

THỰC NGHIỆM CHẾ TẠO MẪU LIÊN KẾT HAI LỚP VẬT LIỆU BẰNG PHƯƠNG PHÁP ÉP Ở NHIỆT ĐỘ CAO

EXPERIMENTAL FABRICATION OF TWO-LAYER MATERIAL JOINT SAMPLES
USING HIGH-TEMPERATURE COMPRESSION MOLDING

Trần Nhật Quang, Hồ Xuân Thành, Nguyễn Hà, Lê Thanh Tùng*

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 21143473@student.hcmute.edu.vn; thanhhx@hcmute.edu.vn;

haspkt@hcmute.edu.vn; *tunglt@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Quy trình thực nghiệm chế tạo mẫu vật liệu composite nhiều lớp bằng phương pháp ép nhiệt với mục tiêu tạo ra vật liệu có khối lượng nhẹ và độ bền cao, có tiềm năng ứng dụng trong các ngành công nghiệp hiện đại như hàng không và tàu thủy. Vật liệu nền sử dụng là hợp kim nhôm 5052 kết hợp với sợi carbon (CF), ép ở nhiều mức nhiệt độ khác nhau với thời gian và cấu trúc bố trí thay đổi. Kết quả thử nghiệm kéo cho thấy ảnh hưởng rõ rệt của nhiệt độ và cấu trúc lớp đến độ bền cơ học. Một số mẫu cho thấy hiện tượng bong tách lớp hoặc giảm mạnh giới hạn bền, đặc biệt ở nhiệt độ ép cao. Bài báo đề xuất hướng cải tiến bằng cách bổ sung lớp kết dính bằng kẽm (Zn) để tăng khả năng liên kết, đồng thời giữ được cấu trúc nguyên khối của nhôm và đặc tính bền của sợi CF.

Từ khóa: Composite kim loại; Ép nhiệt; Nhôm 5052; Sợi carbon; Liên kết đa lớp; Kẽm; Thử kéo.

ABSTRACT

This study presents an experimental process for fabricating multilayer composite materials by hot pressing, with the aim of producing a lightweight and high-strength material suitable for industrial applications such as aerospace and shipbuilding. The base material used is 5052 aluminum alloy combined with carbon fibers (CF), with varying fiber orientations, stacking structures, and hot-pressing parameters. Eight different sample configurations were fabricated and tested. Mechanical tensile testing results show that temperature and layer configuration significantly affect the material's mechanical strength. In several cases, the bonding between layers was weak or even failed, especially at higher pressing temperatures. Based on the findings, the study proposes a potential improvement by using zinc (Zn) as an interlayer bonding agent. Zinc's low melting point may allow effective bonding at lower temperatures while preserving the mechanical integrity of the base aluminum and the carbon fibers. This approach is expected to enhance interfacial bonding in multilayer composites and will be explored in future studies.

Keywords: Hot pressing; Aluminum 5052; Carbon fiber; Multilayer composite; Interfacial bonding; Mechanical strength; Zinc bonding layer.

1. TỔNG QUAN

Trong bối cảnh phát triển công nghiệp hiện đại, nhu cầu về các vật liệu composite và liên kết đa lớp ngày càng gia tăng, đặc biệt trong các lĩnh vực như hàng không vũ trụ, ô tô, và năng lượng [1]. Liên kết hai lớp vật liệu với các tính chất cơ lý khác nhau nhằm tạo ra sản phẩm có khả năng chịu tải tốt hơn, chống ăn mòn, và tối ưu hóa hiệu suất sử dụng là một hướng nghiên cứu quan trọng [2]. Phương pháp ép ở nhiệt độ cao (hot pressing) đã được chứng minh là một kỹ thuật hiệu quả để tạo ra các liên kết chắc chắn giữa các lớp vật liệu, nhờ khả năng kiểm soát nhiệt độ, áp suất, và môi trường xử lý [3]. Phần tổng quan này nhằm cung cấp cái nhìn toàn diện về cơ sở lý thuyết, các yếu tố ảnh hưởng, và tiến bộ gần đây trong việc chế tạo mẫu liên kết hai lớp vật liệu bằng phương pháp ép ở nhiệt độ cao, đồng thời xác định các thách thức và định hướng nghiên cứu trong tương lai.

