Powder Technology*, vol. 280, pp. 26-34, 2015.
- [20] P. C. Ma, N. A. Siddiqui, G. Marom, and J. K. Kim, "Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, no. 10, pp. 1345-1367, 2010.
- [21] D. P. Doan, V. H. Tran, N. M. Phan, D. T. Nguyen, J. Morgiel, *et al.*, "Mechanical and wear properties of 2D material (GO, BNNP) reinforced magnesium matrix composite consolidated by spark plasma sintering," *MRS Communications*, vol. 15, pp. 279-284, 2025.
- [22] V. T. Nguyen, V. H. Tran, *et al.*, "Preparation, thermal and lubricant properties of paraffin based nanofluid containing boron nitride nanoplatelets," *Materials Letters*, vol. 381, 2025, Art. no. 137765.