

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO CÁC MẪU THỬ ĐỘ BỀN UỐN DẠNG TẤM BẰNG PHƯƠNG PHÁP IN 3D KIM LOẠI KHÔNG BÙ VẬT LIỆU

RESEARCH ON THE FABRICATION OF PLATE-SHAPED BENDING STRENGTH TEST SAMPLES USING NON-COMPENSATIVE METAL 3D PRINTING

Lê Đình Nguyên Huy, Phan Thanh Nhân, Lê Thanh Tùng, Nguyễn Hà*

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

Email: 21143030@student.hcmute.edu.vn; nhanpt@hcmute.edu.vn;

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

TÓM TẮT

Nghiên cứu này tập trung vào việc chế tạo các mẫu thử độ bền uốn dạng tấm bằng phương pháp in 3D kim loại không bù vật liệu, một kỹ thuật tiên tiến cho phép sản xuất các chi tiết kim loại phức tạp mà không cần gia công bổ sung sau in. Mục tiêu chính là đánh giá tác động của các thông số quy trình in 3D đến đặc tính cơ học, đặc biệt là độ bền uốn của vật liệu. Các mẫu thử được thiết kế theo tiêu chuẩn công nghiệp, chế tạo bằng công nghệ in 3D phù hợp, và kiểm tra cơ lý tính thông qua phương pháp uốn ba điểm. Kết quả thí nghiệm cho thấy mối tương quan rõ rệt giữa các thông số in, bao gồm hướng lớp, tốc độ in, nhiệt độ, và khả năng chịu uốn của sản phẩm. Dựa trên phân tích dữ liệu, nghiên cứu đề xuất các giải pháp tối ưu hóa quy trình in nhằm nâng cao chất lượng, độ bền cơ học và tính ổn định của sản phẩm. Những phát hiện này đóng góp quan trọng vào việc hoàn thiện công nghệ in 3D kim loại, thúc đẩy ứng dụng trong các ngành công nghiệp đòi hỏi độ chính xác và hiệu suất cao.

Từ khóa: In 3D kim loại; Không bù vật liệu; Mẫu thử độ bền uốn; Dạng tấm; Cơ tính vật liệu; Thông số in (hướng lớp, tốc độ in, nhiệt độ...); Kiểm tra uốn ba điểm.

ABSTRACT

This study focuses on the fabrication and evaluation of bending strength test specimens in the form of plates using non-compensated material metal 3D printing, an advanced technique enabling the production of complex metal components without requiring additional post-printing machining. The primary objective is to assess the impact of 3D printing process parameters on the mechanical properties, particularly the bending strength of the material. Test specimens were designed according to industry standards, fabricated using appropriate 3D printing technology, and subjected to mechanical property testing through the three-point bending method. Experimental results reveal a clear correlation between printing parameters, such as layer orientation, printing speed, and temperature, and the material's bending resistance. Based on the data analysis, the study proposes solutions to optimize the printing process to enhance the quality, mechanical strength, and stability of the products. These findings significantly contribute to refining metal 3D printing technology, promoting its application in industries requiring high precision and performance.

Keywords: Metal 3D printing; Non-compensated material; Bending strength test specimens; Flat/plate-shaped samples; Mechanical properties of materials; Printing parameters (layer orientation, printing speed, temperature, etc.); Three-point bending test. 

1. TỔNG QUAN

Công nghệ in 3D kim loại đã và đang trở thành một bước tiến quan trọng trong lĩnh vực sản xuất hiện đại, đặc biệt trong các ngành công nghiệp kỹ thuật cao như hàng không vũ trụ, ô tô, y tế và năng lượng [1]. So với các phương pháp gia công truyền thống như đúc, phay, tiện hoặc rèn, in 3D kim loại mang lại nhiều ưu điểm vượt trội, bao gồm khả năng chế tạo các chi tiết phức tạp, giảm thiểu lãng phí vật liệu và rút ngắn thời gian sản xuất [2]. Đặc biệt, công nghệ in 3D kim loại không bù vật liệu, chẳng hạn như các phương pháp dựa trên công nghệ Laser Powder Bed Fusion (LPBF) hoặc Directed Energy Deposition (DED), đã mở ra tiềm năng lớn trong việc tối ưu hóa quy trình sản xuất, giảm chi phí và nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên [3]. Trong bối cảnh đó, nghiên cứu chế tạo các mẫu thử độ bền uốn dạng tấm bằng công nghệ này đang thu hút sự chú ý của giới khoa học và công nghiệp, mặc dù vẫn còn nhiều thách thức cần được giải quyết.

