

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ CÔNG THƯƠNG

VIỆN NGHIÊN CỨU CƠ KHÍ

NARIME

NGUYỄN THÁI SƠN

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ THÔNG SỐ
CÔNG NGHỆ ĐẾN CHẤT LƯỢNG CHI TIẾT IN 3D - SLM
TỪ VẬT LIỆU Ti6Al4V**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Ngành: Kỹ thuật Cơ khí

Mã số: 9520103

Hà Nội – 2026

Công trình được hoàn thành tại:
Viện Nghiên cứu Cơ khí - Bộ Công Thương

Người hướng dẫn khoa học:

- 1. Người hướng dẫn 1: PGS. TS. Trần Ngọc Hiền**
- 2. Người hướng dẫn 2: PGS. TS. Nguyễn Chí Sáng**

Phản biện 1: GS. TS. Nguyễn Đức Toàn

Phản biện 2: PGS. TS. Hoàng Tiến Dũng

Phản biện 3: PGS. TS. Hoàng Văn Gọt

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Viện

Họp tại: Viện Nghiên cứu Cơ khí - Bộ Công Thương

Tòa nhà trụ sở chính: số 4 đường Phạm Văn Đồng, quận Cầu Giấy, TP Hà Nội

Vào hồi 8 giờ 30 phút, ngày 14 tháng 3 năm 2026.

Có thể tìm hiểu luận án tại:

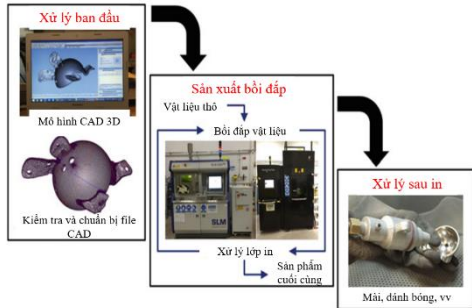
- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Thư viện Viện Nghiên cứu Cơ khí

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài luận án

Với sự phát triển của các hệ thống sản xuất thông minh nhằm nâng cao năng suất và chất lượng cho các phương pháp gia công cắt gọt truyền thống, các hệ thống sản xuất bồi đắp đã và đang ngày càng được ứng dụng rộng rãi. Nếu gia công cắt gọt là cắt bỏ vật liệu từ phôi để tạo thành chi tiết thì gia công bồi đắp là sự thêm vật liệu theo từng lớp để hình thành chi tiết. Hình 0.1 thể hiện quy trình của sản xuất bồi đắp bao gồm các bước từ xử lý mô hình CAD của chi tiết in trên máy tính, đến in 3D chi tiết trên máy in và cuối cùng là xử lý sau in để đạt được chất lượng sản phẩm theo yêu cầu.

Công nghệ sản xuất bồi đắp cho phép tạo ra các sản phẩm có hình dạng phức tạp, chủng loại sản phẩm lớn nên ngày càng được nghiên cứu cải tiến để mở rộng phạm vi ứng dụng. Tuy vậy, vấn đề chất lượng sản phẩm là một trong những rào cản để công nghệ sản xuất bồi đắp được ứng dụng rộng rãi. Một trong những giải pháp đã



và đang được nghiên cứu để đảm bảo được chất lượng trong quá trình in là xác định được bộ thông số công nghệ in phù hợp để đảm bảo được các chỉ tiêu đầu ra như chất lượng bề mặt, độ chính xác kích thước và cơ tính của sản phẩm in.

Tuy vậy, hiện tại có nhiều phương pháp in khác nhau cho các vật liệu in khác nhau, các chỉ tiêu đầu ra cũng tùy thuộc vào từng ứng dụng cụ thể nên cũng có các yêu cầu khác nhau. Chính vì vậy, nghiên cứu chất lượng sản phẩm trong quá trình in là rất cần thiết với các ứng dụng thực tế.

Phương pháp in laser nóng chảy chọn lọc (Selective laser melting, viết tắt SLM) là một phương pháp sản xuất bồi đắp cho vật liệu bột kim loại. Ngày nay, phương pháp in SLM được sử dụng rộng rãi với nhiều ưu điểm. Nhiều nghiên cứu đã được thực hiện với các bài toán ứng dụng cụ thể khác nhau đối với vật liệu bột Ti6Al4V theo phương pháp in SLM, trong đó tập trung nhiều vào vấn đề đảm bảo chất lượng của sản phẩm in trong mối liên hệ với các thông số công nghệ in. Tuy vậy, phần lớn các nghiên cứu tập trung vào sự ảnh hưởng của công suất nguồn laser, tốc độ in, với chiều dày lớp in cố định. Trong khi chiều dày lớp in thay đổi cũng ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm in. Mặt khác, ảnh hưởng của bộ thông số công nghệ đến sai lệch hình dạng, độ nhám bề mặt và diện tích in không lỗ rỗng vẫn chưa được đánh giá đồng thời. Đây là khoảng trống cần nghiên cứu để xác định thông số tối ưu, đảm bảo chất lượng sản phẩm in trong thực tế.

Từ các phân tích ở trên cho thấy rằng đề tài “**Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến chất lượng chi tiết in 3D - SLM từ vật liệu Ti6Al4V**” là vấn đề mới và cần thiết. Nghiên cứu này không chỉ góp phần bổ sung vào nền tảng lý thuyết về in SLM cho vật liệu khó gia công, mà còn mở ra triển vọng ứng dụng trong thực tiễn sản xuất bồi đắp để tạo các chi tiết có hình dáng phức tạp trong lĩnh vực công nghiệp và y tế.

2. Mục đích nghiên cứu của luận án

- Xây dựng mô hình toán thể hiện mối liên hệ giữa bộ thông số công nghệ in với các chỉ tiêu chất lượng sản phẩm in.
- Xác định bộ thông số công nghệ in tối ưu thỏa mãn các chỉ tiêu đầu ra.

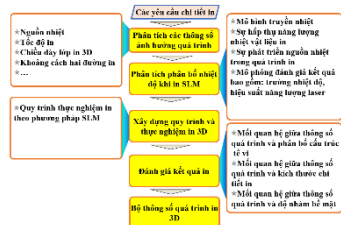
3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

- **Đối tượng nghiên cứu:** Nghiên cứu ảnh hưởng của 3 tham số đầu vào bao gồm công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in tới độ chính xác hình dạng, độ nhám bề mặt và độ xốp khi in 3D kim loại.

- **Phạm vi nghiên cứu:** Công nghệ in 3D vật liệu kim loại áp dụng cho chế tạo chi tiết từ vật liệu bột hợp kim titan Ti6Al4V với kích thước bột trung bình 43 μm theo phương pháp in laser nóng chảy chọn lọc (Selective Laser Melting -SLM).

4. Phương pháp nghiên cứu

Với mục tiêu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu trên, các bước tiến hành nghiên cứu được thể hiện trên hình 0.2 với sự kết hợp của các **phương pháp nghiên cứu lý thuyết, mô phỏng và thực nghiệm.**



5. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn của đề tài

* Ý nghĩa khoa học:

- Nghiên cứu làm rõ được các thông số công nghệ chính ảnh hưởng đến quá trình in laser nóng chảy chọn lọc SLM với vật liệu bột hợp kim titan Ti6Al4V.

- Thiết lập được mô hình nguồn nhiệt, mô hình truyền nhiệt và phân tích được phân bố nhiệt khi in làm cơ sở để xác định được bộ thông số công nghệ in.

- Thiết lập được mô hình toán thể hiện mối liên hệ giữa các chỉ tiêu đầu ra về chất lượng với các thông số công nghệ in làm cơ sở khoa học cho việc xác định bộ thông số công nghệ in phù hợp với từng chỉ tiêu đầu ra khi áp dụng thực tế

* Ý nghĩa thực tiễn:

- Kết quả nghiên cứu về mối liên hệ giữa các chỉ tiêu chất lượng sản phẩm in với bộ thông số công nghệ in cho phép xác định được bộ thông số công nghệ in phù hợp nhằm đạt được chỉ tiêu chất lượng đầu ra mong muốn khi ứng dụng thực tế.

- Kết quả nghiên cứu làm tài liệu giảng dạy, nghiên cứu, cơ sở để áp dụng tại doanh nghiệp có ứng dụng công nghệ sản xuất bồi đắp nhằm nâng cao chất lượng sản phẩm.

6. Những đóng góp mới của luận án

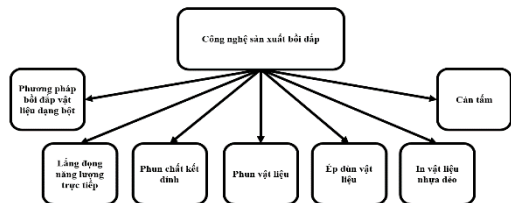
1. Nghiên cứu hoàn thiện lý thuyết về quy trình công nghệ in 3D kim loại áp dụng cho in vật liệu bột hợp kim titan Ti6Al4V.
2. Phân tích mô phỏng quá trình nhiệt trong quá trình in. Từ kết quả phân tích này có thể dự đoán được trạng thái phân bố nhiệt khi in nhằm đảm bảo trạng thái chảy của vật liệu ứng với bộ thông số công nghệ in tương ứng.
3. Xây dựng được các mô hình dự đoán chất lượng sản phẩm in bao gồm độ sai lệch hình dạng, chất lượng bề mặt, độ xốp trong mối liên hệ với thông số công nghệ in thông qua thực nghiệm theo phương pháp in SLM. Từ các mô hình này đã xác định được bộ thông số công nghệ tối sử dụng cho quá trình in nhằm đảm bảo chất lượng sản phẩm khi xét đơn mục tiêu hoặc đa mục tiêu (độ nhám bề mặt nhỏ nhất, độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất, và diện tích in không có lỗ xốp lớn nhất).

