

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG CÔNG NGHỆ CAD/CAE ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG SẢN PHẨM IN 3D KIM LOẠI

RESEARCH ON THE APPLICATION OF CAD/CAE TECHNOLOGY TO EVALUATE THE QUALITY OF 3D PRINTED METAL PRODUCTS

NGUYỄN HOÀNG DUY^{1,a}, CAO ĐĂNG LONG¹, NGUYỄN VĂN CƯỜNG², LÊ HOÀNG ANH¹

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vĩnh Long

²Trường Đại học Giao thông Vận tải

^aTác giả liên hệ: duyinh@vlute.edu.vn

Nhận bài(Received): 12/8/2024; Phản biện (Reviewed):05/9/2024; Chấp nhận (Accepted):10/9/2024

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu ứng dụng công nghệ CAD/CAE trong đánh giá chất lượng sản phẩm in 3D kim loại sản xuất bằng công nghệ ép đùn vật liệu (Material Extrusion – ME) thông qua việc chế tạo thử nghiệm các mẫu thử kéo được in theo ba hướng khác nhau: phẳng, cạnh, thẳng đứng. Sử dụng vật liệu thép không gỉ 17-4 PH, công nghệ đo không tiếp xúc để quét mẫu, kết quả đo được so sánh và đánh giá dựa trên tham chiếu bản CAD của bản thiết kế. Kết quả thực nghiệm cho thấy máy in 3D kim loại Markforged đạt độ chính xác cao (98,1%) so với kích thước danh nghĩa. Tuy nhiên, độ chính xác kém nhất ở các mẫu in cạnh do biến dạng trong quá trình thêu kết với diện tích tiếp xúc nền thấp. Hướng in có ảnh hưởng lớn đến hình dạng sản phẩm, các mẫu in theo hướng thẳng đứng bị vỡ vụn, do không đảm bảo cơ cấu hỗ trợ. Hướng in cũng tác động đáng kể đến chất lượng bề mặt và sai lệch hình học, với sai lệch lớn nhất là độ phẳng. Do đó, thiết kế in nên tối ưu diện tích tiếp xúc giữa lớp đầu và lớp cuối cùng để giảm thiểu sai lệch.

Từ khóa: In 3D kim loại, sản xuất bồi đắp, in đùn vật liệu, thép không gỉ 17-4 PH, đo không tiếp xúc

ABSTRACT

This paper presents the application of CAD/CAE technology in evaluating the quality of metal 3D printed products manufactured using Material Extrusion (ME) technology through the experimental fabrication of tensile test specimens printed in three different orientations: flat, edge, and upright. Using 17-4 PH stainless steel material and non-contact measurement technology to scan the samples, the measured results were compared and evaluated based on the CAD reference of the design. Experimental results show that the Markforged metal 3D printer achieves high accuracy (98.1%) compared to nominal dimensions. However, the lowest accuracy is observed in edge-printed samples due to deformation during sintering with low bed contact area. Printing orientation significantly affects product shape; upright printed samples deform due to inadequate support. Printing orientation also has a substantial impact on surface quality and geometric deviations, with the greatest deviation observed in flatness. Therefore, print design should optimize the contact area between the first and last layers to minimize deviations.

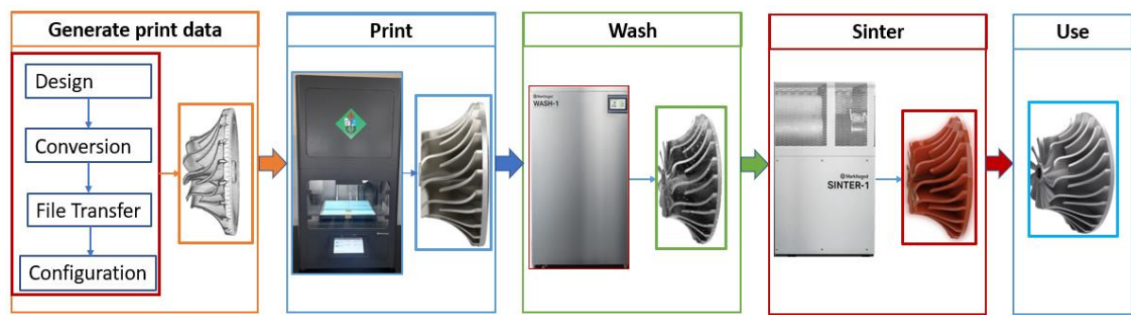
Keywords: Metal 3D Printing, Additive Manufacturing, Material Extrusion Printing, 17-4 PH Stainless Steel, Non-Contact Measurement