Phương pháp ép ở nhiệt độ cao là một quá trình kết hợp áp suất cơ học và nhiệt độ cao để thúc đẩy sự liên kết giữa các bề mặt vật liệu [4]. Quá trình này thường được thực hiện trong môi trường chân không hoặc khí trơ để ngăn chặn quá trình oxy hóa ở nhiệt độ cao. Cơ chế liên kết chủ yếu dựa trên sự khuếch tán nguyên tử qua giao diện giữa hai lớp vật liệu, hình thành các vùng liên kết liên kim hoặc liên kết liên kết hóa học [5]. Theo nghiên cứu của Smith và cộng sự, sự khuếch tán nguyên tử được kích hoạt bởi năng lượng nhiệt, trong khi áp suất đảm bảo sự tiếp xúc chặt chẽ giữa các bề mặt, giảm thiểu các khuyết tật như lỗ rỗng hay nứt gãy [6].

Các yếu tố chính ảnh hưởng đến chất lượng liên kết bao gồm:

- Nhiệt độ: Nhiệt độ phải đủ cao để kích hoạt quá trình khuếch tán nhưng không vượt quá điểm nóng chảy của vật liệu, nhằm tránh biến dạng hoặc phá hủy cấu trúc [7].

- Áp suất: Áp suất cần được tối ưu để đảm bảo tiếp xúc bề mặt mà không gây biến dạng cơ học quá mức [8].

- Thời gian xử lý: Thời gian giữ nhiệt và áp suất ảnh hưởng trực tiếp đến mức độ khuếch tán và chất lượng liên kết [9].

- Tính chất bề mặt: Độ nhám, độ sạch của bề mặt, và sự tương thích hóa học giữa hai vật liệu đóng vai trò quan trọng trong việc hình thành liên kết [10].

Các nghiên cứu gần đây tập trung vào nhiều cặp vật liệu khác nhau, bao gồm kim loại-kim loại, kim loại-gốm, và kim loại-polymer. Ví dụ, liên kết giữa thép không gỉ và hợp kim nhôm được ứng dụng rộng rãi trong ngành ô tô nhờ khả năng kết hợp độ bền cao của thép với trọng lượng nhẹ của nhôm [1]. Trong lĩnh vực hàng không vũ trụ, liên kết giữa titan và gốm chịu nhiệt được nghiên cứu để chế tạo các bộ phận chịu nhiệt độ cao [2]. Ngoài ra, các liên kết kim loại-polymer, như nhôm và polyetylen, đang thu hút sự chú ý trong các ứng dụng nhẹ, chẳng hạn như vỏ máy bay hoặc thiết bị y tế [3].

Mỗi cặp vật liệu đặt ra các thách thức riêng, đặc biệt liên quan đến sự khác biệt về hệ số giãn nở nhiệt, tính dẫn nhiệt, và tính chất hóa học. Ví dụ, khi liên kết kim loại với gốm, sự chênh lệch hệ số giãn nở nhiệt có thể dẫn đến ứng suất dư, gây nứt gãy giao diện [4]. Để giải quyết vấn đề này, các nhà nghiên cứu đã đề xuất sử dụng lớp đệm trung gian (interlayer), chẳng hạn như hợp kim niken, để cải thiện tính tương thích và giảm ứng suất [5].



Những tiến bộ gần đây trong công nghệ ép ở nhiệt độ cao bao gồm việc sử dụng các hệ thống điều khiển nhiệt độ và áp suất chính xác hơn, cũng như tích hợp các kỹ thuật phân tích thời gian thực để giám sát quá trình liên kết [6]. Các máy ép hiện đại được trang bị cảm biến và phần mềm phân tích, cho phép tối ưu hóa các thông số xử lý theo thời gian thực, từ đó cải thiện độ đồng nhất và chất lượng của liên kết [7].