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ SẢN XUẤT BỒI ĐẬP VÀ PHƯƠNG PHÁP IN SLM VỚI VẬT LIỆU Ti6Al4V

1.1. Tổng quan về sản xuất bồi đắp

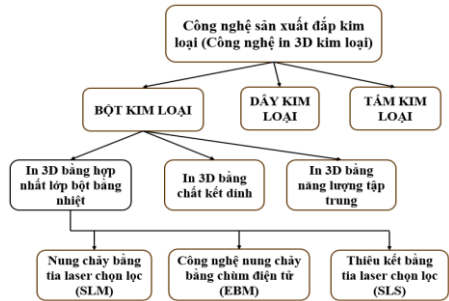
Theo định nghĩa của Hiệp hội vật liệu và thử nghiệm Hoa Kỳ (American Society for Testing Materials - ASTM): “Công nghệ sản xuất đắp dần là một quá trình sử dụng các nguyên liệu để chế tạo nên mô hình 3D, thường là chồng từng lớp nguyên liệu lên nhau, và quá trình này trái ngược với quá trình cắt gọt vẫn thường dùng để chế tạo xưa nay” [1]. Sản xuất bồi đắp (AM) hoặc sản xuất từng lớp hoặc in 3D đã được ứng dụng hiệu quả trong các nhiều lĩnh vực. AM đã được nghiên cứu, cải tiến và trở thành một trong những công nghệ cốt lõi của cuộc cách mạng công nghiệp lần thứ 4 và lần thứ 5 [2-4].

Với các hệ thống sản xuất hiện nay, mô hình 3D được thiết kế bằng phần mềm CAD, sau đó được chuyển sang CAM để thiết lập đường chạy dao và thông số gia công, từ đó tạo ra G-code cho máy CNC thực hiện.



Sản xuất bồi đắp được phân loại theo phương pháp hình thành sản phẩm in; loại vật liệu in như rắn, bột hoặc lỏng; và năng lượng nhiệt để xử lý. Các phương pháp AM được phân loại thành 7 nhóm.

Các quy trình PBF cho vật liệu kim loại như thể hiện ở Hình 1.7 bao gồm thiêu kết laser thiêu kết chọn lọc (selective laser sintering -SLS), laser nóng chảy chọn lọc (selective laser melting -SLM) và nóng chảy bột kim loại bằng chùm tia điện tử (electron beam melting -EBM). So với SLS và EBM, phương pháp SLM được sử dụng phổ biến hơn trong các ứng dụng công nghiệp.



Nhờ sự phát triển của khoa học công nghệ, AM cho phép chế tạo nhanh nguyên mẫu và chi tiết theo yêu cầu. Nhiều loại máy in 3D với vật liệu và phương pháp khác nhau hiện có, nên việc lựa chọn công nghệ in phụ thuộc vào mục đích sử dụng và yêu cầu sản phẩm.

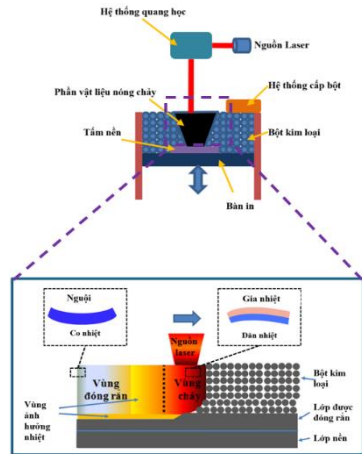
1.2. Chất lượng sản phẩm trong sản xuất bồi đắp

Quá trình in 3D, đặc biệt là SLM, chịu ảnh hưởng bởi nhiều thông số công nghệ như tốc độ in, kiểu điền đầy, chiều dày lớp in... Các yếu tố này tác động trực tiếp đến chất lượng in, bao gồm độ nhám bề mặt, sai lệch hình học và các tính chất cơ khí. Trong luận án, các nghiên cứu mô phỏng và thực nghiệm đã được thực hiện nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số như nguồn laser, tốc độ in, chiều dày lớp in đến độ chính xác kích thước, chất lượng bề mặt và cấu trúc vi mô. Một số kết quả đã thực hiện với quá trình WAMM và quá trình SLM.

1.3. Phương pháp in laser nóng chảy chọn lọc

Trong công nghệ AM, phương pháp in laser nóng chảy chọn lọc (SLM) là một trong những phương pháp in được dùng để tạo sản phẩm từ bột kim loại [10].

Hình 1.9 thể hiện cơ chế in SLM. Quá trình in diễn ra theo từng lớp: bột được rải, nung chảy bằng laser, sau đó bàn in hạ xuống để lặp lại chu trình cho đến khi hoàn thành chi tiết. Sản phẩm in phải đảm bảo độ chính xác về kích thước, hình dạng, chất lượng bề mặt và tính chất cơ khí. Tuy nhiên, cơ chế chuyển trạng thái nhanh từ rắn → lỏng → rắn trong SLM ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm, do đó việc tối ưu quy trình để nâng cao chất lượng và năng suất luôn là vấn đề được quan tâm nghiên cứu.



1.4. Tình hình nghiên cứu ngoài nước

1.4.1. Tình hình nghiên cứu về sản xuất bồi đắp

Các nghiên cứu về công nghệ AM tập trung nhiều trong những năm gần đây. Trong đó, quy trình in vật liệu nhựa dẻo, ép đùn vật liệu, lắng đọng năng lượng trực tiếp đang là 3 quy trình có nhiều sáng chế được bảo hộ nhất. Các nghiên cứu phần lớn tập trung vào vật liệu nhựa.

Các hướng nghiên cứu về in 3D kim loại tập trung vào:

- Nghiên cứu ứng dụng in 3D trong các lĩnh vực đặc thù:

Với các nghiên cứu về cải thiện chất lượng in, vật liệu mới, công nghệ in 3D ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực yêu cầu các chi tiết in đạt được yêu cầu kỹ thuật cao với vật liệu là hợp kim Titanium.

- Nghiên cứu ứng dụng AI cho các hệ thống in 3D:

Với các hệ thống AM hiện tại, vấn đề chất lượng sản phẩm in cần được xem xét. Các nghiên cứu gần đây cho thấy việc áp dụng AI vào hệ thống AM cho phép cải thiện chất lượng sản phẩm, giảm thiểu lỗi in và được đề xuất áp dụng ở cả giai đoạn thiết kế sản phẩm và giai đoạn in sản phẩm.

- Nghiên cứu xây dựng, cập nhật hệ thống tiêu chuẩn cho sản xuất bồi đắp:

Đề triển khai các hệ thống AM trong ngành công nghiệp, một hệ thống tiêu chuẩn là điều cần thiết để thiết lập các quy định chung. Năm 2016, chỉ có các tiêu chuẩn về thông số kỹ thuật cho vật liệu cụ thể.

1.4.2. Tình hình nghiên cứu về in laser nóng chảy chọn lọc với vật liệu Ti6Al4V

Vật liệu bột Ti6Al4V được sử dụng với phương pháp in SLM cho các nhiều sản phẩm do có độ bền mỏi và các đặc tính cơ học đặc biệt cao, đảm bảo các yêu cầu làm việc của chi tiết.

Độ nhám bề mặt và các đặc điểm cấu trúc tế vi là những chỉ số quan trọng về chất lượng của các chi tiết in.

Chất lượng in 3D phụ thuộc vào bốn nhóm yếu tố. Trong nghiên cứu này, thông qua thí nghiệm với SLM và vật liệu Ti6Al4V, mối quan hệ giữa độ chính xác hình dạng và các thông số in đã được thiết lập. Dựa trên mô hình hồi quy, bộ thông số in tối ưu giúp giảm sai lệch hình dạng đã được xác định.

1.5. Tình hình nghiên cứu trong nước

1.5.1. Tình hình nghiên cứu về sản xuất bồi đắp

Theo báo cáo tổng kê từ Trung tâm thông tin và thống kê khoa học và công nghệ thuộc Sở khoa học và công nghệ thành phố Hồ Chí Minh về tình hình nghiên cứu, ứng dụng công nghệ in 3D tại Việt Nam cho thấy các nghiên cứu tập trung vào [7]:

- Làm chủ công nghệ thiết kế, chế tạo máy in:

Phần lớn là các nghiên cứu về thiết kế, chế tạo máy in để in các sản phẩm nhựa.

- Nghiên cứu ứng dụng công nghệ in 3D:

Nghiên cứu ứng dụng hiệu quả công nghệ in 3D trong các lĩnh vực là rất cần thiết, đặc biệt với vật liệu kim loại. Nhóm nghiên cứu từ Học viện Kỹ thuật

quân sự đã thực hiện thành công đề tài nghiên cứu Nafosted. Đối với lĩnh vực y tế, nhiều bệnh viện lớn tại Thành phố Hà Nội và Thành phố Hồ Chí Minh đã triển khai ứng dụng các sản phẩm từ in 3D vào phẫu thuật.

1.5.2. Tình hình nghiên cứu về in laser nóng chảy chọn lọc với vật liệu Ti6Al4V

Nhằm cải thiện cơ lý tính của sản phẩm in SLM từ vật liệu Ti6Al4V, một nghiên cứu tổng quan đã được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của xử lý nhiệt đến cơ tính và cấu trúc vi mô [41,42]. Ngoài ra, Nguyen Minh Thuyet và cộng sự đã nghiên cứu tương tác giữa tấm nền Ti và bột Ti6Al4V, cũng như thực nghiệm về cơ tính và vi cấu trúc của sản phẩm in bằng SLS [43,44].

Kết luận Chương 1

Từ nghiên cứu tổng quan về sản xuất bồi đắp và phương pháp in SLM với bột Ti6Al4V, một số kết luận như sau:

1-Với sản xuất bồi đắp nói chung, phương pháp in SLM nói riêng, có bốn nhóm ảnh hưởng tới chất lượng sản phẩm in bao gồm: 1) Phương pháp in, độ chính xác máy in; 2) Vật liệu in như thuộc tính nhiệt, phân bố kích thước hạt; 3) Chế độ in như công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in; 4) Điều kiện in như sấy bột, khí bảo vệ buồng in và các phương pháp xử lý sau in như ủ nhiệt, mài, đánh bóng.

2-Với phương pháp in SLM cho bột Ti6Al4V, trong nghiên cứu ảnh hưởng chế độ in tới chất lượng sản phẩm in cần nghiên cứu ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố như công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in. Các nghiên cứu hiện tại tập trung vào sự thay đổi công suất nguồn laser và vận tốc in có xét tới chiều dày lớp in không đổi. Chính vì vậy, nghiên cứu xét tới sự thay đổi đồng thời của các thông số công nghệ in nêu trên cho phép triển khai hiệu quả tới thực tế sản xuất khi xem xét đồng thời các yêu cầu về năng suất (chiều dày lớp in lớn) và chất lượng để chọn được bộ thông số công nghệ tối ưu.

