

THỰC NGHIỆM ĐỘ BỀN KÉO CỦA MẪU KIM LOẠI ÉP NHIỆT

EXPERIMENT ON THE TENSILE STRENGTH OF HOT-PRESSED METAL SAMPLES

Nguyễn Trương Trường Giang, Nguyễn Ngọc Phương, Trần Thanh Thuởng, Trần Thanh Lam*
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh
Email: 21143455@student.hcmute.edu.vn; phuongnn@hcmute.edu.vn;
thuongtt@hcmute.edu.vn; *lamtt@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào quá trình thực nghiệm đo độ bền kéo của các mẫu kim loại được xử lý bằng phương pháp ép nhiệt. Các mẫu được chế tạo với cấu trúc lớp khác nhau và ép ở nhiều mức nhiệt độ nhằm đánh giá ảnh hưởng của điều kiện ép đến tính cơ học của vật liệu. Kết quả thử kéo cho thấy rõ sự biến thiên về giới hạn chảy và lực kéo đứt giữa các cấu hình mẫu, trong đó một số mẫu có biểu hiện suy giảm nghiêm trọng độ bền do tách lớp hoặc giòn hóa ở nhiệt độ cao. Phân tích dữ liệu chỉ ra rằng nhiệt độ ép vượt ngưỡng 640°C có thể gây ảnh hưởng tiêu cực đến cấu trúc liên kết của vật liệu nếu không có lớp kết dính trung gian. Trên cơ sở đó, nghiên cứu đề xuất sử dụng lớp kẽm (Zn) nhằm cải thiện chất lượng liên kết giữa các lớp vật liệu và ổn định đặc tính cơ học. Kết quả thu được là cơ sở cho việc tối ưu hóa quy trình chế tạo vật liệu kim loại ép nhiệt trong các ứng dụng yêu cầu độ bền cao.

Từ khóa: Ép nhiệt; Kim loại nhiều lớp; Thử kéo; Giới hạn bền; Nhiệt độ ép; Cấu trúc lớp; Vật liệu kim loại; Lớp kết dính kẽm.

ABSTRACT

This study investigates the tensile strength of metal specimens fabricated using hot pressing under varying thermal conditions. Several multilayer metal samples were prepared with different structural configurations and subjected to tensile testing to evaluate the influence of pressing temperature and internal layer arrangement on mechanical performance. The results reveal significant differences in yield strength and ultimate tensile strength among samples, with certain configurations exhibiting severe interfacial delamination or embrittlement at elevated temperatures. Analysis indicates that pressing temperatures above 640°C may degrade material integrity without a suitable bonding layer. To address this, the study proposes incorporating a zinc (Zn) interlayer to enhance metallurgical bonding and preserve the mechanical characteristics of the base metal. These findings provide valuable insights for optimizing the hot-pressing process in the development of high-strength laminated metal materials for engineering applications.

Keywords: Hot pressing; Multilayer metal; Tensile test; Yield strength; Pressing temperature; Layer structure; Zinc bonding layer; Mechanical performance. 

1. TỔNG QUAN

Vật liệu kim loại nhiều lớp chế tạo bằng phương pháp ép nhiệt đang trở thành một lĩnh vực nghiên cứu nổi bật trong khoa học vật liệu nhờ khả năng tích hợp các đặc tính cơ học ưu việt từ từng thành phần riêng lẻ, chẳng hạn như độ bền, độ cứng, và khả năng chống mài mòn [1, 2]. Phương pháp ép nhiệt, thông qua việc áp dụng nhiệt độ và áp lực trong điều kiện kiểm soát, tạo điều kiện cho quá trình khuếch tán nguyên tử hoặc phản ứng luyện kim tại bề mặt tiếp xúc giữa các lớp, từ đó hình thành liên kết bền vững giữa các vật liệu [3]. Kết quả là, các tổ hợp vật liệu nhiều lớp thường thể hiện độ bền kéo, độ cứng, và khả năng chịu tải vượt trội so với các vật liệu đơn thành phần [4, 5]. Tuy nhiên, hiệu quả của liên kết này phụ thuộc mạnh mẽ vào các thông số công nghệ như nhiệt độ, áp lực, thời gian ép, và sự hiện diện của các lớp trung gian [6].