1. GIỚI THIỆU

Sản xuất bồi đắp (Additive Manufacturing – AM), hay còn gọi là in 3D, là một quy trình sản xuất cho phép tạo ra các sản phẩm bằng cách bồi đắp vật liệu từng lớp để tạo thành chi tiết từ mô hình số 3D [1-3]. Các tiêu chuẩn ASTM/ISO phân loại các công nghệ in 3D kim loại thành 7 nhóm khác nhau: Ép đùn vật liệu (Material Extrusion – ME), Phun vật liệu (Material Jetting – MJ), In chất liên kết (Binder Jetting – BJ), Quang hóa VAT, Nung chảy bột vật liệu (Powder Bed Fusion – PBF), Chiếu chùm tia năng lượng trực tiếp (Direct

Energy Deposition – DED), và dán lớp vật liệu (Sheet Object Lamination) (ASTM ISO/ASTM52900-15, 2015).

Công nghệ ME chiếm 10% thị trường in 3D kim loại vào năm 2020 [4]. Đặc điểm cơ bản của công nghệ in ME là việc ép đùn hỗn hợp vật liệu từng lớp qua đầu phun tạo thành sản phẩm. Khác với các quy trình in dựa trên bột kim loại, công nghệ ME ép đùn vật liệu dưới dạng sợi. Sợi này là vật liệu linh hoạt được chế tạo từ hỗn hợp bột kim loại và chất liên kết [5, 6]. Quá trình in 3D trong công nghệ ME trình bày trong hình 1.



Hình 1. Sơ đồ quá trình in của công nghệ in kim loại ME [14]

Máy in ME bao gồm hai cuộn dây, một cuộn vật liệu in và cuộn còn lại là vật liệu gồm dùng để in các lớp phân tách giữa sản phẩm và bàn máy hoặc giữa sản phẩm và các cấu trúc hỗ trợ. Trong quá trình in, đầu phun làm nóng vật liệu in vượt qua nhiệt độ nóng chảy của chất liên kết polymer, ép đùn vật liệu đã mềm lên bàn máy. Đầu phun di chuyển lên xuống dọc theo trục z, ép đùn từng lớp vật liệu. Đồng thời, bàn máy di chuyển theo hướng x-y, định hình hình dạng của sản phẩm.

Sự phát triển rộng rãi của công nghệ ép đùn vật liệu (ME) trong in 3D kim loại hiện đang gặp phải nhiều hạn chế khác nhau, một trong những vấn đề chính là chất lượng sản phẩm in. Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm in, trong đó có ảnh hưởng của độ co vật liệu và các

thông số in như hướng in, tốc độ in, độ dày lớp in và nhiều yếu tố khác [7, 8, 9]. Đặc tính co ngót của các vật liệu kim loại khi in bằng công nghệ ME là một vấn đề quan trọng trong quá trình in kim loại, các sản phẩm sau khi in phải có kích thước được tính toán để bù lại độ co ngót trong quá trình rửa và thiêu kết.

Độ chính xác của chi tiết máy là mức độ giống nhau về kích thước, hình dáng hình học, vị trí tương quan của chi tiết máy được sản xuất so với chi tiết thiết kế. Độ chính xác của máy in 3D là độ lệch giữa các bản in lặp lại [10,11]. Có một số nghiên cứu về độ chính xác của sản phẩm in [12, 13], nhưng số lượng còn hạn chế. Một số nghiên cứu đã khám phá tác động của vật liệu đến độ co ngót trong in kim loại. Trong nghiên cứu của Dang LC et al (2023) [14],

đã nghiên cứu ảnh hưởng của hướng in đến các tính chất cơ học vật liệu thép không gỉ 17-4 PH trong công nghệ ME, lưu ý rằng sự thay đổi cấu trúc đường in lớp bên trong cũng ảnh hưởng đến tốc độ co ngót và ảnh hưởng đến kích thước và cong vênh của sản phẩm. Độ chính xác trung bình chiều cao và chiều rộng với tất cả các hướng in lần lượt là 98,89% và 97,85% so với kích thước danh nghĩa. Caminero và cộng sự (2021) [15] đã quan sát thấy các mức độ co rút dị hướng khác nhau, từ 17,1% đến 20,9%, trên trục x và z, nhấn mạnh ảnh hưởng của hướng in, tốc độ in và chiều cao lớp. Họ phát hiện ra rằng các mẫu được in theo hướng thẳng đứng có sự biến đổi lớn về giá trị độ co so với các mẫu được in theo hướng cạnh hoặc theo hướng phẳng. Trong một nghiên cứu của Kurose et al (2020) [16], sử dụng vật liệu thép 316L, việc thay đổi hướng in đã dẫn đến hiện tượng dị hướng cơ học và co ngót trong các sản phẩm in ME khi in bằng vật liệu Steel 316L, với giá trị độ co ngót lên tới 15% dọc theo trục x-y và lên đến 17% dọc theo trục z. Tosto và cộng sự (2022) [17] đã nghiên cứu tác động của các thông số quá trình in đến đặc tính cơ học của thép Steel 316L bằng cách thay đổi chiều cao