3-Nghiên cứu về chế độ in bằng phương pháp SLM cho bột Ti6Al4V để xác định ảnh hưởng đồng thời của các thông số công nghệ cốt lõi (như công suất laser, vận tốc in, chiều dày lớp) đến các chỉ tiêu chất lượng đầu ra: độ sai lệch hình dạng (D), độ nhám bề mặt (Ra) và cấu trúc tế vi trên thiết bị chuyên dụng.

CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT QUÁ TRÌNH IN 3D KIM LOẠI BẰNG PHƯƠNG PHÁP IN SLM

2.1. Chất lượng sản phẩm in

Chất lượng sản phẩm in được đánh giá thông qua: Độ chính xác về hình dạng, chất lượng bề mặt, tính chất cơ học, tính thẩm mỹ, hiệu suất chức năng, tuân thủ các tiêu chuẩn và an toàn.

Chất lượng sản phẩm in phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó có các yếu tố ảnh hưởng chính như phương pháp in, vật liệu in và chế độ công nghệ in.

Trong nghiên cứu này, nghiên cứu sinh tập trung vào độ chính xác về hình dạng, chất lượng bề mặt và tính chất cơ học.

2.1.1. Độ chính xác hình dạng

Một trong những tiêu chuẩn chất lượng quan trọng nhất đối với các sản phẩm in 3D là độ chính xác về kích thước, hình dạng của sản phẩm tức là mức độ phù hợp giữa kích thước, hình dạng vật lý của sản phẩm in được với thông số kích thước, hình dạng thiết kế.

Độ sai lệch hình dạng của sản phẩm in là do tác động của năng lượng nhiệt trong quá trình thiêu kết bột kim loại và quá trình chuyển pha nhanh từ rắn sang lỏng và ngược lại. Mặt khác, độ sai lệch hình dạng cũng bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như cài đặt máy in, đặc tính vật liệu, điều kiện môi trường và kỹ thuật xử lý sau in.

2.1.2. Chất lượng bề mặt

Một tiêu chuẩn chất lượng quan trọng khác đối với các sản phẩm in 3D là chất lượng bề mặt, tức là độ mịn, độ nhám hoặc kết cấu của bề mặt sản phẩm. Chất lượng bề mặt bị ảnh hưởng bởi các yếu tố như phương pháp in, chiều cao lớp in, kích thước vòi phun, tốc độ in và các kỹ thuật xử lý sau in.

2.1.3. Tính chất cơ học

Một tiêu chuẩn chất lượng quan trọng thứ ba đối với các sản phẩm in 3D là tính chất cơ học như độ bền, độ cứng, độ xốp, độ bền mỏi của sản phẩm. Tính chất cơ học được xác định bởi các yếu tố như thành phần vật liệu, phương pháp in, hướng in, mật độ lấp đầy và các kỹ thuật xử lý sau in.

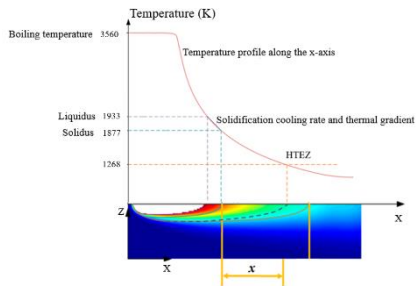
2.2. Mô hình chuyển pha của vật liệu kim loại khi in

Hình 2.9 cho thấy sự thay đổi pha theo các thông số nhiệt độ của hợp kim Ti6Al4V từ rắn, lỏng tới bay hơi. Từ sơ đồ chuyển đổi trạng thái của vật liệu nhận thấy rằng, các thông số công nghệ in cần tạo ra được nhiệt độ khi in lớn hơn 1268 K mới đảm bảo quá trình tạo lớp in.

Sau khi in một lớp, trạng thái của vật liệu thay đổi từ rắn, lỏng rồi rắn. Trong giai đoạn nguội nhanh (vật liệu ở trạng thái lỏng về lại trạng thái rắn), nhiệt độ của hợp kim Ti6Al4V từ 1268 K đến 1877 K là vùng ảnh hưởng nhiệt HTEZ, tồn tại ứng suất dư do nhiệt.

Chiều dài vùng ảnh hưởng nhiệt được xác định như sau [54]:

$$x = 1.22\sqrt{\gamma \cdot t'} \quad (2.1)$$



γ là hệ số khuếch tán nhiệt; và t' là thời gian tương tác laser.

Giữa hệ số khuếch tán nhiệt và hệ số dẫn nhiệt có mối quan hệ sau [54]:

$$\gamma = \lambda \cdot \rho \cdot C \quad (2.2)$$

Trong đó λ là hệ số dẫn nhiệt (J/(m s K)), ρ là khối lượng riêng của vật liệu (kg/m³), và C là nhiệt dung riêng (J/(kg K)).

Mô hình phân tích in được chia thành hai vùng, vùng ảnh hưởng xử lý nhiệt thứ nhất và thứ hai, tùy thuộc vào mức độ biến thiên nhiệt độ. Sau đó, TG được xác định bằng gradient nhiệt độ trung bình của mỗi vùng.

Mối quan hệ giữa TG với đặc tính vật liệu được xác định như sau [56]:

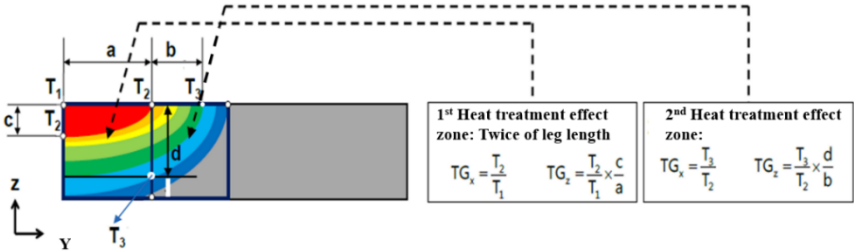
$$\Delta TG = |TG_{2nd\ HTEZ} - TG_{1st\ HTEZ}| = \frac{\rho \cdot m}{\alpha} \quad (2.3)$$

Trong đó ρ là mật độ của vật liệu, m là tham số mạng tinh thể, và α là hệ số giãn nở nhiệt. Với $T = 1173$ K, giá trị m là $3.63 \cdot 10^{-7}$ (mm) [29]. Phương trình để tính toán khối lượng riêng của vật liệu dựa trên gradient nhiệt độ, tham số mạng tinh thể, và hệ số giãn nở nhiệt:

$$\rho = \frac{\Delta TG \cdot \alpha}{m} \quad (2.4)$$

Từ đó, chiều dài vùng ảnh hưởng nhiệt được xác định như sau:

$$x = 1.22\sqrt{\gamma \cdot t} = 1.22\sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C \cdot t} = 1.22\sqrt{\lambda \cdot \frac{\Delta TG \cdot \alpha}{m} \cdot C \cdot t} \quad (2.5)$$



Để xác định chính xác các đặc tính nhiệt-cơ học của các chi tiết được in, sự thay đổi pha của vật liệu trong quá trình in SLM, cũng như các đặc tính phụ thuộc nhiệt độ của vật liệu phải được xem xét. Trong quá trình gia nhiệt, sự thay đổi pha là từ rắn (bột kim loại) sang lỏng (bột nóng chảy), và từ lỏng sang khí (bay hơi) trong trường hợp nhiệt độ cao hơn nhiệt độ sôi. Trong quá trình làm nguội, sự thay đổi pha là từ lỏng sang rắn để có chi tiết được in. Với sự thay đổi pha của vật liệu, các giá trị của k (hệ số dẫn nhiệt), C (nhiệt dung riêng), và ρ (khối lượng riêng) cũng thay đổi, và được tính toán như sau [30]:

$$k = \theta k_{rắn \rightarrow lỏng} + (1 - \theta) k_{lỏng \rightarrow khí} \quad (2.6)$$

$$C = \theta C_{rắn \rightarrow lỏng} + (1 - \theta) C_{lỏng \rightarrow khí} \quad (2.7)$$

$$\rho = \frac{\theta \rho_{r\grave{a}n \rightarrow l\grave{o}ng} C_{r\grave{a}n \rightarrow l\grave{o}ng} + (1-\theta) \rho_{l\grave{o}ng \rightarrow k\grave{h}i} C_{l\grave{o}ng \rightarrow k\grave{h}i}}{\theta C_{r\grave{a}n \rightarrow l\grave{o}ng} + (1-\theta) C_{l\grave{o}ng \rightarrow k\grave{h}i}} \quad (2.8)$$

Trong đó θ là hàm lượng thể tích nằm trong khoảng từ 0 đến 1 trong khoảng chuyển tiếp. Giả sử nhiệt độ nằm trong khoảng từ nhiệt độ thiêu kết (T_s) đến nhiệt độ nóng chảy (T_m), các giá trị của k , C , và ρ được xác định mà không có pha chuyển từ lỏng sang khí.

$$k_{r\grave{a}n \rightarrow l\grave{o}ng} = \frac{k_{nguy\grave{e}n\ k\grave{h}o\grave{i}} - k_{b\grave{o}t}}{T_m - T_s} (T - T_s) + k_{b\grave{o}t} \quad (2.9)$$

$$\rho_{r\grave{a}n \rightarrow l\grave{o}ng} = \frac{\rho_{nguy\grave{e}n\ k\grave{h}o\grave{i}} - \rho_{b\grave{o}t}}{T_m - T_s} (T - T_s) + \rho_{b\grave{o}t} \quad (2.10)$$

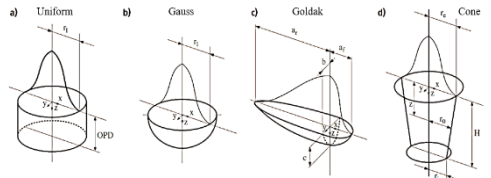
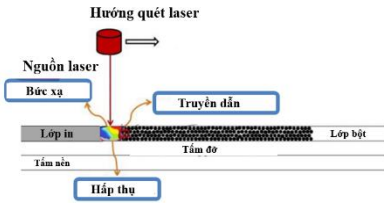
Khối lượng riêng và độ dẫn nhiệt của vật liệu ở trạng thái bột được tính toán bằng các phương trình sau. Trong đó $\rho_{nguy\grave{e}n\ k\grave{h}o\grave{i}}$ và $k_{nguy\grave{e}n\ k\grave{h}o\grave{i}}$ là khối lượng riêng và độ dẫn nhiệt của vật liệu khi độ rỗng bằng 0.

$$\rho_{b\grave{o}t} = (1 - 0.43) \rho_{nguy\grave{e}n\ k\grave{h}o\grave{i}} \quad (2.11)$$

$$k_{b\grave{o}t} = k_{nguy\grave{e}n\ k\grave{h}o\grave{i}} (1 - 0.43)^4 \quad (2.12)$$

2.3. Mô hình truyền nhiệt khi in SLM

Khi nguồn laser quét trên bề mặt lớp bột, năng lượng được truyền từ lớp trên cùng xuống các lớp dưới thông qua nhiều thay đổi vật lý khác nhau, chẳng hạn như: truyền nhiệt, bức xạ, đối lưu, dẫn nhiệt, dòng chất lỏng chảy trong vùng nóng chảy, nóng chảy, bay hơi và phản ứng hóa học [75].