(*) Cơ chế và thách thức của liên kết ép nhiệt

Trong quá trình ép nhiệt, liên kết giữa các lớp được hình thành nhờ sự khuếch tán nguyên tử qua bề mặt tiếp xúc, đôi khi kèm theo các phản ứng luyện kim tạo ra các pha hợp kim tại ranh giới [7]. Tuy nhiên, các nghiên cứu chỉ ra rằng nếu các thông số không được tối ưu, liên kết có thể bị suy yếu do các khuyết tật vi cấu trúc như nứt, lỗ rỗng, hoặc tách lớp [8]. Chẳng hạn, nhiệt độ ép quá cao có thể gây ra hiện tượng giòn hóa hoặc làm xuất hiện các ứng suất nhiệt dư do sự chênh lệch hệ số giãn nở nhiệt giữa các vật liệu [9]. Ngược lại, nhiệt độ quá thấp có thể không đủ để kích hoạt khuếch tán, dẫn đến liên kết yếu và dễ bị phá hủy dưới tải trọng cơ học [10].

Một thách thức khác là sự tương thích

giữa các vật liệu khác nhau, đặc biệt khi kết hợp kim loại với các vật liệu composite hoặc kim loại có tính chất vật lý khác biệt [11]. Ví dụ, khi ép nhiệt nhôm và thép, sự khác biệt về độ dẫn nhiệt và hệ số giãn nở nhiệt có thể gây ra ứng suất nội tại, làm giảm độ bền kéo và giới hạn chảy của mẫu [12]. Để khắc phục, các nghiên cứu gần đây đề xuất sử dụng các lớp trung gian nhằm cải thiện liên kết và giảm thiểu các khuyết tật cấu trúc [13].

(*) Vai trò của lớp trung gian trong ép nhiệt

Lớp trung gian đóng vai trò như một “cầu nối” luyện kim, giúp tăng cường khả năng tương thích giữa các vật liệu và cải thiện tính chất cơ học của tổ hợp [14]. Trong số các vật liệu trung gian, kẽm (Zn) được đánh giá cao nhờ nhiệt độ nóng chảy thấp ($\sim 419^{\circ}\text{C}$) và khả năng tạo liên kết luyện kim với nhiều kim loại khác như nhôm, magiê, và thép [1, 3]. Các nghiên cứu thực nghiệm đã chứng minh rằng lớp Zn không chỉ cải thiện độ bền liên kết mà còn ngăn ngừa hiện tượng tách lớp, đặc biệt trong các mẫu nhiều lớp chịu tải trọng kéo [2, 4].

Cơ chế hoạt động của lớp Zn dựa trên khả năng tạo ra các pha hợp kim tại ranh giới tiếp xúc, chẳng hạn như Al-Zn hoặc Mg-Zn, giúp tăng cường độ bám dính giữa các lớp [5]. Hơn nữa, Zn có khả năng giảm ứng suất nhiệt dư nhờ tính chất dẻo và độ dẫn nhiệt phù hợp [6]. Kết quả thực nghiệm cho thấy, các mẫu sử dụng lớp Zn trung gian có độ bền kéo cao hơn tới 20-30% so với các mẫu không sử dụng lớp trung gian, đồng thời giảm đáng kể nguy cơ nứt vi cấu trúc [7, 8].

Tuy nhiên, việc sử dụng lớp Zn cũng đặt ra một số thách thức. Độ dày của lớp Zn cần được kiểm soát chặt chẽ, bởi lớp quá dày có thể

dẫn đến sự hình thành các pha giòn, trong khi lớp quá mỏng không đủ để đảm bảo liên kết [9]. Ngoài ra, nhiệt độ và thời gian ép cần được tối ưu để tránh hiện tượng Zn bị bay hơi hoặc phản ứng quá mức với kim loại nền [10]. Các nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc sử dụng các kỹ thuật phủ Zn tiên tiến, chẳng hạn như mạ điện hoặc phủ plasma, để đảm bảo độ đồng đều và kiểm soát độ dày lớp Zn [11, 12].