Công nghệ in 3D kim loại là một dạng của sản xuất bồi đắp (Additive Manufacturing - AM), trong đó vật liệu kim loại được chế tạo từng lớp theo thiết kế số hóa [4]. Các phương pháp phổ biến bao gồm LPBF, DED và Binder Jetting, trong đó LPBF được sử dụng rộng rãi nhất nhờ khả năng tạo ra các chi tiết có độ chính xác cao và bề mặt hoàn thiện tốt [5]. Công nghệ này cho phép sản xuất các chi tiết với hình học phức tạp mà không cần khuôn mẫu, từ đó giảm chi phí và thời gian trong các giai đoạn thiết kế và sản xuất [6]. Hơn nữa, in 3D kim loại còn cho phép tích hợp các chức năng trong một chi tiết duy nhất, giảm số lượng linh kiện cần lắp ráp và cải thiện hiệu suất cơ học [7].

Trong các ứng dụng kỹ thuật, độ bền cơ học của các sản phẩm in 3D kim loại là một yếu

tổ quan trọng cần được đánh giá kỹ lưỡng. Các nghiên cứu gần đây cho thấy, các chi tiết được chế tạo bằng in 3D kim loại có thể đạt được các đặc tính cơ học tương đương hoặc thậm chí vượt trội so với các chi tiết được sản xuất bằng phương pháp truyền thống, nếu các thông số công nghệ được tối ưu hóa [8]. Tuy nhiên, các đặc điểm vi cấu trúc, như độ xốp, ứng suất dư và sự phân bố không đồng đều của vật liệu, có thể ảnh hưởng tiêu cực đến chất lượng sản phẩm và cần được kiểm soát chặt chẽ [9].

(*) Công nghệ in 3D kim loại không bù vật liệu

Công nghệ in 3D kim loại không bù vật liệu, hay còn gọi là in 3D không sử dụng vật liệu bổ sung (non-material addition), là một hướng đi mới nhằm giảm thiểu lượng vật liệu sử dụng trong quá trình sản xuất. Thay vì sử dụng vật liệu bổ sung như trong các phương pháp truyền thống (ví dụ: vật liệu bù trong đúc hoặc gia công cắt gọt), công nghệ này tập trung vào việc sử dụng chính xác lượng vật liệu cần thiết để xây dựng chi tiết, từ đó giảm thiểu lãng phí và chi phí [10]. Các kỹ thuật như LPBF và DED thường được áp dụng trong phương pháp này, trong đó bột kim loại hoặc dây kim loại được nung chảy bằng nguồn năng lượng cao (thường là laser hoặc chùm electron) và bồi đắp từng lớp để tạo thành sản phẩm [11].

Một trong những ưu điểm lớn của công nghệ in 3D không bù vật liệu là khả năng tối ưu hóa thiết kế, cho phép tạo ra các cấu trúc rỗng hoặc lưới (lattice structures) có trọng lượng nhẹ nhưng vẫn đảm bảo độ bền cơ học [12]. Ngoài ra, công nghệ này còn giúp rút ngắn chuỗi cung ứng, giảm sự phụ thuộc vào các quy trình sản xuất phức tạp và tăng tính linh hoạt trong sản xuất các lô hàng nhỏ hoặc sản phẩm tùy chỉnh [13]. Tuy nhiên, thách thức lớn nhất của phương pháp này nằm ở việc đảm bảo chất lượng bề

mặt, độ chính xác kích thước và các đặc tính cơ học của sản phẩm, đặc biệt khi áp dụng vào các mẫu thử độ bền uốn dạng tấm [14].

(*) Ứng dụng trong chế tạo mẫu thử độ bền uốn dạng tấm

Mẫu thử độ bền uốn dạng tấm là một loại mẫu thử quan trọng trong việc đánh giá các đặc tính cơ học của vật liệu, đặc biệt trong các ngành công nghiệp yêu cầu cao về độ bền và độ dẻo dai, như hàng không vũ trụ và ô tô [1]. Trong các phương pháp truyền thống, các mẫu thử này thường được chế tạo bằng cách gia công cơ khí hoặc đúc, đòi hỏi nhiều công đoạn và tiêu tốn vật liệu [2]. Việc ứng dụng công nghệ in 3D kim loại không bù vật liệu để chế tạo các mẫu thử dạng tấm mang lại nhiều lợi ích tiềm năng, bao gồm giảm chi phí, rút ngắn thời gian sản xuất và khả năng tùy chỉnh thiết kế mẫu thử [3].