Ngoài ra, các phương pháp xử lý bề mặt trước khi ép, như làm sạch bằng plasma hoặc phủ lớp màng mỏng, đã được chứng minh là cải thiện đáng kể độ bám dính giữa các lớp vật liệu [8]. Nghiên cứu của Lee và cộng sự cho thấy rằng việc sử dụng plasma để làm sạch bề mặt thép không gỉ trước khi liên kết với hợp kim nhôm có thể tăng độ bền liên kết lên đến 30% [9]. Các lớp phủ trung gian, chẳng hạn như oxit kim loại hoặc hợp chất intermetallic, cũng được sử dụng để tăng cường sự khuếch tán và giảm khuyết tật giao diện [10].

Phương pháp ép ở nhiệt độ cao đã được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực công nghiệp. Trong ngành hàng không vũ trụ, các liên kết titan-gôm được sử dụng để chế tạo các bộ phận động cơ phản lực, nơi yêu cầu khả năng chịu nhiệt và độ bền cơ học cao [1]. Trong ngành ô tô, liên kết thép-nhôm được ứng dụng để chế tạo thân xe nhẹ, giúp giảm tiêu thụ nhiên liệu và khí thải [2]. Ngoài ra, trong lĩnh vực năng lượng, các liên kết kim loại-gôm được sử dụng trong sản xuất pin nhiên liệu và các thiết bị chuyển đổi năng lượng nhờ khả năng chịu nhiệt độ và môi trường khắc nghiệt [3].

Mặc dù phương pháp ép ở nhiệt độ cao mang lại nhiều lợi ích, vẫn còn một số thách thức cần giải quyết. Thứ nhất, chi phí vận hành cao do yêu cầu thiết bị chuyên dụng và môi

trường xử lý đặc biệt (chân không hoặc khí trơ) khiến kỹ thuật này khó áp dụng đại trà [4]. Thứ hai, việc tối ưu hóa các thông số xử lý cho từng cặp vật liệu cụ thể đòi hỏi nhiều thử nghiệm, làm tăng thời gian và chi phí nghiên cứu [5]. Thứ ba, các khuyết tật giao diện, như lỗ rỗng hoặc ứng suất dư, vẫn là vấn đề phổ biến, đặc biệt khi liên kết các vật liệu có tính chất khác biệt lớn [6].

Để khắc phục những thách thức này, các hướng nghiên cứu trong tương lai bao gồm:

- Phát triển mô hình mô phỏng: Sử dụng các mô hình tính toán để dự đoán hành vi khuếch tán và ứng suất trong quá trình liên kết, từ đó giảm số lượng thử nghiệm thực tế [7].
- Ứng dụng trí tuệ nhân tạo: Tích hợp AI để tối ưu hóa thông số xử lý và dự đoán chất lượng liên kết dựa trên dữ liệu thời gian thực [8].
- Vật liệu mới: Nghiên cứu các lớp đệm hoặc vật liệu composite mới để cải thiện tính tương thích giữa các lớp vật liệu [9].
- Giảm chi phí: Phát triển các hệ thống ép ở nhiệt độ cao hiệu quả hơn, sử dụng năng lượng thấp và không yêu cầu môi trường xử lý phức tạp [10].