(*) Tầm quan trọng của việc tối ưu hóa điều kiện ép nhiệt

Việc tối ưu hóa các thông số ép nhiệt, bao gồm nhiệt độ, áp lực, và thời gian, là yếu tố then chốt để đạt được liên kết chất lượng cao và cải thiện độ bền kéo của vật liệu nhiều lớp [13]. Các nghiên cứu cho thấy rằng nhiệt độ ép thường nằm trong khoảng 400-600°C, tùy thuộc vào loại vật liệu và lớp trung gian sử dụng [14]. Áp lực ép cần đủ lớn để đảm bảo tiếp xúc chặt chẽ giữa các lớp, nhưng không được vượt quá giới hạn gây biến dạng quá mức hoặc nứt vỡ cấu trúc [1]. Thời gian ép cũng cần được điều chỉnh để đảm bảo khuếch tán đầy đủ mà không gây ra các phản ứng phụ không mong muốn [2].

Ngoài ra, việc lựa chọn môi trường ép, chẳng hạn như ép trong chân không hoặc khí trơ, có thể giúp giảm thiểu quá trình oxy hóa và cải thiện chất lượng liên kết [3]. Các nghiên cứu gần đây cũng đề xuất sử dụng các phương pháp hỗ trợ như ép nhiệt siêu âm hoặc ép nhiệt bằng dòng điện để tăng cường hiệu quả khuếch tán và giảm thời gian xử lý [4, 5].

Nghiên cứu này tập trung vào việc đánh giá thực nghiệm độ bền kéo của các mẫu kim loại nhiều lớp chế tạo bằng phương pháp ép nhiệt, với trọng tâm là phân tích vai trò của

lớp Zn trung gian trong việc cải thiện liên kết và tính chất cơ học. Bằng cách kiểm soát các thông số ép nhiệt và độ dày lớp Zn, nghiên cứu nhằm xác định các điều kiện tối ưu để đạt được độ bền kéo cao nhất, đồng thời giảm thiểu các khuyết tật vi cấu trúc. Kết quả của nghiên cứu không chỉ đóng góp vào việc hiểu biết sâu hơn về cơ chế liên kết trong vật liệu nhiều lớp mà còn cung cấp cơ sở khoa học cho việc thiết kế và chế tạo các tổ hợp vật liệu tiên tiến phục vụ các ứng dụng trong công nghiệp hàng không, ô tô, và năng lượng [6-14].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Độ bền kéo của vật liệu kim loại nhiều lớp phụ thuộc vào tổ hợp các yếu tố vi cấu trúc, gồm: khả năng liên kết giữa các lớp, tính tương thích nhiệt học, và phân bố ứng suất tại các bề mặt tiếp xúc. Khi vật liệu được xử lý bằng phương pháp ép nhiệt, quá trình khuếch tán nguyên tử xảy ra tại mặt phân cách, dẫn đến sự hình thành vùng chuyển tiếp có cấu trúc luyện kim, giúp cải thiện độ bền liên kết và giới hạn chịu tải của vật liệu (Li et al., 2022).

Tuy nhiên, ở nhiệt độ ép cao (trên 640°C), đặc biệt với các hệ vật liệu không tương hợp hoàn toàn như nhôm-carbon hay nhôm-magie, hiện tượng tách lớp hoặc tạo pha giòn dễ xảy ra nếu không có lớp trung gian phù hợp. Các mô hình ứng suất nội sinh cho thấy chênh lệch hệ số giãn nở nhiệt giữa các lớp vật liệu có thể dẫn đến ứng suất dư lớn tại vùng biên, là nguyên nhân chính gây nứt vỡ mô hoặc hở liên kết (Zhao et al., 2019; Kim & Lee, 2015).

Để khắc phục hiện tượng này, một số nghiên cứu đã đề xuất tích hợp lớp vật liệu trung gian có khả năng phản ứng luyện kim ở nhiệt độ thấp, chẳng hạn như kẽm (Zn), vào

giữa các lớp kim loại. Kẽm không chỉ giúp giảm nhiệt độ cần thiết để tạo liên kết mà còn hình thành lớp hợp kim chuyển tiếp với nhôm hoặc magiê, làm tăng độ bám dính và phân tán ứng suất đều hơn trong vùng tiếp giáp (Fang et al., 2024; Yang et al., 2023).

Ngoài ra, cơ học phá hủy cho thấy lớp Zn còn có vai trò như một lớp “đệm mềm”, giúp hạn chế sự truyền tải ứng suất đột ngột, qua đó kéo dài thời gian tới điểm gãy trong thử kéo. Do đó, việc sử dụng lớp kết dính Zn không chỉ cải thiện tính cơ học mà còn góp phần ổn định quá trình ép nhiệt trong thực tế sản xuất (Zhang et al., 2024; Nguyen & Ito, 2024).

3. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM (EXPERIMENTAL METHOD)

3.1. Chuẩn bị cho thí nghiệm

Quá trình kiểm tra được thực hiện trên máy kéo vạn năng 1000KN. Các tham số cụ thể của máy như sau:

Dung tải (Capacity):

- 1000 kN (tương đương ~100 tấn).

Dải tốc độ kéo nén (Crosshead speed range):

- Thường: 0,001 – 500 mm/min;
- Độ phân giải cao, cho phép kiểm soát tốc độ rất nhỏ để thử vật liệu giòn hoặc polymer.

Hành trình di chuyển của khung kéo (Crosshead travel):

- $\approx 1000 - 1500$ mm;
- Cho phép thử mẫu dài mà không bị giới hạn

bởi hành trình.

Độ chính xác và độ phân giải cảm biến lực:

- Độ chính xác: $\pm 0,5\%$ hoặc tốt hơn;
- Độ phân giải: 0,5 – 1 N.

Độ phân giải biến dạng (Extension/Displacement resolution):

- $\approx 0,001 - 0,01$ mm.

Hệ thống điều khiển và ghi dữ liệu:

- PLC hoặc PC-based, phần mềm lập sẵn các tiêu chuẩn (ASTM, ISO, JIS...);
- Giao diện đồ họa, cho phép xuất dữ liệu dạng .csv, .xls, hình ảnh đồ thị.

Phụ kiện đi kèm:

- Bộ gá mẫu kéo/nén (vật liệu kim loại, composite, cao su...);
- Bộ gá uốn ba điểm, uốn bốn điểm;
- Buồng điều nhiệt (nhiệt độ $-20^{\circ}\text{C} \dots +200^{\circ}\text{C}$).

3.2. Chuẩn bị các mẫu vật liệu composite

Dưới đây là các mẫu và thông số chế tạo:

Bảng 1. Thông số chế tạo mẫu

Mẫu	Cấu trúc	Nhiệt độ (°C)	Thời gian ép (s)	Lực ép (kN)
1	2 tấm nhôm nguyên khối không ép nhiệt	-	-	-
2	1 tấm nhôm nguyên khối không ép nhiệt	-	-	-
3	2 tấm nhôm ép nhiệt với các sợi carbon xếp caro (5 sợi dọc và 12 sợi ngang)	650	800	25
4	2 tấm nhôm ép nhiệt với 5 sợi carbon xếp dài	650	850	25
5	5 tấm nhôm ép nhiệt	640	800	25
6	5 tấm nhôm ép với 4 lớp sợi carbon đan xen	640	800	25
7	2 tấm nhôm dày + 2 tấm nhôm mỏng với cuộn tấm carbon bên trong	640	800	25
8	5 tấm nhôm ép với 4 lớp sợi carbon đan xen	670	800	25

Ghi chú về bố trí mẫu CF:

- Trong các mẫu có sợi CF, cách bố trí thay đổi để nghiên cứu ảnh hưởng của hướng sợi (dọc, ngang, caro) và phân lớp CF xen kẽ đến chất lượng liên kết.

- Mẫu số 3 sử dụng dạng lưới caro – sợi dọc kết hợp sợi ngang, giúp tăng liên kết hai chiều.

- Mẫu 6 và 8 sử dụng nhiều lớp CF đan xen giữa các lớp nhôm – đại diện cho cấu trúc dạng laminate.

4. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ PHÂN TÍCH (RESULTS AND DISCUSSION)

Kết quả thử nghiệm kéo cho thấy sự khác biệt đáng kể về độ bền giữa các mẫu kim loại ép nhiệt với các cấu trúc lớp khác nhau. Nghiên cứu này so sánh các mẫu nhôm nguyên khối với các mẫu composite được chế tạo bằng cách ép nhiệt các lớp nhôm và sợi carbon. Các phát hiện nhấn mạnh những thách thức trong việc đạt được liên kết lớp bền vững và đề xuất

giải pháp sử dụng kẽm (Zn) làm lớp kết dính trung gian.