Tuy nhiên, việc áp dụng công nghệ in 3D kim loại vào chế tạo mẫu thử độ bền uốn dạng tấm vẫn còn nhiều hạn chế. Các nghiên cứu chỉ ra rằng, các mẫu thử in 3D có thể xuất hiện các khuyết tật vi cấu trúc, như độ xốp hoặc ứng suất dư, làm giảm độ bền uốn so với các mẫu được gia công truyền thống [4]. Để khắc phục, cần tối ưu hóa các thông số in, bao gồm công suất laser, tốc độ quét, độ dày lớp và chiến lược quét [5]. Ngoài ra, việc kiểm soát nhiệt độ và môi trường in cũng đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo chất lượng sản phẩm [6].

(*) So sánh với phương pháp truyền thống

So với các phương pháp truyền thống như đúc hoặc gia công cơ khí, in 3D kim loại không bù vật liệu mang lại nhiều ưu điểm về hiệu quả kinh tế và tính linh hoạt. Các phương pháp truyền thống thường yêu cầu khuôn mẫu,

công cụ cắt gọt và nhiều công đoạn gia công bổ sung, dẫn đến chi phí cao và thời gian sản xuất kéo dài [7]. Trong khi đó, in 3D kim loại cho phép sản xuất trực tiếp từ mô hình số, loại bỏ nhu cầu về khuôn mẫu và giảm thiểu lãng phí vật liệu [8]. Tuy nhiên, chất lượng cơ học của các mẫu thử in 3D vẫn cần được so sánh kỹ lưỡng với các mẫu thử truyền thống để đảm bảo tính tương thích trong các ứng dụng thực tế [9].

Các nghiên cứu gần đây cho thấy, trong một số trường hợp, các mẫu thử độ bền uốn in 3D có thể đạt được độ bền tương đương với các mẫu gia công cơ khí, nhưng độ dẻo và khả năng chịu tải động có thể bị hạn chế do các khuyết tật vi cấu trúc [10]. Do đó, việc cải thiện quy trình in 3D và phát triển các phương pháp hậu xử lý, như xử lý nhiệt hoặc gia công bề mặt, là cần thiết để nâng cao chất lượng sản phẩm [11].

(*) Thách thức và định hướng nghiên cứu

Mặc dù công nghệ in 3D kim loại không bù vật liệu mang lại nhiều lợi ích, nhưng vẫn tồn tại một số thách thức cần được giải quyết. Thứ nhất, việc kiểm soát vi cấu trúc và khuyết tật trong quá trình in là một vấn đề phức tạp, đòi hỏi các nghiên cứu sâu hơn về tối ưu hóa thông số công nghệ [12]. Thứ hai, chi phí đầu tư ban đầu cho các hệ thống in 3D kim loại vẫn còn cao, hạn chế khả năng áp dụng rộng rãi trong các doanh nghiệp vừa và nhỏ [13]. Thứ ba, việc thiếu các tiêu chuẩn hóa trong sản xuất và kiểm tra chất lượng sản phẩm in 3D cũng là một rào cản lớn [14].

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Nguyên lý hoạt động của in 3D kim loại bằng phương pháp hàn TIG dựa trên việc sử dụng hồ quang điện giữa điện cực không nóng chảy và bề mặt vật liệu nền, dưới môi trường

khí trơ (thường là Argon) để nung chảy bên trong thanh kim loại, từ đó vật liệu lên nhau theo biên dạng định sẵn. Quá trình này thường được điều khiển bằng cánh tay robot hoặc hệ thống CNC nhằm đảm bảo độ chính xác và ổn định của đường hàn. So với các phương pháp in 3D kim loại sử dụng laser, in 3D bằng hàn TIG có ưu điểm là chi phí đầu tư thấp, sử dụng vật liệu hàn phổ biến, và tốc độ nóng chảy và liên kết cao, đặc biệt phù hợp với các chi tiết kích thước lớn và hình học đơn giản. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn còn tồn tại những hạn chế như độ chính xác hình học chưa cao, bề mặt thô, dễ phát sinh ứng suất dư và biến dạng nhiệt. Các thông số công nghệ như dòng hàn, tốc độ cấp dây, tốc độ di chuyển đầu hàn và loại khí bảo vệ có ảnh hưởng lớn đến chất lượng lớp đắp, đòi hỏi phải được tối ưu hóa phù hợp với từng loại vật liệu và mục đích sử dụng.