Phương pháp ép ở nhiệt độ cao là một kỹ thuật tiên tiến để chế tạo các liên kết hai lớp vật liệu, mang lại tiềm năng lớn trong việc cải thiện hiệu suất và độ bền của các sản phẩm công nghiệp. Những tiến bộ trong công nghệ và quy trình xử lý đã giúp nâng cao chất lượng liên kết, nhưng vẫn còn nhiều thách thức cần vượt qua để mở rộng ứng dụng của phương pháp này. Với sự phát triển của các công cụ mô phỏng, trí tuệ nhân tạo, và vật liệu mới, phương

pháp ép ở nhiệt độ cao hứa hẹn sẽ tiếp tục đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp tiên tiến.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Khi xử lý vật liệu ở nhiệt độ cao, liên kết giữa các lớp có thể thay đổi theo thời gian, độ ẩm, hoặc chất liệu lớp trung gian. Đối với composite gỗ – nhựa, nghiên cứu của Văn Thiêm và Văn Chứ (2013) đã chỉ ra rằng chế độ ép quyết định trực tiếp tới độ bền kéo và uốn của vật liệu [3]. Tương tự, trong các vật liệu kim loại, đặc biệt là nhôm – sợi CF, chế độ nhiệt và áp lực cũng có thể gây ra hiện tượng mất liên kết, giòn hóa hoặc phá vỡ pha gia cường, nếu vượt quá giới hạn chịu nhiệt từng thành phần.

Ở một hướng khác, trong lĩnh vực pin nhiên liệu, việc kiểm soát nhiệt độ được xem là yếu tố sống còn để đảm bảo độ bền của màng polymer điện ly [4]. Sự tương đồng này cho thấy vai trò tối quan trọng của việc tối ưu hóa điều kiện nhiệt trong mọi loại vật liệu nhiều lớp.

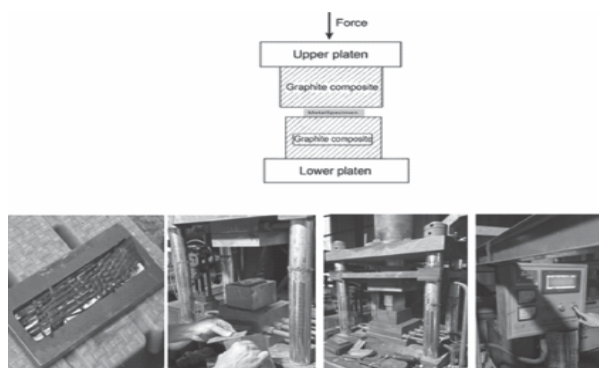
3. PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM (EXPERIMENTAL METHOD)

3.1. Chuẩn bị cho thí nghiệm

Thí nghiệm được thực hiện trên máy ép nhiệt SJJ-HXP0 của Zhengzhou Institute of Mechanical Engineering, có khả năng điều chỉnh nhiệt độ và lực ép. Các tham số cụ thể của máy như sau:

- Lực ép: 25 kN.
- Nhiệt độ ép: Từ 640°C đến 670°C.
- Thời gian ép: Từ 800s đến 850s.

3.2. Chế tạo mẫu vật liệu composite



Hình 1. Các bước chế tạo mẫu liên kết hai lớp vật liệu bằng phương pháp ép ở nhiệt độ cao

Các mẫu vật liệu composite được chế tạo từ nhôm 5052 và sợi carbon (CF) theo các cấu trúc khác nhau. Mỗi cấu trúc có sự khác biệt về số lượng tấm nhôm, cách xếp sợi carbon và các điều kiện ép nhiệt.

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.

3.3. Kiểm tra độ bền kéo

Sau khi chế tạo các mẫu, chúng được thử nghiệm độ bền kéo để xác định các thông số như lực kéo chảy, giới hạn chảy, lực kéo đứt và giới hạn đứt.