(*) Kết quả độ bền kéo

Các thử nghiệm độ bền kéo được thực hiện trên tám mẫu, bao gồm hai mẫu nhôm nguyên khối (Mẫu 1 và 2) và sáu mẫu composite (Mẫu 3-8) được chế tạo bằng cách ép nhiệt các lớp nhôm và sợi carbon. Kết quả được tóm tắt như sau:

- Mẫu 1 (nhôm nguyên khối, không ép nhiệt): Đạt độ bền kéo cao nhất với giới hạn đứt (UTS) là 1464 MPa, thể hiện chất lượng vượt trội của vật liệu nền.

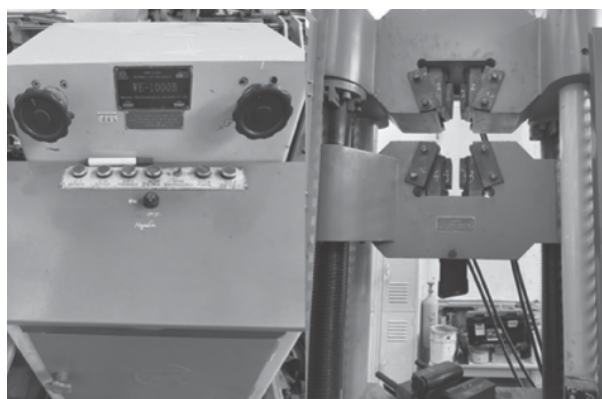
- Mẫu 2 (nhôm nguyên khối, có thể mỏng hơn): Ghi nhận UTS là 922,8 MPa, cho thấy độ dày ảnh hưởng đáng kể đến tính chất cơ học.

- Mẫu Composite (3-8): Các mẫu này, được chế tạo bằng cách ép nhiệt, có độ bền kéo thấp hơn nhiều so với các mẫu đối chứng. Cụ thể:



- ✓ Mẫu 3: 526,6 MPa;
- ✓ Mẫu 4: 279,7 MPa;
- ✓ Mẫu 5: 528,9 MPa;
- ✓ Mẫu 6: 17,1 MPa;
- ✓ Mẫu 7: 313,3 MPa;
- ✓ Mẫu 8: 1,8 MPa.

Đặc biệt, Mẫu 6 và 8 có độ bền cực thấp, gần như không chịu được lực, cho thấy sự thất bại trong liên kết giữa các lớp. Kết quả này cho thấy cấu trúc composite và điều kiện gia công ảnh hưởng mạnh mẽ đến hiệu suất cơ học của các mẫu ép nhiệt.



Hình 1. Thiết bị đo độ bền kéo của mẫu

Hình 1 minh họa thiết bị thử kéo dùng để đo độ bền kéo của các mẫu. Thiết bị bao gồm cảm biến lực, kẹp giữ mẫu và giao diện số để ghi lại dữ liệu lực và độ dịch chuyển.

(*) Các yếu tố ảnh hưởng đến độ bền kéo

Sự khác biệt lớn về độ bền kéo giữa các mẫu có thể được quy cho một số yếu tố liên quan đến quá trình ép nhiệt và thành phần vật liệu:

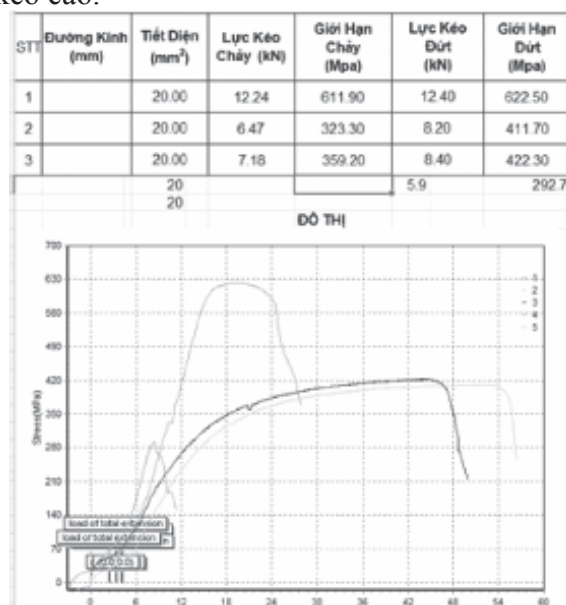
1) Thiếu liên kết giữa các lớp: Các mẫu composite (3-8) cho thấy liên kết yếu giữa lớp sợi carbon và nhôm. Sợi carbon không bám dính trực tiếp với nhôm, dẫn đến khả năng truyền tải

lực kém. Điều này đặc biệt rõ rệt ở Mẫu 6 và 8, nơi độ bền kéo gần như bằng không do liên kết lớp không hiệu quả.