3. CÁC BƯỚC THỰC NGHIỆM

Bước 1. Chuẩn bị thiết bị và vật liệu

- Chuẩn bị các phôi theo kích thước tiêu chuẩn: $255 \times 4 \times 4$; $255 \times 5 \times 5$; ... đến $255 \times 8 \times 8$ mm.
- Làm sạch bề mặt tiếp xúc của phôi để tránh nhiễm bẩn ảnh hưởng đến quá trình hàn.
- Chuẩn bị máy hàn WAAM 3 trục, nguồn điện, hệ thống khí bảo vệ (Argon), dây tiếp mát (mass), và đầu hàn TIG.

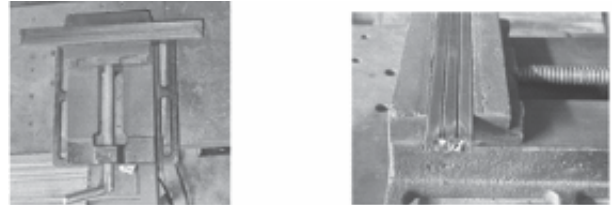


Hình 1. Chuẩn bị thiết bị và vật liệu

Bước 2. Cố định và gá phôi

– Gá phôi lên ê-tô để cố định chắc chắn, đảm bảo không dịch chuyển trong quá trình hàn.

– Hàn chấp nhẹ hai đầu phôi để giữ ổn định vị trí ban đầu.



Hình 2. Cố định và gá phôi

Bước 3. Lập trình và nhập thông số cho máy WAAM

- Gá đầu hàn TIG lên hệ thống đầu chuyển động.
- Nhập mã lệnh điều khiển (G-code) và thông số hàn từ bảng thiết kế Taguchi vào chế độ tự động (Auto Mode) của máy WAAM.
- Các thông số bao gồm: Dòng điện (A), tốc độ di chuyển súng hàn (F), khoảng hở đầu hàn (Denta), và bề dày phôi cần hàn (t).

Bước 4. Căn chỉnh tọa độ và chạy code

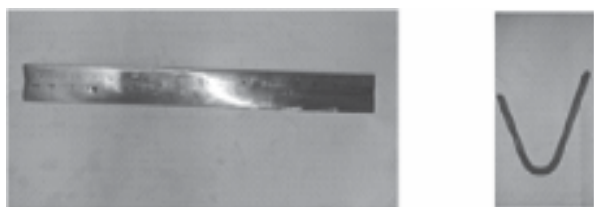
- Đặt tọa độ gốc cho máy trong chế độ thủ công (Manual Mode).
- Kẹp mass vào vị trí thích hợp để đảm bảo mạch điện kín.
- Khởi động quá trình hàn tự động theo chương trình đã cài đặt.



Hình 3. Căn chỉnh tọa độ và chạy code

Bước 5. Sau khi hàn – xử lý mẫu

- Mẫu được đem đi gia công đánh bóng bề mặt để loại bỏ lớp oxi hóa và khuyết tật bề mặt.
- Sau đó, mẫu được đưa đi kiểm tra cơ tính qua thử nghiệm uốn.



Hình 4. Sau khi hàn – xử lý mẫu

Bước 6. Ghi nhận dữ liệu và xử lý số liệu

- Ghi lại kết quả uốn, độ cong, vị trí nứt gãy (nếu có).
- Tiến hành phân tích ảnh hưởng của các thông số hàn lên độ bền uốn.

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bảng 1 cung cấp dữ liệu thực nghiệm theo ma trận Taguchi L25 (5^4), nghĩa là ma trận này khảo sát 4 yếu tố (A, F, Δ , h) với mỗi yếu tố có 5 mức giá trị khác nhau, dẫn đến 25 tổ hợp thí nghiệm. Các yếu tố và mức giá trị được liệt kê như sau:

- A (Dòng điện hàn, Ampe): 135, 140, 145, 150, 155.
- F (Tốc độ dịch chuyển đầu hàn, mm/s hoặc mm/min): 13.50, 15.75, 18.00, 20.25, 22.50.
- Δ (Khoảng cách đầu hàn với bề mặt, mm): 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00.
- h (Bề dày phôi cần hàn, mm): 4, 5, 6, 7, 8.