Mô hình toán để xác định nhiệt độ trong quá trình in trong môi liên hệ với thuộc tính nhiệt của vật liệu, thông số công nghệ in được thể hiện như sau [33]:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C V \nabla T = \nabla(k \nabla T) + Q_{nguồn\ nhiệt} \quad (2.13)$$

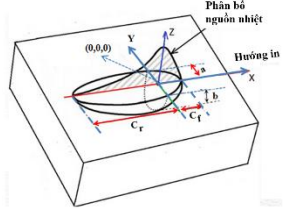
Với T là nhiệt độ (K); ρ là khối lượng riêng của vật liệu (kg/m³); C là nhiệt dung (J/(kg.K)); k là độ dẫn nhiệt (W/(m.K)); V là vận tốc in (m/s); Q nguồn nhiệt là năng lượng laser phân bố cho vùng cần in của lớp in (W/m³).

Năng lượng laser phân bố cho vùng cần in được xác định như sau:

$$Q_{nguồn\ nhiệt} = Q_{công\ suất\ yêu\ cầu} + Q_{dẫn\ nhiệt} \quad (2.14)$$

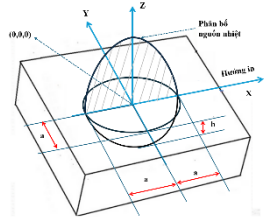
$Q_{\text{công suất yêu cầu}} = Q_{\text{nguồn laser đến}} - Q_{\text{đổi lưu}} - Q_{\text{bức xạ}} - Q_{\text{dẫn nhiệt}}$ (2.15)
 Năng lượng công suất laser yêu cầu theo mô hình Goldak được xác định như sau:

$$Q_{\text{công suất yêu cầu}} = Q \frac{6\sqrt{3}}{ab\pi\sqrt{\pi}} e^{\left[\frac{-3z^2}{b^2} + \frac{-3y^2}{a^2}\right]} \left[\frac{f_f}{C_f} e^{\frac{-3x^2}{C_f^2}} + \frac{f_r}{C_r} e^{\frac{-3x^2}{C_r^2}} \right] \quad (2.16)$$



Năng lượng công suất laser yêu cầu theo mô hình Gauss được xác định như sau:

$$Q_{\text{công suất yêu cầu}} = 2Q \frac{6\sqrt{3}}{a^2b\pi\sqrt{\pi}} e^{\left[\frac{-3z^2}{b^2} + \frac{-3y^2}{a^2} + \frac{-3x^2}{a^2}\right]} \quad (2.17)$$



Xác định năng lượng của laser

Trong quá trình SLM, sự giãn nở nhiệt xảy ra bên trong các lớp của chi tiết in, có thể dẫn đến biến dạng. Quá trình in được đảm bảo hay không phụ thuộc vào năng lượng laser. Khi xem xét các thông số quy trình in, mật độ năng lượng thể tích E_v (J/mm³) được tính toán như sau [60]:

$$E_v = \frac{Q_{\text{năng lượng nung chảy}}}{V \cdot t \cdot h_a} \quad (2.18)$$

Trong đó V là tốc độ in (mm/s), h_a là khoảng cách đường in (mm), và t là độ dày lớp (mm).

Từ giá trị năng lượng nóng chảy, nguồn nhiệt laser được tính như sau:

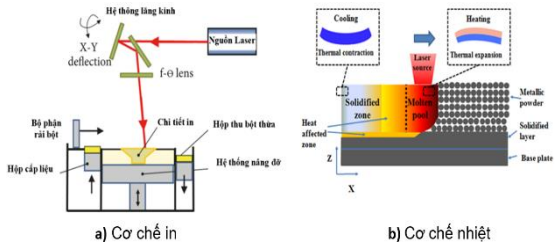
$$Q_{\text{nguồn laser}} = Q_{\text{năng lượng nung chảy}} + \Delta Q \quad (2.19)$$

ΔQ thể hiện tổn thất năng lượng laser bao gồm năng lượng laser tiêu thụ cho dẫn nhiệt, đổi lưu, bức xạ, phản xạ và phát xạ. Để tính đến năng lượng laser cần thiết cho việc nóng chảy bột, hiệu suất năng lượng laser (η) được định nghĩa như sau:

$$\eta = \frac{Q_{\text{năng lượng nung chảy}}}{Q_{\text{nguồn laser}}} \quad (2.20)$$

2.4. Cơ chế in SLM

Quy trình SLM sử dụng hệ thống bột mịn để phân phối một lớp 20-100 μm lên tấm nền bên trong buồng



chứa khí trơ. Sau đó, lớp này được hợp nhất bằng cách quét chùm tia laser trên bề mặt bột. Năng lượng laser cường độ cao làm tan chảy hoàn toàn bột kim loại để tạo thành kim loại rắn. Quá trình này được lặp lại hết lớp này đến lớp khác cho đến khi hoàn thành phần chi tiết in.

Bản chất của quá trình gia nhiệt bằng laser đối với lớp bột khác biệt đáng kể so với quá trình gia nhiệt bằng laser đối với một khối rắn vì hai lý do. Đầu tiên, độ hấp thụ laser của các lớp bột cao hơn đáng kể so với độ hấp thụ của khối vật liệu khối do mật độ và hình dạng hạt khác nhau của chúng [61], [62]. Thứ hai, độ dẫn nhiệt của lớp bột thấp hơn nhiều so với vật liệu nguyên khối do các hạt bột có diện tích tiếp xúc với nhau hạn chế, do đó, sự truyền nhiệt chỉ bị chi phối bởi độ dẫn nhiệt thấp của khí [63]. Do những khác biệt này, có thể suy ra rằng việc thay đổi đường kính và độ nén của bột có thể ảnh hưởng đáng kể đến đặc tính dẫn nhiệt trong SLM.

Do quá trình tăng và giảm nhiệt theo chu trình của SLM, biến dạng tổng được tính bằng tổng của các thành phần: biến dạng đàn hồi và biến dạng dư do nhiệt (biến dạng không đàn hồi), được thể hiện bằng công thức:

$$\varepsilon_{tổng} = \varepsilon_{\text{đàn hồi}} + \varepsilon^* \quad (2.21)$$

Trong đó: $\varepsilon_{\text{đàn hồi}}$: Biến dạng đàn hồi; ε^* : Biến dạng dư do nhiệt
Giá trị của biến dạng dư do nhiệt được xác định bằng công thức sau:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_{\text{nhiệt}} + \varepsilon_{\text{đào}} + \varepsilon_{\text{chuyển pha}} + \varepsilon_{\text{rão}} \quad (2.22)$$

2.4.1. Quá trình in nhiều lớp

Sau khi hoàn thiện lớp in đầu tiên, giá trị biến dạng nội tại IS là ε_{inh} . Máy in sẽ tiếp tục triển khai in tiếp lớp 2, 3 đến lớp n. Cách tính toán biến dạng nội tại cho n lớp được thể hiện qua hình sau:

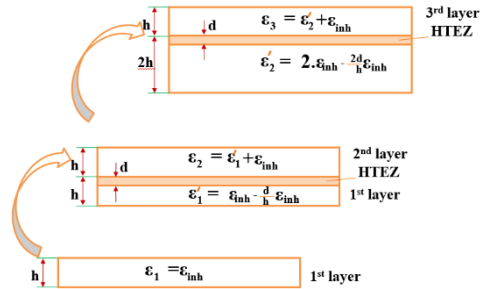
Khi tiến hành in lớp thứ 2, lớp đầu tiên được làm nóng chảy lại với vùng ảnh hưởng nhiệt mới, vì vậy giá trị IS còn lại cho lớp đầu tiên:

$$\varepsilon'_1 = \varepsilon_{inh} - \frac{d}{h} \varepsilon_{inh} \quad (2.27)$$

Sau đó, lớp thứ 2 được thêm vào, giá trị IS của lớp này là:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon'_1 + \varepsilon_{inh} = 2\varepsilon_{inh} - \frac{d}{h} \varepsilon_{inh} \quad (2.28)$$

Khi lớp thứ 3 được thêm vào, giá trị IS mới của lớp thứ 2 sẽ là:



$$\varepsilon'_2 = \varepsilon_2 - \frac{d}{h} \varepsilon_{inh} = 2\varepsilon_{inh} - \frac{2d}{h} \varepsilon_{inh} \quad (2.29)$$

Và giá trị IS trong lớp thứ 3 được tính toán như sau:

$$\varepsilon_3 = \varepsilon'_2 + \varepsilon_{inh} = 3\varepsilon_{inh} - \frac{2d}{h} \varepsilon_{inh} \quad (2.30)$$

Lặp lại quy trình SLM này cho n lớp, chúng ta có thể tính toán giá trị IS cho n lớp như sau:

$$\varepsilon_n = \varepsilon'_{n-1} + \varepsilon_{inh} = n\varepsilon_{inh} - \frac{(n-1)d}{h} \varepsilon_{inh} \quad (2.31)$$

Đối với toàn giá trị theo hướng x, y, z, chúng ta có giá trị IS như sau:

$$\begin{cases} \varepsilon_x (n \text{ lớp in}) = n\varepsilon_{inh-x} - \frac{(n-1)d}{h} \varepsilon_{inh-x} \\ \varepsilon_y (n \text{ lớp in}) = n\varepsilon_{inh-y} - \frac{(n-1)d}{h} \varepsilon_{inh-y} \\ \varepsilon_z (n \text{ lớp in}) = n\varepsilon_{inh-z} - \frac{(n-1)d}{h} \varepsilon_{inh-z} \end{cases} \quad (2.32)$$

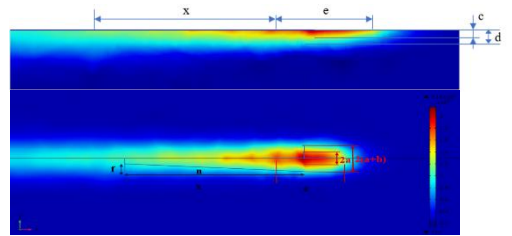
2.4.2. Quá trình in 1 lớp

Sau khi rải lớp bột đầu tiên lên bàn máy, nguồn laser tiến hành gia nhiệt theo chu trình được thiết lập sẵn. Hình sau thể hiện vùng truyền nhiệt trong quá trình in 1 đường từ trái sang phải.