2) Ảnh hưởng của nhiệt độ ép: Nhiệt độ ép cao ($>640^{\circ}\text{C}$) khiến nhôm bị mềm hóa, làm mất tính dẻo và giảm khả năng hình thành liên kết mạnh với sợi carbon. Sự suy giảm nhiệt này có thể góp phần vào độ bền thấp của các mẫu composite.

3) Cấu trúc lớp phức tạp: Các mẫu nhiều lớp, đặc biệt là Mẫu 6 và 8, dễ bị tách lớp hoặc xuất hiện vết nứt vì cấu trúc trong quá trình ép nhiệt. Sự không tương thích về hệ số giãn nở nhiệt giữa nhôm và sợi carbon, cùng với việc thiếu lớp kết dính trung gian, làm trầm trọng thêm các khuyết tật này, dẫn đến hỏng cấu trúc khi chịu tải kéo.

Những phát hiện này làm nổi bật các thách thức trong việc chế tạo composite kim loại-sợi bền vững bằng kỹ thuật ép nhiệt. Thiếu liên kết hiệu quả và độ nhạy với điều kiện gia công là những rào cản chính để đạt được độ bền kéo cao.



Hình 2. Kết quả đo độ bền kéo

Bảng 2. Kết quả kiểm tra độ bền kéo của các mẫu vật liệu

Mẫu	Tiết diện (mm ²)	Lực kéo chảy (kN)	Giới hạn chảy (MPa)	Lực kéo đứt (kN)	Giới hạn đứt (MPa)
Mẫu 1	24	29.4	1255	35.10	1464
Mẫu 2	24	10.91	454.50	23.8	922.8
Mẫu 3	24	0	0	12.6	526.6
Mẫu 4	24	4.82	200.7	6.7	279.7
Mẫu 5	20	6.86	342.8	10.6	528.9
Mẫu 6	20	0.32	15.9	0.3	17.1
Mẫu 7	20	0	0	6.3	313.3
Mẫu 8	20	0	0	0	1.8

(*) Phân tích ảnh hưởng của nhiệt độ và thời gian ép

- Thiếu liên kết giữa các lớp: Sợi carbon không kết dính trực tiếp với nhôm, dẫn đến liên kết yếu tại bề mặt tiếp xúc.

- Ảnh hưởng của nhiệt độ ép: Nhiệt độ cao (>640°C) khiến nhôm mềm hóa, mất tính dẻo, làm giảm khả năng liên kết và độ bền tổng thể.

- Cấu trúc lớp phức tạp: Các mẫu nhiều lớp (như mẫu 6 và 8) dễ bị tách lớp hoặc nứt trong quá trình ép, đặc biệt khi không có lớp kết dính trung gian.

(*) Đề xuất cải tiến – Hướng sử dụng kẽm làm lớp kết dính

Để khắc phục các vấn đề trên, nhóm nghiên cứu đề xuất sử dụng kẽm (Zn) làm lớp kết dính trung gian. Với nhiệt độ nóng chảy thấp (~419°C), kẽm có thể:

- Tạo liên kết luyện kim giữa nhôm và sợi carbon ở nhiệt độ thấp hơn.
- Tránh làm hỏng cấu trúc vật liệu nền.
- Tăng cường độ bền liên kết và ổn định cơ tính của vật liệu composite.

5. KẾT LUẬN

Thực nghiệm độ bền kéo của mẫu kim loại ép nhiệt cho thấy:

- Nhiệt độ ép (>640°C) và cấu trúc nhiều lớp làm suy giảm nghiêm trọng độ bền do tách lớp hoặc giòn hóa. Mẫu nguyên khối có độ bền cao nhất (1464 MPa), trong khi mẫu composite phức tạp (mẫu 6, 8) gần như mất khả năng chịu lực.

- Sử dụng kẽm (Zn) làm lớp kết dính trung gian được đề xuất để tăng cường liên kết luyện kim ở nhiệt độ thấp, bảo toàn cơ tính vật liệu.