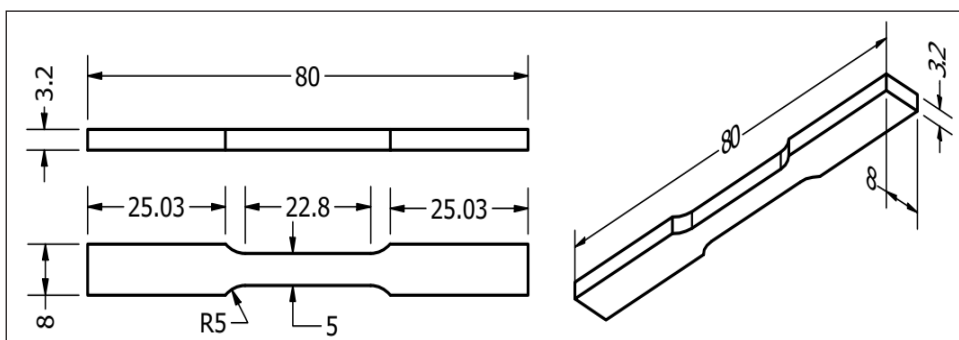
lớp, nhiệt độ đầu in và tốc độ in. Ngoài ra, Quarto và cộng sự [18] tập trung vào việc kiểm tra những thay đổi trong thông số in ảnh hưởng như thế nào đến hành vi co ngót của các chi tiết in từ Steel 316L, độ cao lớp khác nhau ở mức 0,1 và 0,4mm, tốc độ in ở 20mm/s và 50mm/s và nhiệt độ đầu in ở mức 170°C và 240°C, trong khi vẫn giữ mật độ điền đầy và nhiệt độ bàn in không đổi.

Nghiên cứu này ứng dụng công nghệ CAD/CAE đánh giá độ chính xác in 3D kim loại của sản phẩm được sản xuất bằng công nghệ ME. Các mẫu thử kéo được in theo ba hướng khác nhau: phẳng, cạnh, và thẳng đứng. Nghiên cứu sử dụng hệ thống in 3D của Markforged, vật liệu thép 17-4 PH được chọn để thử nghiệm. Sử dụng công nghệ đo không tiếp xúc để quét mẫu, kết quả đo được so sánh và đánh giá dựa trên tham chiếu bản CAD thiết kế.

2. NỘI DUNG

2.1. Thử nghiệm in trên máy MetalX của hãng Markforged

Mẫu in thử nghiệm là mẫu thử kéo có kích thước tiêu chuẩn Hình 2. Mỗi hướng sẽ in 5 mẫu.



Hình 2. Kích thước của mẫu in

Dữ liệu CAD của mẫu dưới định dạng .STL được quản lý trực tuyến bởi người dùng bằng trang web của hãng cung cấp, trên đó thiết lập các thông số của mẫu liên quan đến: vật liệu, kích thước mẫu, vị trí

đặt mẫu ở bàn in, ... Đồng thời kiểm soát được thời gian in, và chi phí sản xuất mẫu. Tất cả các chi tiết thử nghiệm đều được in trong cùng 1 một điều kiện và một chế độ in, được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Chế độ in

Vật liệu	Thép không gỉ 17-4PH
Chiều cao lớp in sau khi thiêu kết	0.125mm
Đơn vị góc	Mét
Tỉ lệ	0.4
Kiểu điền đầy	Điền đầy dạng hình tam giác
Số lớp nền và số lớp mặt (mái)	4
Số lớp tường (thành)	4

**Hình 3. Mẫu sau khi in**

Sau khi in giảm nhiệt độ mẫu từ 20

phút đến 30 phút. Mẫu in được ngâm trong dung môi Opteon SF97 tại buồng ngâm, dung môi sẽ được nung đến nhiệt độ sôi tại buồng sôi. Phần lớn chất kết dính sáp và polyme sẽ bị loại bỏ trong quá trình này bằng nhiệt độ. Mẫu được chuyển đến buồng sấy sau khi quá trình rửa hoàn tất, thời gian rửa và sấy mẫu sẽ phụ thuộc vào hình dạng, kích thước và vật liệu được sử dụng. Quá trình sấy đảm bảo rằng mẫu khô ráo hoàn toàn, không còn dung môi nào sót lại trong mẫu làm ảnh hưởng đến quá trình thiêu kết.