Các vùng nhiệt được phân màu từ xanh nước biển đến đỏ thẫm thể hiện nhiệt

độ ban đầu của bột kim loại đến nhiệt độ nóng chảy của bột. Vị trí đỏ thẫm nhất trên hình là vị trí hiện được nguồn laser chiếu xuống. Vùng vàng cam đỏ là vùng đang trong giai đoạn gia nhiệt và nóng chảy. Tại đây, bột kim loại chuyển từ trạng thái rắn sang trạng thái lỏng, tạo thành “vùng nóng chảy”. Vùng xanh nhạt cho đến vàng – khu vực nguồn laser đã đi qua đang trong giai đoạn làm nguội và hóa rắn. Quá trình làm nguội rất nhanh này khiến vật liệu chuyển từ trạng thái lỏng sang trạng thái rắn ở nhiệt độ thấp hơn. Chính sự thay đổi nhiệt độ đột ngột đó khiến vật liệu của chi tiết in chịu một lực nén dẫn đến hình thành biến dạng nội tại ba chiều (Inherent Straint - IS), được định nghĩa như sau:

$$\varepsilon_x^* = \frac{W_x}{F_x}; \varepsilon_y^* = \frac{W_y}{F_y}; \varepsilon_z^* = \frac{W_z}{F_z} \quad (2.23)$$



Trong đó: $F_x, F_y,$ và F_z là diện tích các vùng chịu ảnh hưởng nhiệt (HAZ) do các đại lượng $W_x, W_y,$ and W_z được phân bố. Giá trị của các đại lượng $W_x, W_y,$ và W_z được tính như sau:

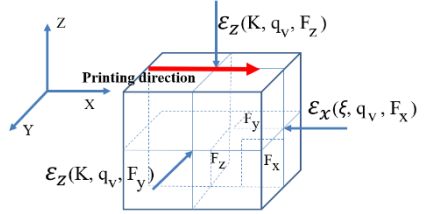
$$W_x = \xi, q_v; W_y = W_z = K \cdot q_v \quad (2.24)$$

Trong công thức trên, q_v là mật độ năng lượng tuyến tính (J/mm).

$$q_v = \frac{Q_{nguồn\ nhiệt}}{v} \quad (2.25)$$

Các giá trị ξ and K (mm/J) lần lượt là hệ số biến dạng nội tại dọc và ngang. Các biến dạng nội tại theo hướng x, y và z cho lớp đầu tiên được tính toán như sau:

$$\varepsilon_{inh-x} = -\frac{\xi \cdot q_v}{F_x}; \varepsilon_{inh-y} = -\frac{K \cdot q_v}{F_y}; \varepsilon_{inh-z} = -\frac{K \cdot q_v}{F_z} \quad (2.26)$$



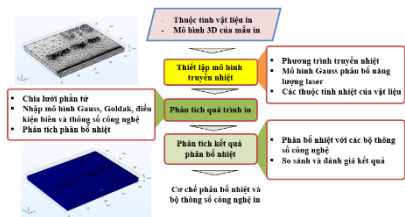
2.5. Các thông số chế độ in ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm

Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng sản phẩm in và có thể được phân loại thành bốn nhóm gồm các yếu tố liên quan đến vật liệu như đặc điểm phân bố kích thước hạt, tính chất về nhiệt của vật liệu; các yếu tố liên quan đến máy và phương pháp in; các yếu tố liên quan đến điều kiện in như sấy bột, sấy tấm nền hay không và các phương pháp xử lý sau in; các yếu tố liên quan đến chế độ in. Trong nghiên cứu này các thông số của quá trình in bao gồm công suất nguồn laser U , chiều dày lớp in t , vận tốc in V được xem xét là các thông số ảnh hưởng chính của chế độ in tới độ sai lệch hình dạng, chất lượng bề mặt và đặc điểm cấu trúc tế vi của vật liệu bột Ti6Al4V với phương pháp in SLM.

2.6. Phương pháp mô phỏng khảo sát các thông số chế độ in

Phương pháp mô phỏng cho phép xác định được khoảng giá trị bộ thông số công nghệ phù hợp nhằm phục vụ cho nghiên cứu thực nghiệm. Thông qua mô phỏng trường nhiệt độ khi in sẽ thay đổi khi thay đổi giá trị của các thông số công nghệ in.

Cơ chế phân bố nhiệt và bộ thông số công nghệ in đã được xác định ứng dụng phần mềm Comsol với các bước từ thiết lập mô hình truyền nhiệt, phân tích quá trình in tới phân tích kết quả phân bố nhiệt. Trong bước thiết lập mô hình truyền nhiệt, các mô hình nhiệt như mô hình Gauss, mô hình Goldak thể hiện năng lượng laser phân bố và các thuộc tính vật liệu được nhập vào môi trường Comsol. Để phân tích quá trình in, phương pháp phần tử hữu hạn được áp dụng, mô hình in được chia lưới cho phân tích; điều kiện biên và các thông số công nghệ in được thiết lập. Kết quả phân bố nhiệt với các bộ thông số công



nghe in khác nhau như công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in nhằm xác định được bộ thông số công nghệ in phù hợp.

2.7. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm 2^k

2.7.1. Quy hoạch thực nghiệm

Nội dung chủ yếu chọn phương pháp QHTN là trả lời cho câu hỏi: ở các mức giá trị nào và sự kết hợp như thế nào giữa các nhân tố trong thực nghiệm.

Thực nghiệm mà khi đó số mức thay đổi của tất cả các nhân tố như nhau, và tất cả tổ hợp này đều được sử dụng trong nghiên cứu gọi là thực nghiệm nhân tố toàn phần (TNT).

Nếu số mức thay đổi nhân tố là 2, và số nhân tố là k thì số thí nghiệm thực hiện là $N=2^k$. Theo kết quả TNT 2^k ta có thể nhận được phương trình hồi quy tuyến tính:

$$y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+...+b_kx_k \tag{2.33}$$

Phương trình này có thể bổ sung thêm các thành phần là tích các nhân tố, hay gọi là các tương tác $b_{ij}x_i x_j$

Thực nghiệm nhân tố riêng phần (TNR) cho phép ta giảm bớt số thí nghiệm chính so với TNT trong trường hợp phương trình hồi quy (PTHQ) có số nhỏ hơn rất nhiều so với tổng số thí nghiệm chính $N=2^k$.

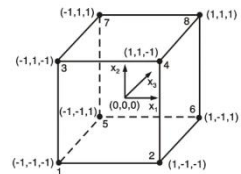
2.7.2. Quy hoạch thực nghiệm nhân tố toàn phần 2^k

Đối với TNT với 3 nhân tố, ký hiệu 2^3 , ma trận quy hoạch với các nhân tố được thể hiện trong bảng sau:

N	Nhân tố tự nhiên			Nhân tố mã hóa			Kết quả
	X ₁	X ₂	X ₃	x ₁	x ₂	x ₃	
1	X _{1min}	X _{2min}	X _{3min}	-1	-1	-1	y ₁
2	X _{1max}	X _{2min}	X _{3min}	+1	-1	-1	y ₂
3	X _{1min}	X _{2max}	X _{3min}	-1	+1	-1	y ₃
4	X _{1max}	X _{2max}	X _{3min}	+1	+1	-1	y ₄
5	X _{1min}	X _{2min}	X _{3max}	-1	-1	+1	y ₅
6	X _{1max}	X _{2min}	X _{3max}	+1	-1	+1	y ₆
7	X _{1min}	X _{2max}	X _{3max}	-1	+1	+1	y ₇
8	X _{1max}	X _{2max}	X _{3max}	+1	+1	+1	y ₈

Bảng này chỉ ra điều kiện tiến hành thực nghiệm. Trình tự tiến hành thí nghiệm không nhất thiết phải theo thứ tự trên mà theo thuận tiện chọn giá trị các nhân tố.

Các đỉnh của khối chữ nhật trong Hình 2.22 đại diện cho các mức thí nghiệm. Ở dạng mã hóa, các đỉnh này tương ứng với các đỉnh của một khối vuông. Khi số nhân tố $k > 3$, việc biểu diễn hình học trở nên rất hữu ích để hình dung nhưng lại khó thể hiện trên giấy.



Các PTHQ dạng tổng quát:

- Không có tương tác:

$$y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+...+b_kx_k \tag{2.33}$$

- Có thành phần tương tác:

$$y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+...+b_kx_k+b_{12}x_1x_2+b_{13}x_1x_3+...+b_{(k-1)k}x_{(k-1)}x_k \tag{2.37}$$

Trong nghiên cứu này, thực nghiệm nhân tố toàn phần 2^3 được sử dụng, ngoài 3 hệ số tương tác đôi x_1x_2, x_1x_3, x_2x_3 ta còn tương tác 3 nhân tố $x_1x_2x_3$, nó được gọi là tương tác bậc 2. Mô hình khi đó có dạng:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 \quad (2.38)$$

Để xác định các hệ số trong PTHQ của TNT ta sử dụng phương pháp bình phương nhỏ nhất. Sử dụng phương pháp này ta phải giải hệ phương trình với p ẩn số (p là hệ số PTHQ).

Mô hình hồi quy cũng được biểu diễn dạng hàm mũ như sau:

$$D = aU^bV^c t^d \quad (2.42)$$

Trong đó a, b, c, d là các thông số mô hình từ thực nghiệm.