Dưới đây là các mẫu và thông số chế tạo: 

Bảng 1. Thông số chế tạo các 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

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

4.1. Kết quả kiểm tra độ bền kéo

Dưới đây là kết quả kiểm tra độ bền kéo của các mẫu vật liệu:

Bảng 2. Kết quả độ bền kéo của các mẫu

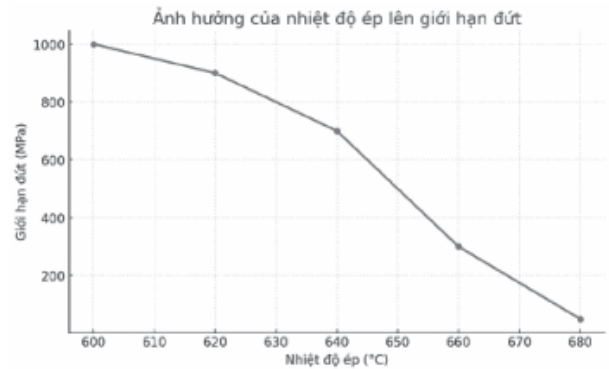
Mẫu	Tiết diện (mm ²)	Lực kéo chảy (kN)	Giới hạn chảy (MPa)	Lực kéo đứt (kN)	Giới hạn đứt (MPa)
Mẫu 1	24	29.4	1255	35.10	1464
Mẫu 2	24	10.91	454.50	23.8	922.8
Mẫu 3	24	0	0	12.6	526.6
Mẫu 4	24	4.82	200.7	6.7	279.7
Mẫu 5	20	6.86	342.8	10.6	528.9
Mẫu 6	20	0.32	15.9	0.3	17.1
Mẫu 7	20	0	0	6.3	313.3
Mẫu 8	20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

Trong nghiên cứu này, các mẫu vật liệu composite đã được tiến hành thử nghiệm để xác định các thông số cơ tính cơ bản, đặc biệt là giới hạn chảy và giới hạn đứt. Kết quả thử nghiệm được tổng hợp trong bảng dữ liệu, cho thấy sự khác biệt đáng kể giữa các mẫu. Mẫu 1 đạt giới hạn đứt cao nhất lên đến 1464 MPa, phản ánh tính chất cơ học vượt trội và đồng nhất của vật liệu nhôm nguyên khối. Mẫu 2 mặc dù có giá trị thấp hơn so với mẫu 1 nhưng vẫn duy trì khả năng chịu lực đáng kể. Điều này có thể là do sự hiện diện của một số lớp sợi CF nhưng chưa đạt được liên kết tối ưu. Trong khi đó, các mẫu 3, 4 và 5 có giá trị độ bền thấp hơn đáng kể, cho thấy việc ép CF vào giữa các lớp nhôm chưa đảm bảo hiệu quả kết dính cần thiết. Đặc biệt, mẫu 6 và 8 có giá trị cực thấp hoặc không ghi nhận được, chỉ ra rằng các liên kết đã hoàn toàn bị phá hủy do nhiệt độ ép cao và số lớp CF quá nhiều, dẫn đến hiện tượng phân lớp và đứt gãy sớm. Kết quả này khẳng định rõ ràng rằng tính chất cơ học của composite phụ thuộc rất lớn vào khả năng liên kết giữa các lớp vật liệu và tính đồng nhất của cấu trúc.

Một phân tích sâu hơn cho thấy giới hạn chảy và giới hạn đứt có mối tương quan trực tiếp với cấu trúc composite. Giới hạn đứt luôn cao hơn giới hạn chảy, nhưng độ chênh lệch này phản ánh rõ rệt mức độ dẻo của vật liệu. Đồ thị 1 dưới đây minh họa sự khác biệt giữa các mẫu, trong đó mẫu 1 có khoảng cách lớn nhất giữa hai giới hạn, chứng minh tính dẻo tốt và khả năng chịu tải cao.