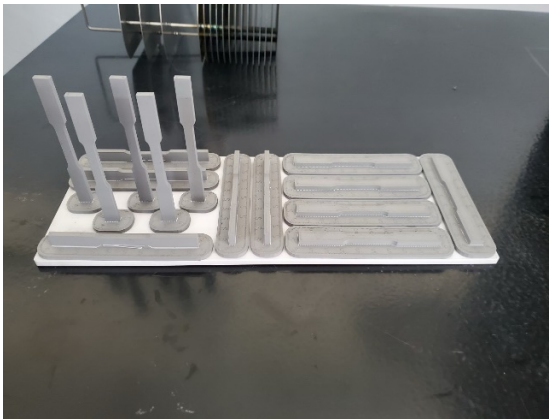
(a)



(b)

Hình 4. Quá trình rửa: a) Mẫu được sắp xếp trong buồng ngâm; b) Mẫu trong buồng sấy

Khối lượng của mẫu sau khi sấy phải đảm bảo điều kiện mất đủ khối lượng (khoảng 4,2% đối với thép không gỉ 17-4 PH). Nếu còn nhiều chất kết dính sập trong chi tiết có thể khiến quá trình thiêu kết bị hỏng, giảm chất lượng hoặc có thể gây tích tụ sập trong lò. Do đó, chi tiết cần được cân, tính toán kỹ lưỡng khối lượng hao hụt và nếu vẫn chưa đủ khối lượng thì quá trình rửa sẽ được thực hiện lại



(a)



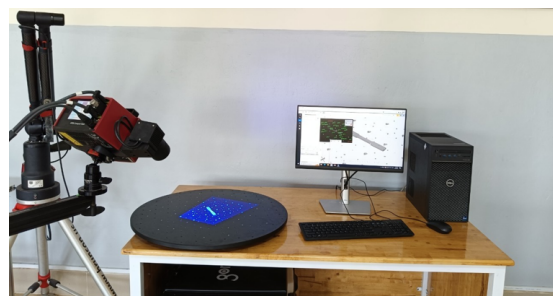
(b)

Hình 5. Quá trình thiêu kết: a) Mẫu được sắp xếp trên bàn gổm; b) Đưa mẫu vào máy thiêu kết

Các mẫu sẽ được xử lý nhiệt theo quy trình gia nhiệt không áp suất cụ thể trong lò với nhiệt độ tối đa dưới điểm nóng chảy.

2.2. Ứng dụng công nghệ đo không tiếp xúc để đo mẫu

Quá trình quét mẫu được thực hiện bằng máy Scan ATOS Compact. Quá trình quét mẫu được thực hiện trên tổng cộng 15 mẫu bao gồm 3 mẫu theo hướng phẳng chưa thiêu kết, 3 mẫu theo hướng cạnh chưa thiêu kết, 3 mẫu theo hướng thẳng chưa thiêu kết, 3 mẫu theo hướng phẳng đã thiêu kết và 3 mẫu theo hướng cạnh đã thiêu kết. Đối với các mẫu theo hướng thẳng đứng do đã bị biến dạng phá hủy trong quá trình thiêu kết nên không thực hiện quét.