Mỗi hàng trong bảng đại diện cho một tổ hợp thông số được thử nghiệm, và các tổ hợp

này được thiết kế theo ma trận trực giao L25 để đảm bảo rằng các yếu tố được khảo sát một cách cân bằng, giảm thiểu số lượng thí nghiệm mà vẫn thu thập được thông tin đầy đủ về ảnh hưởng của các yếu tố đến kết quả đầu ra (độ bền uốn).

Ý nghĩa của các yếu tố:

- Dòng điện hàn (A): Ảnh hưởng trực tiếp đến năng lượng cung cấp cho quá trình hàn, từ đó tác động đến nhiệt độ, độ nóng chảy của vật liệu, và chất lượng mối hàn.
- Tốc độ dịch chuyển đầu hàn (F): Quyết định thời gian tương tác giữa nguồn nhiệt và vật liệu, ảnh hưởng đến độ đồng đều của lớp vật liệu bồi đắp và hình dạng phôi.
- Khoảng cách đầu hàn (Δ): Liên quan đến độ ổn định của hồ quang hàn và sự phân bố nhiệt, có thể gây ra các khuyết tật nếu không được điều chỉnh phù hợp.
- Bề dày phôi (h): Ảnh hưởng đến khả năng chịu tải và độ bền uốn của mẫu thử, đồng thời tác động đến chiến lược in (số lớp bồi đắp, thời gian in).

(*) Phương pháp Taguchi và vai trò trong nghiên cứu

Phương pháp Taguchi là một công cụ thống kê mạnh mẽ, được sử dụng để tối ưu hóa các quy trình kỹ thuật bằng cách xác định tổ hợp thông số tốt nhất với số lượng thí nghiệm tối thiểu. Trong nghiên cứu này, phương pháp Taguchi được áp dụng thông qua ma trận trực giao L25, cho phép khảo sát đồng thời 4 yếu tố ở 5 mức giá trị mà chỉ cần thực hiện 25 thí nghiệm thay vì 625 (5^4) thí nghiệm nếu sử dụng phương pháp toàn diện (full factorial design).

Các đặc điểm chính của phương pháp Taguchi:



- Ma trận trực giao: Đảm bảo rằng mỗi mức của một yếu tố được kết hợp đều đặn với các mức của các yếu tố khác, giúp phân tích độc lập ảnh hưởng của từng yếu tố.

- Tối ưu hóa và giảm nhiễu: Phương pháp Taguchi không chỉ tìm tổ hợp thông số tối ưu mà còn giảm thiểu ảnh hưởng của các yếu tố nhiễu (như biến động nhiệt độ môi trường, độ ẩm, hoặc sai lệch thiết bị).

- Hiệu quả kinh tế: Giảm số lượng thí nghiệm, từ đó tiết kiệm thời gian, chi phí vật liệu, và nguồn lực.

Trong nghiên cứu, mục tiêu chính là tối ưu hóa độ bền uốn của các mẫu thử dạng tấm. Điều này đòi hỏi phân tích dữ liệu từ các thí nghiệm để xác định yếu tố nào (A, F, Δ , h) có ảnh hưởng lớn nhất và mức giá trị nào của các yếu tố này mang lại kết quả tốt nhất.

Bảng 1. Bảng thông số Taguchi kết quả của quá trình thực nghiệm

STT	A	F	Δ	h
1	135	13.50	1.00	4
2	135	15.75	1.25	5
3	135	18.00	1.50	6
4	135	20.25	1.75	7
5	135	22.50	2.00	8
6	140	13.50	1.25	6
7	140	15.75	1.50	7
8	140	18.00	1.75	8
9	140	20.25	2.00	4
10	140	22.50	1.00	5
11	145	13.50	1.50	8
12	145	15.75	1.75	4
13	145	18.00	2.00	5
14	145	20.25	1.00	6
15	145	22.50	1.25	7
16	150	13.50	1.75	5
17	150	15.75	2.00	6

18	150	18.00	1.00	7
19	150	20.25	1.25	8
20	150	22.50	1.75	4
21	155	13.50	2.00	7
22	155	15.75	1.00	8
23	155	18.00	1.25	4
24	155	20.25	1.50	5
25	155	22.50	1.75	6

(*) Phân tích dữ liệu từ bảng thông số

Dựa trên Bảng 1, có thể thực hiện phân tích sơ bộ về sự phân bố các yếu tố và mức giá trị:

(*) Phân bố các mức giá trị

Mỗi yếu tố (A, F, Δ , h) xuất hiện ở mỗi mức giá trị 5 lần trong 25 thí nghiệm, điều này phù hợp với tính chất cân bằng của ma trận L25. Ví dụ:

- Dòng điện hàn (A) = 135 Ampe xuất hiện ở các thí nghiệm 1, 2, 3, 4, 5.