Hình 2. Giới hạn chảy của các mẫu



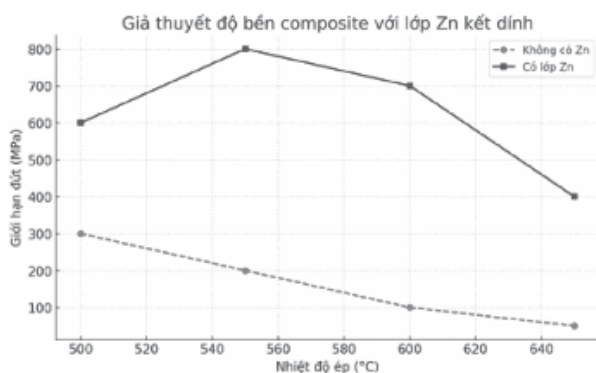
Hình 3. Giới hạn bền của các mẫu

Kết quả kiểm tra cơ tính cho thấy sự suy giảm đáng kể ở các mẫu composite có chứa sợi CF, nguyên nhân chủ yếu đến từ các yếu tố công nghệ trong quá trình ép nhiệt. Yếu tố đầu tiên là nhiệt độ ép. Khi nhiệt độ ép vượt quá 640°C, nhôm bắt đầu mất tính dẻo và trở nên mềm hóa, không còn khả năng bám dính tốt vào các lớp CF. Mặc dù sợi CF có khả năng chịu nhiệt rất tốt, nhưng bản thân nó không thể tạo ra liên kết luyện kim trực tiếp với nhôm ở nhiệt độ cao nếu không có lớp kết dính trung gian. Ngoài ra, nhiệt độ ép quá cao còn tạo điều kiện phát triển các vết nứt hoặc biến dạng không mong muốn, gây phá hủy cấu trúc composite.

Yếu tố thứ hai là thời gian ép. Thời gian ép dài có thể giúp CF “bám” tốt hơn ở mức độ nào đó, nhưng ở nhiệt độ quá cao, hiện tượng khuếch tán xảy ra, phá hủy cấu trúc vi mô của lớp nhôm, dẫn đến sự phân lớp hoặc rỗng do chênh lệch hệ số giãn nở nhiệt. Đồ thị 2 dưới đây thể hiện rõ sự suy giảm nhanh chóng của giới hạn đứt khi nhiệt độ ép tăng lên. Từ 600°C trở lên, giới hạn đứt giảm đáng kể và đặc biệt giảm mạnh trên 640°C, khẳng định nhôm bắt đầu mất tính dẻo và dễ bị nứt gãy.

Bên cạnh đó, cấu trúc lớp composite cũng đóng vai trò quan trọng. Các mẫu có quá nhiều lớp CF (như mẫu 6 và 8) cho thấy độ

bền suy giảm mạnh vì không còn đủ “lực dính” giữa các lớp. Trong khi đó, mẫu nhôm nguyên khối (mẫu 1) và mẫu 2 (ít lớp CF, có lớp kết dính tạm ổn) vẫn giữ được khả năng chịu lực tương đối tốt.



Hình 4. So sánh ảnh hưởng của độ bền với các loại vật liệu khác nhau

Nhằm khắc phục nhược điểm về sự kết dính giữa các lớp composite, nhóm nghiên cứu đã đề xuất một hướng tiếp cận mới: sử dụng kẽm (Zn) làm lớp kết dính trung gian. Kẽm có nhiệt độ nóng chảy thấp (khoảng 419°C), nên khi ép ở nhiệt độ dưới 600°C, lớp kẽm sẽ chảy ra và len lỏi vào các khe hở giữa nhôm và CF, tạo ra liên kết luyện kim bền chắc. Điều này không chỉ giúp tránh được tình trạng phá hủy cấu trúc composite do nhiệt độ cao mà còn cải thiện đáng kể độ bền kéo.

Bên cạnh đó, kẽm có khả năng tạo liên kết luyện kim với nhôm, hình thành hợp kim eutectic Zn-Al, từ đó cải thiện độ bền liên kết của composite. Lớp Zn còn giúp giảm ứng suất tập trung tại các biên lớp, hạn chế sự khởi phát của vết nứt. Đặc biệt, Zn như một “chất keo” luyện kim, giúp gắn kết các lớp nhôm và CF tốt hơn, giảm hiện tượng phân lớp và tách lớp khi chịu tải kéo. Đồ thị 3 dưới đây minh họa giả thiết rằng khi có lớp Zn, độ bền kéo của composite sẽ tăng đáng kể, với nhiệt độ ép tối ưu khoảng 550-600°C.