Hình 6. Quá trình quét mẫu bằng công nghệ đo không tiếp xúc

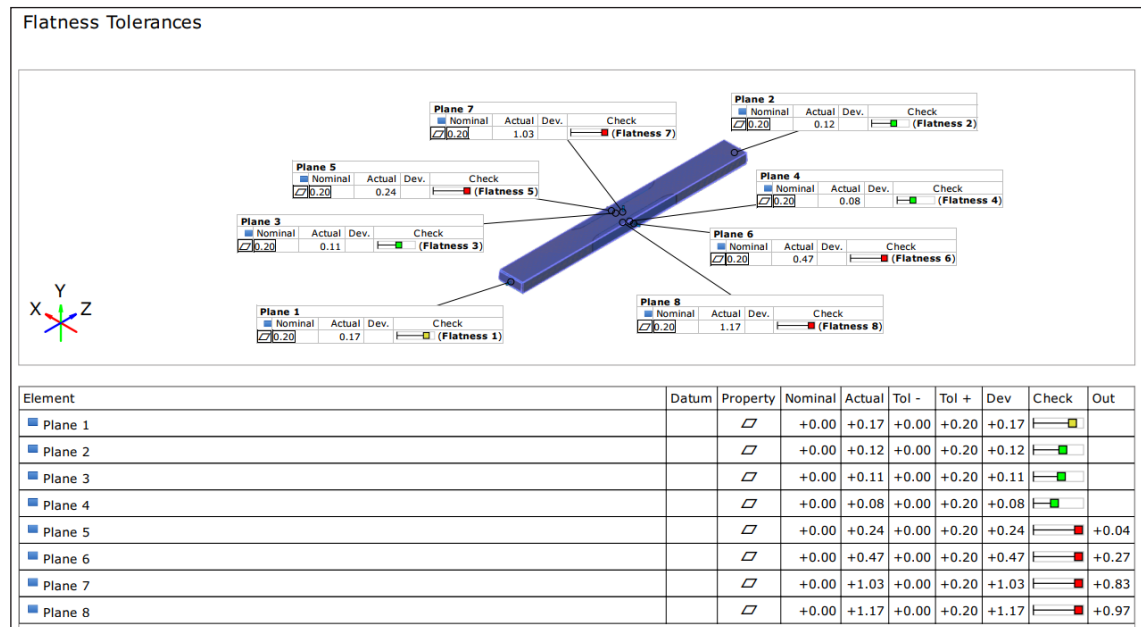
Đưa dữ liệu CAD của mẫu thiết kế và dữ liệu đo và tiến hành ghép chồng dữ liệu. Sử dụng các lệnh đo kích thước để kiểm tra về dung sai hình học, và dung sai vị trí.

2.3. Kết quả và thảo luận

Kết quả thực nghiệm đo kiểm về dung sai hình học và dung sai vị trí được trình bày qua các hình ảnh và bảng dưới đây, minh họa một cách chi tiết và rõ ràng các

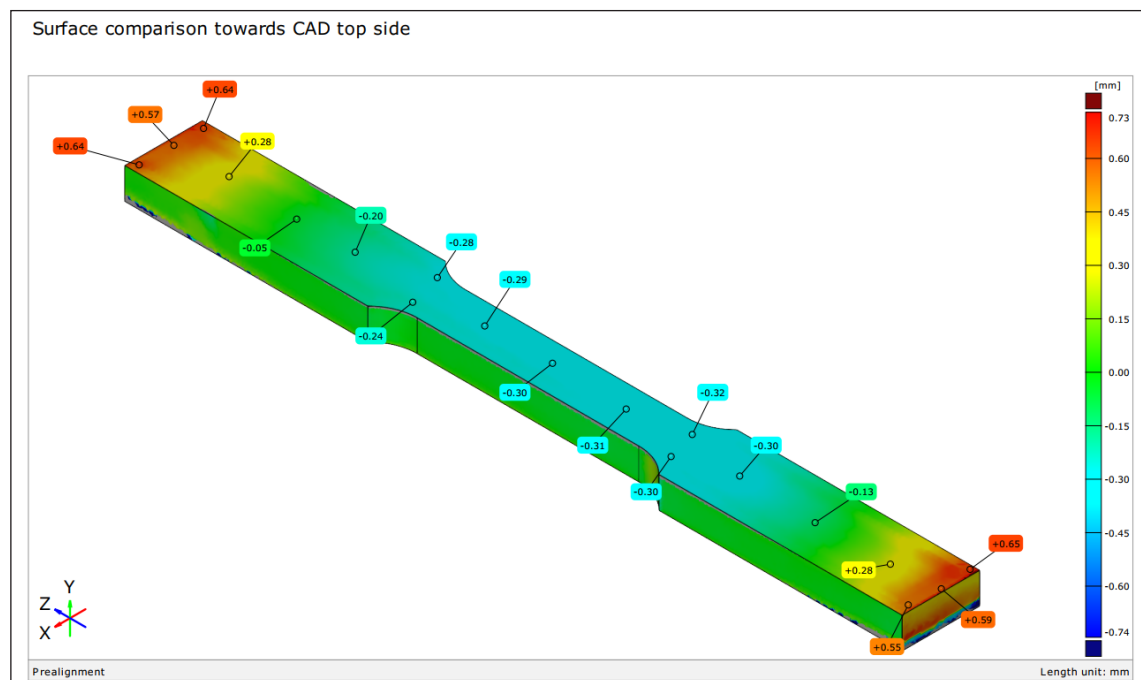
kết quả của các mẫu. Các số liệu này cung cấp cái nhìn tổng quan về sự phân bố và sai số trong các thông số kỹ thuật, góp phần vào việc đánh giá chính xác hiệu suất và độ tin cậy. Thông qua các biểu đồ và bảng

tổng hợp, đã xác định được các mức độ dung sai và sai số vị trí, từ đó đưa ra các nhận xét và đánh giá cụ thể về ảnh hưởng của chúng đến quá trình sản xuất.