Logarit hai vế của phương trình 4.3 ta có:

$$\ln(D) = \ln(a) + b \ln(U) + c \ln(V) + d \ln(t) \quad (2.43)$$

Đặt $y = \ln(D)$; $x_1 = \ln(U)$; $x_2 = \ln(V)$; $x_3 = \ln(t)$ ta có:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 \quad (2.44)$$

Với $\beta_0 = \ln(a)$; $\beta_1 = b$; $\beta_2 = c$; $\beta_3 = d$

Ma trận thiết kế X, với X được xác định như sau:

$$X = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ \mathbf{1} & x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ \mathbf{1} & x_{31} & x_{32} & x_{33} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Giá trị hàm đầu ra y:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Giá trị của các tham số:

$$\text{Với } \beta = [\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3]$$

Các giá trị β được xác định như sau (công thức OLS): Phương pháp bình phương tối thiểu [72].

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.47)$$

Từ đó các giá trị a, b, c, d được xác định như sau:

$$a = e^{\beta_0}; b = \beta_1; c = \beta_2; d = \beta_3 \quad (2.48)$$

2.7.3. Điểm trung tâm trong quy hoạch thực nghiệm 2^k

Trong quy hoạch thực nghiệm 2^k , điểm trung tâm là điểm thí nghiệm mà tất cả yếu tố đều được đặt ở mức trung bình của khoảng thí nghiệm đã chọn. Các giá trị (mã hóa) thấp và cao của mỗi biến lần lượt là ± 1 ; các điểm trung tâm là m phép đo được thực hiện khi tất cả các biến bằng 0. Thiết kế này có $2^k + m$ điểm với $m > 0$ [67].

Kết luận Chương 2

Từ nội dung được trình bày trong chương 2, có thể rút ra kết luận như sau:

1-Phân tích cơ chế in SLM và các thay đổi chuyển pha của vật liệu theo trường nhiệt độ là căn cứ xác định cơ chế hình thành ứng suất dư do nhiệt là nguyên nhân của biến dạng chi tiết in khi cất khỏi tấm nền và cách xác định giá trị ứng suất dư khi in một lớp, nhiều lớp.

2- Xây dựng được mô hình truyền nhiệt khi in với các hệ số thể hiện tính chất nhiệt của vật liệu thay đổi theo nhiệt độ; cũng như xác định được nguồn nhiệt tiêu hao, hiệu suất truyền nhiệt từ nguồn laser tới vùng nóng chảy của vật liệu;

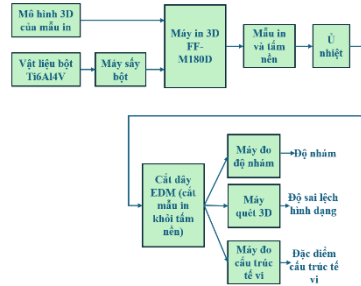
3-Phân tích các mô hình nhiệt của nguồn laser như Gauss, Goldak làm cơ sở để giải được phương trình truyền nhiệt nhằm xác định giá trị của nhiệt độ khi in 3D.

4- Xác định được các thông số công nghệ in ảnh hưởng đến năng lượng thể tích nguồn laser, ảnh hưởng đến quá trình in và sẽ dẫn đến ảnh hưởng đến chất lượng in.

CHƯƠNG 3. HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Hệ thống thiết bị được sử dụng trong nghiên cứu

Để đánh giá độ chính xác hình dạng, độ nhám và đặc điểm cấu trúc tế vi của mẫu in, các bước thí nghiệm và hệ thống thiết bị cần thiết được thể hiện trên hình 3.1. Vật liệu bột Ti6Al4V được sấy ở nhiệt độ 200 °C. Mô hình 3D của mẫu in được chia lớp trên máy tính và được tạo file G code để chuyển tới máy in. Máy in 3D FF-M180D được sử dụng để in các mẫu in. Sau in mẫu in và tẩm nền được ủ để khử ứng suất dư do nhiệt trong quá trình in. Để tách mẫu in khỏi tấm nền, máy cắt dây EDM được sử dụng. Để có được các thông số đầu ra độ chính xác hình dạng, độ nhám và đặc điểm cấu trúc tế vi, máy quét 3D, máy đo độ nhám và máy đo cấu trúc tế vi được sử dụng tương ứng.



3.1.1. Máy in 3D SLM

Dựa trên kết quả mô phỏng trên phần mềm ComsolTM, các mẫu thí nghiệm được tiến hành trên máy in kim loại SLM FF-M180D. Hình 3.2



Hình 3.2. Máy in kim loại SLM FF-M180D tại công ty 3D HONY

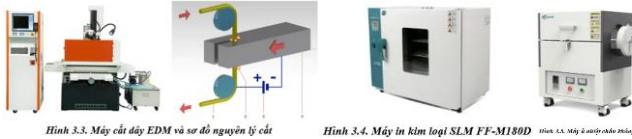
Hình 3.1. Các thông số kỹ thuật của máy như sau:

Thông số kỹ thuật	Giá trị
Diện tích xây dựng	Đường kính 180mm, chiều cao 100mm
Cài đặt tấm nền	Cỡ định to tính
Độ chính xác	+0.05mm
Độ dày lớp	0.02-0.06mm
Phương pháp trải bột	Cấp bột và trải bột hai chiều
Loại lưới	Lưới cao m
Tuần hoàn khí	30kg
Vật liệu in	Co, Ti, Cu, Ti
Số lượng laser	Laser đôi, hỗ trợ hoạt động laser đơn
Công suất laser	1000W (hai laser 500W)
Phương pháp làm mát	Nước
Đường kính tia laser	50-80µm
Khí bảo vệ	Ar/Nitrogen
Mức oxy hóa tối thiểu	0.01%
Tần số nóng chảy	3KW
Tốc độ quét	0-7m/s

thể hiện tổng thể máy in 3D FF-M180D theo phương pháp in SLM. Các thông số kỹ thuật chính của máy được thể hiện ở Bảng 3.1. với kích thước mẫu in tối

đa dạng khối trụ với D 180mm, H 100mm; công suất nguồn laser 1000W; chiều dày lớp in 0.02-0.06 mm.

3.1.2.-3.1.4. Các thiết bị được sử dụng trong thí nghiệm



Hình 3.3. Máy cắt dây EDM và sơ đồ nguyên lý cắt

Hình 3.4. Máy in kim loại SLM FF-M180D

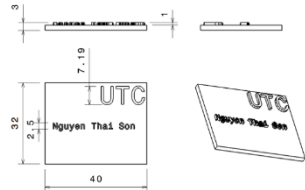
Hình 3.5. Máy đo độ nhám

3.1.5. Bột Ti6Al4V

Vật liệu bột hợp kim titan Ti6Al4V có phân bố kích thước hạt lớn trong khoảng từ 25 μm đến 63 μm được sử dụng để in các mẫu. Phân bố phần trăm kích thước đường kính hạt (d') như sau: $d' \leq 25 \mu\text{m}$ chiếm 0.8%; d' trong khoảng từ 25 μm đến 63 μm chiếm 83.4%; và $d' > 63 \mu\text{m}$ chiếm 15.8%. Vật liệu sử dụng trong thí nghiệm được lấy trực tiếp từ công ty 3D HONY.

3.1.6. Mẫu thí nghiệm

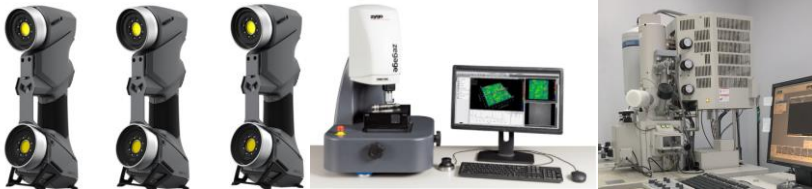
Hình dạng và kích thước của các mẫu in được thể hiện ở Hình 3.8. Kích thước của mẫu (dài x rộng x cao) lần lượt là 40x32x3 (mm).



Hình 3.8. Kích thước và hình dạng mẫu thí nghiệm

3.2. Thiết bị đánh giá chất lượng sản phẩm in

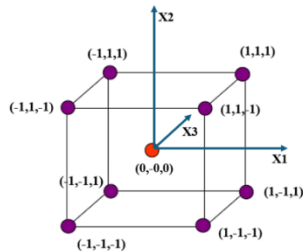
Bao gồm: Các thiết bị và phần mềm sử dụng trong đánh giá độ chính xác hình học, Thiết bị đánh giá tính chất cơ học của mẫu in và thiết bị đo (Máy scan 3D Handy Silver của Creaform, máy đo độ nhám Zygo Zegage Pro HR, Máy FESEM S4800 HITACHI)



3.3. Phương pháp nghiên cứu

3.3.1. Phương pháp mô phỏng

Trong nghiên cứu này, với mô hình nhiệt được thiết lập có xét đến tính chất vật liệu, thông số công nghệ in bao gồm công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in, và điều kiện môi trường in, kết quả của mô phỏng số là trường nhiệt độ khi in (như thể hiện trên Hình 3.15). Bộ thông số công nghệ in được xem là phù hợp cho quá trình in khi tạo ra trường nhiệt



Hình 3.16. Thiết kế thí nghiệm 3 nhân tố với hai mức đầu đủ [105, 106]

độ trong khoảng lớn hơn nhiệt độ chảy của vật liệu và nhỏ hơn nhiệt độ bay hơi của vật liệu in.

3.3.1. Phương pháp thực nghiệm

Phương pháp thiết kế thí nghiệm DOE (Design of experiments) được sử dụng phổ biến nhất là thiết kế thực nghiệm nhân tố toàn phần. Thực nghiệm mà khi đó số mức thay đổi các tất cả các nhân tố như nhau, và tất cả sự tổ hợp này đều được sử dụng để nghiên cứu gọi là thực nghiệm nhân tố toàn phần. Trong lý thuyết quy hoạch thực nghiệm thì thực nghiệm nhân tố toàn phần có rất nhiều ưu điểm so với các dạng quy hoạch khác như ước lượng độc lập các hệ số phương trình hồi quy; phương sai chính là nhỏ nhất; và xử lý kết quả thực nghiệm đơn giản nhất. Với số mức thay đổi nhân tố là 2 (giá trị tối thiểu và giá trị tối đa của các nhân tố), và số nhân tố là k thì số thí nghiệm chính phải thực hiện là $N = 2^k$ [66]. Mặt khác, để kiểm tra tính phi tuyến tính của hàm đáp ứng y , 01 thí nghiệm trung tâm được bổ sung thêm [67]. Hình 3.16 thể hiện không gian thiết kế thí nghiệm 3 nhân tố với hai mức đầy đủ có tổng số thí nghiệm là 9. Theo kết quả thực nghiệm nhân tố toàn phần 2^k ta có thể nhận được phương trình hồi quy bậc 1 như sau:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k + \sum b_{ij}x_i x_j \quad (3.1)$$

Trong phương trình trên có xét tới ảnh hưởng của đơn nhân tố cũng như ảnh hưởng tương tác giữa các nhân tố tới hàm đầu ra y .