- Tốc độ dịch chuyển (F) = 13.50 mm/s xuất hiện ở các thí nghiệm 1, 6, 11, 16, 21.

Sự phân bố này đảm bảo rằng ảnh hưởng của từng yếu tố được đánh giá công bằng, không bị thiên lệch bởi các yếu tố khác.

(*) Xu hướng của các yếu tố

Mặc dù bảng không cung cấp kết quả độ bền uốn cụ thể, ta có thể suy ra một số xu hướng dựa trên các yếu tố và giá trị:

- Dòng điện hàn (A): Các mức cao hơn (150, 155 Ampe) có thể cung cấp năng lượng lớn hơn, dẫn đến mối hàn chắc hơn, nhưng cũng có nguy cơ gây quá nhiệt hoặc khuyết tật nếu không được kiểm soát.

- Tốc độ dịch chuyển (F): Tốc độ cao (20.25, 22.50 mm/s) có thể làm giảm thời gian tương tác nhiệt, dẫn đến lớp bồi đắp mỏng hơn hoặc không đồng đều, trong khi tốc độ thấp (13.50, 15.75 mm/s) có thể cải thiện độ đồng đều nhưng kéo dài thời gian in.

- Khoảng cách đầu hàn (Δ): Khoảng cách nhỏ (1.00, 1.25 mm) có thể tăng độ chính xác của hồ quang, nhưng quá nhỏ có thể gây ra hiện tượng bắn tóe hoặc cháy vật liệu. Khoảng cách lớn (1.75, 2.00 mm) có thể làm giảm độ ổn định của hồ quang.

- Bề dày phôi (h): Phôi dày hơn (7, 8 mm) có thể tăng độ bền uốn do khối lượng vật liệu lớn hơn, nhưng yêu cầu năng lượng và thời gian in lớn hơn.

(*) Phân tích tương tác

Phương pháp Taguchi cũng cho phép phân tích tương tác giữa các yếu tố (ví dụ: A và F, hoặc F và Δ). Tuy nhiên, với ma trận L25, tương tác thường không được đánh giá chi tiết trừ khi có thiết kế bổ sung. Trong trường hợp này, cần sử dụng các công cụ thống kê (như ANOVA - Analysis of Variance) để xác định yếu tố nào có ảnh hưởng thống kê đáng kể đến độ bền uốn.

(*) Ý nghĩa khoa học và ứng dụng thực tiễn

Nghiên cứu này có ý nghĩa quan trọng trong lĩnh vực in 3D kim loại, đặc biệt với công nghệ WAAM sử dụng hàn TIG không dây bù vật liệu:

(+) Đóng góp khoa học:

- Tối ưu hóa quy trình: Việc áp dụng phương pháp Taguchi giúp xác định tổ hợp thông số tối ưu, từ đó cải thiện chất lượng mẫu thử độ bền uốn (độ bền, hình học ổn định, ít

khuyết tật).

- Hiểu biết về yếu tố ảnh hưởng: Kết quả nghiên cứu sẽ làm rõ vai trò của từng yếu tố (A, F, Δ , h) và mức độ ảnh hưởng của chúng đến chất lượng sản phẩm in 3D.

- Tiết kiệm tài nguyên: Sử dụng ma trận Taguchi giảm đáng kể số lượng thí nghiệm, phù hợp với các nghiên cứu có chi phí cao như in 3D kim loại.

(+) Ứng dụng thực tiễn:

- Sản xuất công nghiệp: Kết quả nghiên cứu có thể được áp dụng để sản xuất các chi tiết dạng tấm trong các ngành như hàng không vũ trụ, ô tô, hoặc năng lượng, nơi yêu cầu cao về độ bền uốn.

- Giảm chi phí: Công nghệ WAAM không dây bù vật liệu kết hợp với thông số tối ưu giúp giảm lãng phí vật liệu và thời gian sản xuất.

- Tùy chỉnh sản phẩm: Khả năng điều chỉnh thông số theo phương pháp Taguchi cho phép sản xuất các mẫu thử hoặc sản phẩm tùy chỉnh với đặc tính cơ học mong muốn.

Trong nghiên cứu này, phương pháp thiết kế thí nghiệm Taguchi được áp dụng để tối ưu hóa các thông số đầu vào của quá trình in 3D kim loại sử dụng máy WAAM 3 trục với công nghệ hàn TIG không dây bù vật liệu.