Hình 7. Kết quả đo độ phẳng

Các kết quả từ việc ghép chồng dữ liệu thể hiện sai lệch vị trí



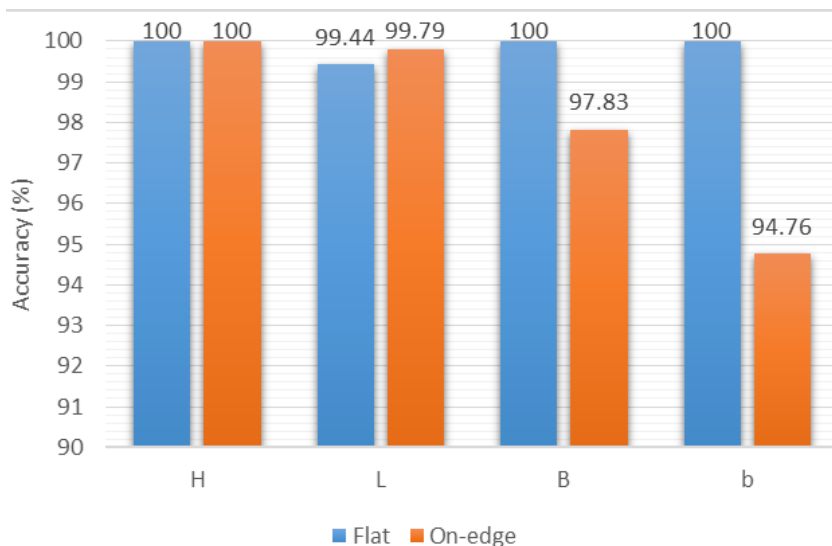
Hình 8. Độ chính xác kích thước khi xếp chồng dữ liệu

Bảng 2. Tỷ lệ phần trăm độ chính xác trung bình thu được từ các phép đo chiều của mẫu quét

Sample Settings		Length (%)	SD (%)
Flat	H	100	± 0
	L	99.44	± 0.38
	B	100	± 0
	b	100	± 0
On-edge	H	100	± 0
	L	99.79	± 0.14
	B	97.83	± 0.1
	b	94.76	± 0.18

So sánh độ chính xác kích thước của các mẫu in theo hai hướng (Flat, On-edge). Mẫu in Upright bị biến dạng nên không thí nghiệm được. Độ chính xác kém nhất ở mẫu in cạnh (On-edge) do định vị lớp in kém và tỉ lệ diện tích lớp in lớn.

Hầu hết các mẫu đều đạt độ chính xác từ 98,10% đến 99,86%. Kích thước L ở mẫu in phẳng (Flat) và kích thước B, b ở mẫu in cạnh (On-edge) có sự khác biệt đáng kể. Mẫu in phẳng (Flat) cho kích thước chuẩn nhất và tối ưu hơn.



Hình 9. So sánh độ chính xác kích thước trung bình của các mẫu quét được sản xuất theo các hướng in khác nhau

Bảng 3. Dữ liệu đo sai lệch hình học mẫu in bằng

Mẫu		Tol +	Độ phẳng	Độ song song	Độ vuông góc
Mẫu in bằng 1	Plane 1	0.2	0.17	0.32	0.08
	Plane 2	0.2	0.12	0.17	0.01
	Plane 3	0.2	0.11	0.12	0.08
	Plane 4	0.2	0.08	0.07	0.04
	Plane 5	0.2	0.24	0.17	0.08
	Plane 6	0.2	0.47	0.09	0.08
	Plane 7	0.2	1.03	0.08	0.00
	Plane 8	0.2	1.17	0.11	0.09

Mẫu in bảng 2	Plane 1	0.2	0.13	0.12	0.04
	Plane 2	0.2	0.07	0.07	0.03
	Plane 3	0.2	0.24	0.07	0.05
	Plane 4	0.2	0.26	0.10	0.07
	Plane 5	0.2	0.21	0.12	0.12
	Plane 6	0.2	0.22	0.09	0.09
	Plane 7	0.2	0.21	0.01	0.00
	Plane 8	0.2	0.37	0.00	0.00
Mẫu in bảng 3	Plane 1	0.2	0.06	0.07	0.00
	Plane 2	0.2	0.54	0.5	0.19
	Plane 3	0.2	0.07	0.07	0.04
	Plane 4	0.2	0.16	0.11	0.05
	Plane 5	0.2	0.45	0.07	0.01
	Plane 6	0.2	0.34	0.17	0.09
	Plane 7	0.2	0.2	0.02	0.01
	Plane 8	0.2	0.34	0.03	0.01

Mẫu in bảng 1 và 2 có giá trị Tol+ ổn định quanh 0.2, cho thấy độ lệch sai thấp. Mẫu in bảng 3 dao động mạnh (0.06 đến 0.54), thể hiện sự không ổn định và độ chính xác kém hơn. Mẫu in bảng 1 có độ

phẳng và vuông góc tốt hơn so với mẫu 2 và 3. Mẫu in bảng 3 có độ song song cao (ví dụ 0.5), cho thấy sự khác biệt lớn so với mặt phẳng tham chiếu.