Trong đó với thí nghiệm trung tâm (thí nghiệm 9), giá trị của các nhân tố là trung bình cộng của hai mức của mỗi nhân tố.

Trong nghiên cứu này, với 3 thông số đầu vào là công suất nguồn laser, vận tốc in và chiều dày lớp in, có 9 thí nghiệm đã được thực hiện với các dữ liệu đầu ra của thực nghiệm là dữ liệu về độ nhám, dữ liệu về sai lệch hình dạng, và dữ liệu về đặc điểm cấu trúc tế vi

Kết luận Chương 3

Từ nội dung trong chương 3, rút ra các kết luận như sau:

1-Quy trình thiết kế thí nghiệm 3 nhân tố với giá trị giới hạn của các thông số đầu vào như sau:

$$150 \leq \text{Công suất nguồn laser} \leq 350 \text{ (W)}$$

$$400 \leq \text{Vận tốc in} \leq 1500 \text{ (mm/s)}$$

$$\text{Chiều dày lớp in} \leq 0.06 \text{ (mm)}$$

2-Thông qua phương pháp mô phỏng số, bộ thông số công nghệ trên là phù hợp bởi cho giá trị của trường nhiệt độ khi in bởi giá trị nhiệt sinh ra lớn nhất lớn hơn nhiệt độ chảy và nhỏ hơn nhiệt độ sôi của vật liệu Ti6Al4V.

3-Hệ thống thiết bị bao gồm thiết bị tạo mẫu in và thiết bị xử lý dữ liệu sau in đã được xác định đảm bảo thực hiện được các phương án thí nghiệm và xử lý

Bảng 3.7. Thực nghiệm toàn phần với 3 nhân tố dạng mã hóa

N	Nhân tố tự nhiên			Nhân tố mã hóa			Kết quả thực nghiệm
1	X_{1min}	X_{2min}	X_{3min}	-1	-1	-1	y_1
2	X_{1max}	X_{2min}	X_{3min}	+1	-1	-1	y_2
3	X_{1min}	X_{2max}	X_{3min}	-1	+1	-1	y_3
4	X_{1max}	X_{2max}	X_{3min}	+1	+1	-1	y_4
5	X_{1min}	X_{2min}	X_{3max}	-1	-1	+1	y_5
6	X_{1max}	X_{2min}	X_{3max}	+1	-1	+1	y_6
7	X_{1min}	X_{2max}	X_{3max}	-1	+1	+1	y_7
8	X_{1max}	X_{2max}	X_{3max}	+1	+1	+1	y_8
9	X_{1tb}	X_{2tb}	X_{3tb}	0	0	0	y_9

kết quả thí nghiệm. Đây là cơ sở để đạt được mục tiêu xác định mối liên hệ giữa chế độ công nghệ với các chỉ tiêu chất lượng sản phẩm in được thể hiện trong chương 4.

CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ KHI IN SLM ĐẾN CÁC CHỈ TIÊU ĐẦU RA

4.1. Đặt vấn đề

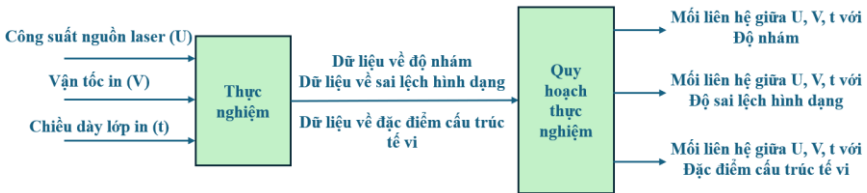
Trên cơ sở phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ bao gồm công suất nguồn laser, vận tốc in và chiều dày lớp in đến phân bố trường nhiệt độ khi in thông qua phương pháp số và mô hình phần tử hữu hạn như đề cập trong chương 2 và chương 3. Khi thay đổi giá trị của bộ thông số công nghệ này thì giá trị trường nhiệt độ cũng thay đổi.

Từ kết quả phân tích mô phỏng, để đảm bảo nhiệt độ khi in trong giới hạn lớn hơn nhiệt độ chảy của vật liệu và nhỏ hơn nhiệt độ sôi của vật liệu, bộ thông số công nghệ khi in đã được xác định bao gồm:

$$150 \leq \text{Công suất nguồn laser} \leq 350 \text{ (W)}$$

$$400 \leq \text{Vận tốc in} \leq 1500 \text{ (mm/s)}$$

$$0.03 \leq \text{Chiều dày lớp in} \leq 0.06 \text{ (mm)}$$



4.2. Thí nghiệm

4.2.1. Mục đích thí nghiệm

Nghiên cứu thực nghiệm đã được tiến hành nhằm xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ bao gồm công suất nguồn laser, vận tốc in, chiều dày lớp in đến các chỉ tiêu đầu ra bao gồm độ sai lệch hình dạng, độ nhám bề mặt, cấu trúc tế vi của chi tiết được in trên máy in SLM với vật liệu bột Ti6Al4V.

4.2.2. Thiết kế thí nghiệm

Trong nghiên cứu này 3 thông số công nghệ được sử dụng để nghiên cứu đó là: Công suất nguồn laser (W); vận tốc in (mm/s), chiều dày lớp in (mm). Để đánh giá ảnh hưởng các thông số quá trình đến chất lượng in, thí nghiệm 2 mức đầy đủ với 3 yếu tố được dùng để thiết kế thí nghiệm. 8 mẫu thí nghiệm và

Bảng 4.1. Bộ thông số công nghệ in SLM

STT	Công suất nguồn laser (W)	Vận tốc in (mm/s)	Chiều dày lớp in (μm)
1	150	400	30
2	350	400	30
3	150	1500	30
4	350	1500	30
5	150	400	60
6	350	400	60
7	150	1500	60
8	350	1500	60
9	250	950	45

01 thí nghiệm trung tâm đã được thực hiện với các giá trị thay đổi của bộ 03 thông số nêu trên. Thiết kế thí nghiệm được thể hiện ở Bảng 4.1.

4.2.3. Tiến hành thí nghiệm

4.2.3.1. In các mẫu

Trên cơ sở dữ liệu từ thiết kế thí nghiệm, các mẫu in đã được



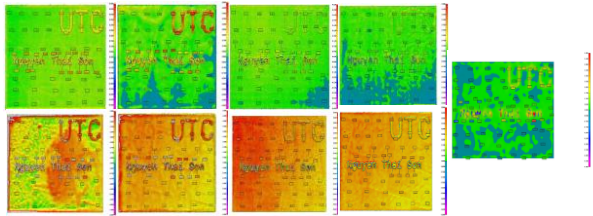
in trên máy in 3D kim loại SLM FF-M180D. Bột hợp kim Ti6Al4V đã được sấy lên 200⁰C trước khi in.

Các mẫu in sau khi in xong được tách khỏi tấm nền sử dụng máy cắt dây EDM.

4.2.3.2. Đo độ sai lệch hình dạng

Để xác định độ sai lệch hình dạng của mẫu in, các mẫu in được quét 3D. Dữ liệu quét 3D của mỗi mẫu được so sánh với mô hình 3D CAD gốc ban đầu.

Các bước xác định độ sai lệch hình dạng của mẫu in được thể hiện trên Hình 4.2.



Để tạo mô hình 3D của các mẫu in, máy quét 3D HandySCAN với

phương pháp quét 3D không tiếp xúc được sử dụng. Các mẫu in được quét; dữ liệu quét là một đám mây điểm. Phần mềm Geometric được sử dụng để xử lý dữ liệu đám mây điểm thành các bề mặt. Sau đó các bề mặt này được xử lý thành khối rắn để so sánh với mô hình ban đầu của mẫu in để xác định độ lệch hình dạng.

Các kết quả đo độ sai lệch hình dạng cho các mẫu được thể ở hình trên trong đó màu đỏ tương ứng với độ lệch dương (kích thước mẫu lớn hơn kích thước yêu cầu); màu xanh dương tương ứng với độ lệch âm (kích thước mẫu nhỏ hơn kích thước yêu cầu); và màu xanh lá cây tương ứng với độ lệch bằng không (kích thước mẫu bằng kích thước yêu cầu).

4.2.3.3. Đo độ nhám

Để xác định độ nhám của mẫu in, máy đo Zygo Zegage Pro HR tại Học viện Kỹ thuật quân sự đã được sử dụng, các bước để xác định độ nhám được thể hiện

Bảng 4.3. Kết quả đo S_a, S_w, S_p, và R_a.

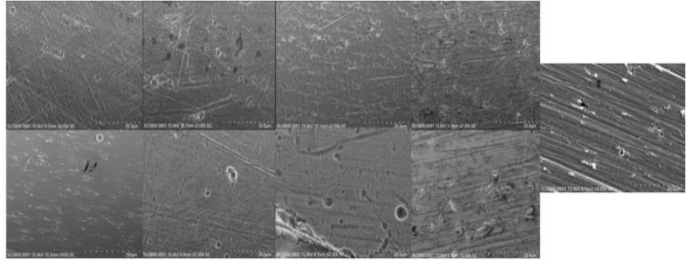
Mẫu in	Vùng đo	S _a (um)	S _w (um)	S _p (um)	R _a (um)
Mẫu 1	Vùng đo 1	6,078	5,303	33,317	3,925
	Vùng đo 2	3,974	7,280	58,000	6,012
	Ghi in trung bình	4,840	6,244	58,841	5,088
	Vùng đo 1	4,836	6,188	48,417	5,107
	Vùng đo 2	4,823	5,973	58,200	5,318
Mẫu 2	Vùng đo 1	4,205	6,965	43,235	4,332
	Ghi in trung bình	4,217	6,046	48,660	4,338
	Vùng đo 1	13,263	16,372	134,237	12,634
	Vùng đo 2	11,623	14,699	109,619	10,809
	Ghi in trung bình	12,338	15,396	97,725	15,365
Mẫu 3	Vùng đo 1	12,886	15,136	166,027	13,902
	Ghi in trung bình	16,250	19,711	107,143	18,372
	Vùng đo 1	15,220	20,223	111,833	14,188
	Vùng đo 2	13,261	22,865	129,179	17,296
	Ghi in trung bình	15,589	19,289	108,926	15,761
Mẫu 4	Vùng đo 1	8,296	10,887	69,603	7,905
	Vùng đo 2	7,965	10,177	68,697	8,275
	Ghi in trung bình	8,071	11,519	81,673	8,553
	Vùng đo 1	7,981	9,972	62,108	9,273
	Vùng đo 2	7,316	9,818	79,113	7,908
Mẫu 5	Vùng đo 1	6,556	8,691	95,761	7,213
	Ghi in trung bình	7,658	9,463	78,367	7,198
	Vùng đo 1	20,283	24,982	132,778	23,323
	Vùng đo 2	22,407	36,677	106,244	23,817
	Ghi in trung bình	20,619	24,987	118,740	24,825
Mẫu 6	Vùng đo 1	10,594	13,813	108,427	9,833
	Vùng đo 2	11,857	14,616	105,167	10,727
	Ghi in trung bình	12,293	16,429	94,039	10,212
	Vùng đo 1	13,914	15,019	89,953	10,362
	Ghi in trung bình	7,282	20,971	12,420	7,421
Mẫu 7	Vùng đo 1	7,245	10,465	87,234	9,348
	Vùng đo 2	6,263	11,523	79,113	6,263
	Ghi in trung bình	6,748	9,427	83,889	7,407