Phương pháp Taguchi là một kỹ thuật thiết kế thí nghiệm do giáo sư Genichi Taguchi phát triển nhằm tìm ra tổ hợp thông số tối ưu cho một quá trình kỹ thuật, đồng thời giảm thiểu ảnh hưởng của các yếu tố nhiễu (noise) từ môi trường bên ngoài. Thông qua việc sử dụng ma trận trực giao (Orthogonal Array – OA), phương pháp này cho phép thực hiện số lượng thí nghiệm tối thiểu nhưng vẫn đảm bảo độ tin cậy cao trong phân tích.



Trong quá trình in 3D tấm hợp kim bằng máy WAAM 3 trục, các yếu tố đầu vào như: dòng điện hàn (A), tốc độ dịch chuyển đầu hàn (F), khoảng cách đầu hàn với bề mặt (Δ), và bề dày phôi cần hàn (t) được xem là các yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng bề mặt, độ bền cơ học, và hình dạng cuối cùng của vật in.

Để tránh việc thử tất cả các tổ hợp thông số (gây tốn kém thời gian và vật liệu), ma trận Taguchi được lựa chọn nhằm tổ chức các thí nghiệm có tính đại diện. Mỗi tổ hợp thông số được đưa vào chế độ Auto của máy WAAM và kiểm nghiệm thông qua thử nghiệm uốn sau khi in xong.

Trong khuôn khổ nghiên cứu, nhóm thực hiện đã xây dựng một ma trận thí nghiệm theo phương pháp Taguchi L25 (5^4) nhằm khảo sát ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ đến độ bền uốn của sản phẩm in 3D kim loại dạng tấm sử dụng máy WAAM 3 trục – hàn TIG không dây.

Mục tiêu chính là xác định tổ hợp thông số tối ưu gồm:

- A – Dòng điện hàn (Ampe);
- F – Tốc độ dịch chuyển đầu hàn (mm/s hoặc mm/min);
- Δ – Khoảng hở đầu hàn (mm);
- h – Bề dày phôi cần hàn $\rightarrow$ nhằm tạo ra mẫu vật có độ bền uốn cao nhất, hình học ổn định, ít khuyết tật.

5. KẾT LUẬN

Đề tài “Nghiên cứu chế tạo các mẫu thử độ bền uốn dạng tấm bằng phương pháp in 3D kim loại không bù vật liệu” đã tiến hành xây dựng quy trình thực nghiệm dựa trên công nghệ

Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) sử dụng hàn TIG không dây, kết hợp với phương pháp thiết kế thí nghiệm Taguchi. Thông qua việc triển khai 25 tổ hợp thí nghiệm L25 (5^4) với các biến đầu vào bao gồm dòng điện hàn, tốc độ dịch chuyển, khoảng hở đầu súng hàn và bề dày mẫu, nhóm nghiên cứu đã: Hoàn thiện quy trình in tấm thử dạng phẳng ổn định. Phát hiện và xử lý các lỗi phổ biến trong quá trình WAAM như biến dạng phôi, rỗ khí và sai lệch lớp in. Thiết lập được nền tảng dữ liệu cho giai đoạn đo đạc và phân tích cơ tính. Mặc dù dữ liệu từ phép thử uốn ba điểm (Three-Point Bending Test) chưa được thực hiện do điều kiện thiết bị chưa hoàn tất, quá trình thực nghiệm và thiết kế thông số đã tuân thủ đúng nguyên tắc tối ưu hóa, đảm bảo khả năng tái lập và so sánh kết quả trong giai đoạn phân tích tiếp theo. Từ các nghiên cứu tương tự trên thế giới, đặc biệt là công trình của Cheng et al. (2023) về tối ưu hóa thông số WAAM bằng Taguchi-GRA, có thể dự đoán rằng: Tốc độ dịch chuyển đầu hàn và khoảng hở đầu hàn là những yếu tố có ảnh hưởng mạnh đến cơ tính. Mức dòng điện vừa phải (135-145A) có khả năng tạo ra đường hàn ổn định và ít rỗ khí hơn. Kết luận, đề tài đã thành công trong việc xây dựng nền móng thực nghiệm vững chắc để triển khai thử nghiệm uốn và phân tích cơ học trong giai đoạn tiếp theo.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Trần Thái Sơn;
- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Lê Đình Nguyên Huy, Phan Thanh Nhân, Lê Thanh Tùng, Nguyễn Hà.
- Tác giả liên hệ: Nguyễn Hà.