5. KẾT LUẬN

Thực nghiệm chế tạo vật liệu composite nhôm – sợi carbon bằng phương pháp ép nhiệt cho thấy:

- Nhiệt độ và cấu trúc lớp ảnh hưởng lớn đến cơ tính của vật liệu.
- Liên kết giữa nhôm và CF hiện tại chưa đủ bền, một phần do thiếu lớp trung gian.
- Việc tối ưu nhiệt độ và thêm vật liệu kết dính như kẽm là hướng khả thi để nâng cao chất lượng vật liệu.

Nghiên cứu mở ra tiềm năng phát triển vật liệu composite mới có ứng dụng trong công nghiệp nhẹ, hàng không 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: Trần Nhật Quang, Hồ Xuân Thành, Nguyễn Hà, Lê Thanh Tùng

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: SV2025-366.❖

Ngày nhận bài: 08/4/2025

Ngày phản biện: 22/4/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Deveci, S., Antony, N., & Eryigit, B. (2018), “Effect of carbon black distribution on the properties of polyethylene pipes - Part 1: Degradation of post yield mechanical properties and fracture surface analyses”. *Polymer Degradation and Stability*, 148, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2018.01.005>
- [2]. Huang, H. (2000), “Structure development and property changes in high density polyethylene during pan-milling”. *Journal of Applied Polymer Science*, 78(11), 2016-2024. [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20001209\)78:11<2016::AID-APP230>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20001209)78:11<2016::AID-APP230>3.0.CO;2-6)
- [3]. Vijendra, B., & Sharma, A. (2015), “Induction heated tool assisted friction-stir welding (I-FSW): A novel hybrid process for joining of thermoplastics”. *Journal of Manufacturing Processes*, 20, 234-244. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.07.005>
- [4]. Banjare, P., Sahlot, P., & Arora, A. (2017), “An assisted heating tool design for FSW of thermoplastics”. *Journal of Materials Processing Technology*, 239, 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.08.015>
- [5]. Nath, R., Maji, P., & Barma, J. D. (2019), “Development of a self-heated friction stir welding tool for welding of polypropylene sheets”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41(12), Article 553. <https://doi.org/10.1007/s40430-019-2059-2>
- [6]. Almond, J., Sugumaar, P., Wenzel, M. N., Hill, G., & Wallis, C. (2020), “Determination of the carbonyl index of polyethylene and polypropylene using specified area under band methodology with ATR-FTIR spectroscopy”. *e-Polymers*, 20(1), 369-381. <https://doi.org/10.1515/epoly-2020-0041>
- [7]. Zhang, J., Shen, Y., Li, B., Xu, H., Yao, X., Kuang, B., & et al. (2014), “Numerical simulation and experimental investigation on friction stir welding of 6061-T6 aluminum alloy”. *Materials & Design*, 60, 94-101. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.03.023>
- [8]. Sujuan, Y., & Xingrong, Z. (2014), “Tribological properties of PTFE and PTFE composites at different temperatures”. *Tribology Transactions*, 57(3), 382-386. <https://doi.org/10.1080/10402004.2013.873803>
- [9]. Eslami, S., Miranda, J., Mourão, L., Tavares, P. J., & Moreira, P. M. G. P. (2018), “Polyethylene friction stir welding parameter optimization and temperature characterization”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(1-4), 127-136. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2478-8>
- [10]. Deveci, S., Kaliappan, S. K., Fawaz, J., Gadgoli, U., & Das, B. (2018), “Sensitivity of post yield axial deformation properties of high-density ethylene/α-olefin copolymers in relation to molecular structure and slow crack growth resistance”. *Polymer Testing*, 72, 285-297. <https://doi.org/10.1016/j.polymeresting.2018.10.027>