Bảng 4. Dữ liệu đo sai lệch hình học mẫu in cạnh

Mẫu		Tol +	Độ phẳng	Độ song song	Độ vuông góc
Mẫu in cạnh 1	Plane 1	0.2	0.25	0.36	0.31
	Plane 2	0.2	0.15	0.42	0.38
	Plane 3	0.2	0.26	0.06	0.01
	Plane 4	0.2	0.33	0.18	0.08
	Plane 5	0.2	0.94	0.16	0.07
	Plane 6	0.2	1.06	0.11	0.08
	Plane 7	0.2	0.65	0.03	0.03
	Plane 8	0.2	0.65	0.04	0.03

Mẫu in cạnh 2	Plane 1	0.2	0.14	0.33	0.28
	Plane 2	0.2	0.10	0.44	0.42
	Plane 3	0.2	0.23	0.01	0.01
	Plane 4	0.2	0.33	0.10	0.09
	Plane 5	0.2	0.93	0.20	0.04
	Plane 6	0.2	1.12	0.11	0.00
	Plane 7	0.2	0.23	0.02	0.00
	Plane 8	0.2	0.21	0.05	0.02
Mẫu in cạnh 3	Plane 1	0.2	0.14	0.52	0.51
	Plane 2	0.2	0.13	0.61	0.57
	Plane 3	0.2	0.18	0.03	0.01
	Plane 4	0.2	0.33	0.07	0.06
	Plane 5	0.2	1.46	0.05	0.01
	Plane 6	0.2	1.66	0.18	0.12
	Plane 7	0.2	0.19	0.09	0.01
	Plane 8	0.2	0.18	0.03	0.01

Các mẫu in cạnh 1, cạnh 2 và cạnh 3 có giá trị Tol+ quanh 0.2, cho thấy độ lệch sai số ổn định. Mẫu in cạnh 1 và 2 có độ phẳng từ 0.14 đến 1.12, trong khi mẫu cạnh 3 từ 0.14 đến 1.66, thể hiện sự không ổn định. Độ song song và vuông góc của mẫu cạnh 1 dao động từ 0.06 đến 0.36 (song song) và 0.01 đến 0.31 (vuông góc). Mẫu cạnh 3 có độ song song từ 0.03 đến 0.61 và vuông góc từ 0.01 đến 0.57.

So với hướng in bằng, cả hai hướng in đều có giá trị Tol+ quanh 0.2, độ phẳng của hướng in bằng từ 0.08 đến 1.17 và hướng in cạnh từ 0.10 đến 1.12, cho thấy không có sự khác biệt rõ rệt. Độ song song và vuông góc của cả hai hướng in đều ổn định, không có sự khác biệt đáng kể. Kết quả cho thấy không có ưu thế rõ rệt giữa hai hướng in về chất lượng sản phẩm in 3D kim loại.

3. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã áp dụng công nghệ CAD/CAE để đánh giá độ chính xác của sản phẩm in 3D bằng thép không gỉ 17-4 PH, sử dụng công nghệ in đùn vật liệu (ME). Kết quả cho thấy máy in 3D kim loại Markforged đạt độ chính xác cao (98.1%) so với kích thước danh nghĩa, nhưng mẫu in theo cạnh (on-edge) có độ chính xác thấp nhất do biến dạng trong quá trình thiêu kết. Hướng in có tác động lớn đến chất lượng và hình dạng sản phẩm, đặc biệt các mẫu in theo hướng thẳng đứng (upright) bị vỡ do thiếu bộ phận hỗ trợ. Hơn nữa, hướng in cũng ảnh hưởng đáng kể đến bề mặt và độ lệch hình học, với sai lệch lớn nhất là độ phẳng. Từ các kết quả thực nghiệm, nghiên cứu khẳng định vai trò quan trọng của việc điều chỉnh hướng in và các tham số công nghệ để đạt được sản phẩm in 3D kim loại có chất lượng tốt nhất.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. A. Vafadar, F. Guzzomi, A. Rassau, K. Hayward, “Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes”, Industrial Applications, and Current Challenges, Appl. Sci., 11, 1213, 2021, <https://doi.org/10.3390/app11031213>
- [2]. D. G. Zisopol, D. V. Iacob, and A. I. Portoaca, “A Theoretical Experimental Study of the Influence of FDM Parameters on PLA Spur Gear Stiffness,” Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 12, no. 5, pp. 9329–9335, Oct. 2022, <https://doi.org/10.48084/etasr.5183>.
- [3]. D. G. Zisopol, I. Nae, A. I. Portoaca, and I. Ramadan, “A Statistical Approach of the Flexural Strength of PLA and ABS 3D Printed Parts,” Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 12, no. 2, pp. 8248–8252, Apr. 2022, <https://doi.org/10.48084/etasr.4739>.
- [4]. Wohlers, T.; Campbell, I.; Diegel, O.; Huff, R.; Kowen, J. 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry: Annual Worldwide Progress Report; Lund University: Lund, Sweden, 2017.
- [5]. Huang, R.; Riddle, M.; Graziano, D.; Warren, J.; Das, S.; Nimbalkar, S.; Cresko, J.; Masanet, E. Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: The case of lightweight aircraft components. J. Clean. Prod. 2016, 135, 1559–1570.
- [6]. Rejeski, D.; Zhao, F.; Huang, Y. Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing. Addit. Manuf. 2018, 19, 21–28
- [7]. T. Kurose et al., “Influence of the Layer Directions on the Properties of 316L Stainless Steel Parts Fabricated through Fused Deposition of Metals,” Materials (Basel), vol. 13, no. 11, May 29 2020.
- [8]. C. Tosto, J. Tirillo, F. Sarasini, C. Sergi, and G. Cicala, “Fused Deposition Modeling Parameter Optimization for Cost-Effective Metal Part Printing,” Polymers (Basel), vol. 14, no. 16, Aug 10 2022.
- [9]. M. Á. Caminero, A. Romero, J. M. Chacón, P. J. Núñez, E. García-Plaza, and G. P. Rodríguez, “Additive manufacturing of 316L stainless-steel structures using fused filament fabrication technology: mechanical and geometric properties,” Rapid Prototyping Journal, vol. 27, no. 3, pp. 583-591, 2021
- [10]. Ender A, Mehl A. Accuracy of complete-arch dental impressions: a new method of measuring trueness and precision. J Prosthet Dent 2013;109:121-8.
- [11] DIN Deutsches Institut für Normung. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results Part 1: General principles and definitions (ISO 5725-1:1994). 1997; Berlin: Bouth Vorlag GmbH.
- [12] Hazeveld A, Huddleston Slater JJ, Ren Y. Accuracy and reproducibility of dental replica models reconstructed by different rapid prototyping techniques. Am J Orthod Dentofacial Orthop 2014;145:108-15.

- [13] Park ME, Shin SY. Three-dimensional comparative study on the accuracy and reproducibility of dental casts fabricated by 3D printers. *J Prosthet Dent* 2018;119:861.e1-861.e7.
- [14]. Dang LC, Nguyen CV, Le AH, Bui DT. A Study on the Influence of Printing Orientation in Metal Printing Using Material Extrusion Technology on the Mechanical Properties of 17-4 Stainless Steel Products. *Journal of Machine Engineering*. 2023;23(4):89-100. doi:10.36897/jme/170509.
- [15]. M.Á. Caminero, A. Romero, J.M. Chacon, P.J. Núñez, E. García-Plaza, and G.P. Rodríguez, “Additive manufacturing of 316L stainless-steel structures using fused filament fabrication technology: mechanical and geometric properties”, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 27 No. 3, pp. 583-591, 2021, doi: 10.1108/RPJ-06-2020-0120
- [16]. T. Kurose, Y. Abe, M.V.A. Santos, Y. Kanaya, A. Ishigami, S. Tanaka, and H. Ito, “Influence of the layer directions on the properties of 316l stainless steel parts fabricated through fused deposition of metals”, *Materials*, Vol. 13 No. 11, p. 2493, 2020, doi: 10.3390/ma13112493
- [17]. C. Tosto, J. Tirillo, F. Sarasini, C. Sergi, and G. Cicala, “Fused Deposition Modeling Parameter Optimization for Cost-Effective Metal Part Printing,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 16, Aug 10 2022.
- [18]. M. Quarto, M. Carminati, and G. D’Urso, “Density and shrinkage evaluation of AISI 316L parts printed via FDM process”, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 36 No. 13, pp. 1535-1543, 2021, doi: 10.1080/10426914.2021. 1905830