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: SV2025-355.❖

Ngày nhận bài: **06/5/2025**

Ngày phản biện: **16/5/2025**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Aguirre, T. G., Fuller, L., Ingrole, A., Seek, T. W., Wheatley, B. B., Steineman, B. D., Haut Donahue, T. L., & Donahue, S. W. (2020), “Bioinspired material architectures from bighorn sheep horncore velar bone for impact loading applications”. *Scientific Reports*, 10, 18916. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76021-5>
- [2]. Boydston, A. (2020), “Andrew Boydston answers questions about additive manufacturing”. *Nature Communications*, 11, 3992. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17722-3>
- [3]. DebRoy, T., Mukherjee, T., Wei, H. L., & Elmer, J. W. (2021), “Metallurgy mechanistic models and machine learning in metal printing”. *Nature Reviews Materials*, 6, 48-68. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-00236-1>
- [4]. Du, X., Dehghani, M., Alsaadi, N., Nejad, M. G., Saber-Samandari, S., Toghraie, D., Su, C.-H., & Nguyen, H. C. (2022), “A femoral shape porous scaffold bio-nanocomposite fabricated using 3D printing and freeze-drying technique for orthopedic application”. *Materials Chemistry and Physics*, 275, 125302. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125302>
- [5]. Ghanem, M. A., Basu, A., Behrou, R., Boechler, N., Boydston, A. J., Craig, S. L., Lin, Y., Lynde, B. E., Nelson, A., Shen, H., & Storti, D. W. (2021), “The role of polymer mechanochemistry in responsive materials and additive manufacturing”. *Nature Reviews Materials*, 6, 84-98. <https://doi.org/10.1038/s41578-020-00249-w>
- [6]. He, J., Zhu, S., Luo, C., Niu, X., & Wang, Q. (2022), “Size effect in fatigue modelling of defective materials: Application of the calibrated weakest-link theory”. *International Journal of Fatigue*, 165, 107213. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.107213>
- [7]. Karimi, M., Asefnejad, A., Aflaki, D., Surendar, A., Baharifar, H., Saber-Samandari, S., Khandan, A., Khan, A., & Toghraie, D. (2021), “Fabrication of shapeless scaffolds reinforced with baghdadite-magnetite nanoparticles using a 3D printer and freeze-drying technique”. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 3070-3079. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.08.084>
- [8]. Khan, S. B., Irfan, S., Lam, S. S., Sun, X., & Chen, S. (2022), “3D printed nanofiltration membrane technology for waste water distillation”. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 102958. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102958>
- [9]. Liao, D., Zhu, S., Keshtegar, B., Qian, G., & Wang, Q. (2020), “Probabilistic framework for fatigue life assessment of notched components under size effects”. *International Journal of Mechanical Sciences*, 181, 105685. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105685>
- [10]. Moarrefzadeh, A., Morovvati, M. R., Angili, S. N., Smaism, G. F., Khandan, A., & Toghraie, D. (2023), “Fabrication and finite element simulation of 3D printed poly L-lactic acid scaffolds coated with alginate/carbon nanotubes for bone engineering applications”. *International Journal of Biological Macromolecules*, 224, 1496-1508. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.238>
- [11]. Niu, X., Zhu, S., He, J., Liao, D., Correia, J. A. F. O., Berto, F., & Wang, Q. (2022), “Defect tolerant fatigue assessment of AM materials: Size effect and probabilistic prospects”. *International Journal of Fatigue*, 160, 106884. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106884>
- [12]. Ren, W., & Mazumder, J. (2020), “In-situ porosity recognition for laser additive manufacturing of 7075-Al alloy using plasma emission spectroscopy”. *Scientific Reports*, 10, 19493. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75131-4>
- [13]. Yang, J., Cheng, Y., Gong, X., Yi, S., Li, C.-W., Jiang, L., & Yi, C. (2022), “An integrative review on the applications of 3D printing in the field of in vitro diagnostics”. *Chinese Chemical Letters*, 33(5), 2231-2242. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2021.08.105>
- [14]. Zhang, A., Wang, F., Chen, L., Wei, X., Xue, M., Yang, F., & Jiang, S. (2021), “3D printing hydrogels for actuators: A review”. *Chinese Chemical Letters*, 32(10), 2923-2932. <https://doi.org/10.1016/j.ccllet.2021.03.073>