- Kết quả này mở ra hướng tối ưu hóa quy trình chế tạo vật liệu composite nhiều lớp, hứa hẹn ứng dụng trong các ngành công nghiệp đòi hỏi độ bền cao như hàng không, ô tô và tàu thủy.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Nguyễn Trọng Hiếu;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài

báo: Nguyễn Trương Trường Giang, Nguyễn Ngọc Phương, Trần Thanh Thường, Trần Thanh Lam.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh đã tài trợ kinh phí cũng như hỗ trợ trong quá trình thực hiện nghiên cứu này. Bài báo này là sản phẩm của đề tài NCKH với mã số: SV2025-363.❖

Ngày nhận bài: **08/4/2025**

Ngày phản biện: **20/4/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Alessi, S., Pitarresi, G., & Spadaro, G. (2014), “*Effect of hydrothermal ageing on the thermal and delamination fracture behaviour of CFRP composites*”. Composites Part B: Engineering, 67, 145-153. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.06.014>
- [2]. Bhardwaj, P., & Grace, A. N. (2020), “*Antistatic and microwave shielding performance of polythiophene-graphene grafted 3-dimensional carbon fibre composite*”. Diamond and Related Materials, 106, Article 107871. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.107871>
- [3]. Daniels, H. P. C. (1965), “*Ultrasonic welding*”. Ultrasonics, 3(4), 190-196. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(65\)90025-8](https://doi.org/10.1016/0041-624X(65)90025-8)
- [4]. George, J. L. (2006), “*Utilization of ultrasonic consolidation in fabricating satellite decking*”. [Publisher not specified].
- [5]. Hahnlen, R., & Dapino, M. J. (2014), “*NiTi-Al interface strength in ultrasonic additive manufacturing composites*”. Composites Part B: Engineering, 59, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.11.021>
- [6]. Han, Y. Q., Lin, C. F., Han, X. X., Chang, Y. P., Guo, C. H., & Jiang, F. C. (2017), “*Fabrication, interfacial characterization and mechanical properties of continuous Al₂O₃ ceramic fiber reinforced Ti/Al₃Ti metal-intermetallic laminated (CCFR-MIL) composite*”. Materials Science and Engineering: A, 688, 338-345. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.008>
- [7]. Hehr, A., Dapino, M. J., & Joshua, P. (2015), “*Interfacial shear strength estimates of NiTi-Al matrix composites fabricated via ultrasonic additive manufacturing*”. Composites Part B: Engineering, 77, 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.025>
- [8]. Hou, M., Ye, L., & Mai, Y.-W. (1997), “*Manufacturing process and mechanical properties of thermoplastic composite components*”. Journal of Materials Processing Technology, 63(1-3), 334-338. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02665-1](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02665-1)
- [9]. Hwang, D., & Cho, D. (2019), “*Fiber aspect ratio effect on mechanical and thermal properties of carbon fiber/ABS composites via extrusion and long fiber thermoplastic processes*”. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 80, 335-344. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.08.017>
- [10]. Kong, C. Y., & Soar, R. (2005), “*Fabrication of metal-matrix composites and adaptive composites using ultrasonic consolidation process*”. Materials Science and Engineering: A, 412(1-2), 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.08.213>
- [11]. Kostagiannakopoulou, C., Loutas, T. H., Sotiriadis, G., Markou, A., & Kostopoulos, V. (2015), “*On the interlaminar fracture toughness of carbon fiber composites enhanced with graphene nano-species*”. Composites Science and Technology, 118, 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2015.09.002>
- [12]. Ma, Y., Yang, Y., Sugahara, T., & Hamada, H. (2016), “*A study on the failure behavior and mechanical properties of unidirectional fiber reinforced thermosetting and thermoplastic composites*”. Composites Part B: Engineering, 99, 162-172. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.002>
- [13]. Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H. N., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. F. (2017), “*Materials for wind turbine blades: An overview*”. Materials, 10(11), Article 1285. <https://doi.org/10.3390/ma10111285>
- [14]. Obielodan, J. O., Ceylan, A., Murr, L. E., & Stucker, B. E. (2010), “*Multi-material bonding in ultrasonic consolidation*”. Rapid Prototyping Journal, 16(3), 180-188. <https://doi.org/10.1108/13552541011036011>