trên Hình 4.5. Nhằm tăng độ chính xác khi đo, mỗi mẫu in được đo tại 3 vùng đo, giá trị độ nhám được tính là giá trị trung bình tại 3 vùng đo này.

Với 9 mẫu in, mỗi mẫu tiến hành đo tại 3 vùng khác nhau với các chỉ tiêu độ nhám gồm R_a , S_a và S_z , như thể hiện tại Bảng 4.5. Trong nghiên cứu này, chỉ tiêu R_a được sử dụng để đánh giá độ nhám của mẫu in.

4.2.3.3. Đặc điểm cấu trúc tế vi

Đặc điểm cấu trúc tế vi có vai trò quyết định đến tính chất cơ lý, hóa học và nhiệt học của vật liệu. Trong nghiên cứu này, thông qua các kết quả kiểm tra cấu trúc tế vi trên máy FESEM S4800 HITACHI tại Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, các khuyết tật và lỗ hổng trong các mẫu in ở cấp độ micromet đã được đánh giá. Phần mềm ImageJ được sử dụng để xử lý hình ảnh, từ đó đánh giá được độ xốp, đặc của mẫu in. Các kết quả kiểm tra cấu trúc tế vi cho các mẫu được thể hiện ở hình bên.



4.3. Kết quả và bàn luận

4.3.1. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ in tới sai lệch hình dạng

Với mục đích thiết lập mô hình hồi quy thể hiện mối liên hệ giữa thông số công nghệ in với thông số đầu ra là độ sai lệch hình dạng mẫu in, tiến hành quét và xử lý dữ liệu 3D các mẫu in. Kết quả độ sai lệch hình dạng (D) lớn nhất của mỗi mẫu in được thể hiện ở Bảng 4.7.

Phương trình hồi quy độ sai lệch hình dạng:

$$D = 376.908 U^{0.162} V^{-0.595} t^{1.217}$$

4.3.2. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ in đến độ nhám bề mặt

Từ kết quả thực nghiệm, kết quả đo độ nhám bề mặt R_a (1D) và S_a (2D) được thể hiện ở Bảng 4.11.

Phương trình hồi quy độ nhám bề mặt:

$$R_a = 1.0005 U^{-0.329} V^{0.781} t^{0.397}$$

$$S_a = 1.6372 U^{-0.194} V^{0.627} t^{0.442}$$

Bảng 4.7. Kết quả đo độ sai lệch hình dạng lớn nhất của các mẫu in

Mẫu in	Công suất nguồn laser (W)	Vận tốc in V (mm/s)	Chiều dày lớp in t (mm)	Độ sai lệch hình dạng D (mm)
1	150	400	0.030	0.319
2	350	400	0.030	0.611
3	150	1500	0.030	0.142
4	350	1500	0.030	0.121
5	150	400	0.060	0.682
6	350	400	0.060	0.664
7	150	1500	0.060	0.447
8	350	1500	0.060	0.370
9	250	950	0.045	0.417

Bảng 4.11. Kết quả đo độ nhám R_a và S_a của các mẫu in

Mẫu in	Công suất nguồn laser U (W)	Vận tốc in V (mm/s)	Chiều dày lớp in t (mm)	Độ nhám R_a (µm)	Độ nhám S_a (µm)
1	150	400	0.03	5.088	4.840
2	350	400	0.03	3.319	4.717
3	150	1500	0.03	13.902	12.886
4	350	1500	0.03	15.751	15.588
5	150	400	0.06	6.553	9.071
6	350	400	0.06	7.198	7.558
7	150	1500	0.06	24.025	20.610
8	350	1500	0.06	10.362	11.924
9	250	950	0.045	7.407	6.745

4.3.3. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ in tới độ xốp

Từ kết quả kiểm tra cấu trúc tế vi của các mẫu in, các khuyết tật như lỗ hồng do bột vật liệu không được in, hạt vật liệu không nóng chảy vẫn còn tồn tại ở một số mẫu in. Kết quả cụ thể thể hiện ở Bảng 4.16.

Phương trình hồi quy độ xốp:

$$P = 49.853 U^{-0.284} V^{0.181} t^{0.548}$$

4.4. Chế độ công nghệ in tối ưu

4.4.1. Chế độ công nghệ in tối ưu với đơn mục tiêu về chất lượng

Độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất khi $U = 150 \text{ W}$; $V = 1500 \text{ mm/s}$, và $t = 0.03 \text{ mm}$.

Độ nhám và độ xốp nhỏ nhất khi $U = 350 \text{ W}$; $V = 400 \text{ mm/s}$, và $t = 0.03 \text{ mm}$.

4.4.2. Chế độ công nghệ in tối ưu với đa mục tiêu về chất lượng

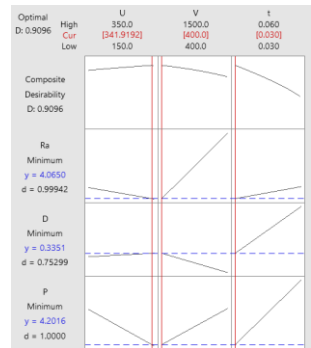
Trong xem xét chế độ công nghệ để đạt được đa mục tiêu về chỉ tiêu chất lượng như độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất, độ nhám bề mặt nhỏ nhất, và độ xốp nhỏ nhất.

$$\begin{cases} D = 376.908 U^{0.162} V^{-0.595} t^{1.217} \rightarrow \min \\ Ra = 1.0005 U^{-0.329} V^{0.781} t^{0.397} \rightarrow \min \\ P = 49.853 U^{-0.284} V^{0.181} t^{0.548} \rightarrow \min \end{cases}$$

Thông số công nghệ để đạt được bài toán đa mục tiêu: $U = 341.919 \text{ W}$; $V = 400 \text{ mm/s}$, và $t = 0.03 \text{ mm}$.

Bảng 4.16. Kết quả đo độ xốp của các mẫu in

Mẫu in	Công suất nguồn laser U (W)	Vận tốc in V (mm/s)	Chiều dày lớp in t (mm)	Độ xốp (%)
1	150	400	0.03	7.810
2	350	400	0.03	3.780
3	150	1500	0.03	4.581
4	350	1500	0.03	7.022
5	150	400	0.06	7.345
6	350	400	0.06	5.565
7	150	1500	0.06	12.375
8	350	1500	0.06	9.548
9	250	950	0.045	3.563



Kết luận chương 4

Từ nội dung và kết quả chương 4 rút ra các kết luận sau:

1-Từ qui hoạch thực nghiệm đã xây dựng được mối quan hệ phụ thuộc của các yếu tố đầu ra với các tham số đầu vào: Giá trị độ sai lệch hình dạng nhỏ đạt được khi vận tốc in lớn; trong khi giá trị chiều dày lớp in nhỏ, độ sai lệch hình dạng giảm khi vận tốc in tăng và giá trị công suất nguồn laser trung bình trong phạm vi khảo sát là từ 150 W đến 350 W.

2 - Với chiều dày lớp in $t = 0.03$ mm, chi tiết in sẽ có độ sai lệch hình dạng nhỏ hơn 0.2 mm khi giá trị vận tốc in nằm trong khoảng $V = 1250$ đến 1500 mm/s và giá trị công suất nguồn laser nằm trong khoảng $U = 150$ đến 350 W.

3 - Với $t = 0.05$ mm và $t = 0.06$ mm, để đạt được độ sai lệch hình dạng nhỏ hơn $D = 0.3$ mm, cần có giá trị U và V lớn. Trong nghiên cứu này, độ sai lệch hình dạng lớn nhất là 0.682 mm tương ứng với các thông số công nghệ in bao gồm công suất nguồn laser $U = 150$ W, vận tốc in $V = 400$ mm/s và chiều dày lớp in $t = 0.06$ mm.

4 - Các thông số quy trình in tối ưu đạt được với $t = 0.03$ mm, $U = 350$ W và $V = 1500$ mm/s tương ứng với $D = 0.1207$ mm.

5 - Khi V , t tăng đều cho giá trị độ nhám bề mặt Ra lớn, trong khi tăng công suất nguồn laser U sẽ cho giá trị độ nhám bề mặt nhỏ. Khi tăng giá trị công suất nguồn laser U khả năng nóng chảy kim loại sẽ tốt hơn nên chất lượng bề mặt thu được của chi tiết sau in sẽ tốt hơn.

6 - Xét trong mối liên hệ với giá trị độ nhám bề mặt của các mẫu in, mẫu in có giá trị độ nhám nhỏ nhất (bề mặt mịn) $Ra = 3.319$ μm với chế độ in công suất nguồn laser $U = 350$ W, vận tốc in $V = 400$ mm/s, chiều dày lớp in $t = 0.03$ mm, tương ứng với cấu trúc tế vi đồng đều nhất, có một số ít các lỗ hồng nhỏ. Mẫu in có giá trị độ nhám lớn nhất (bề mặt thô) $Ra = 24.025$ μm với chế độ in công suất nguồn laser 150 W, vận tốc in $V = 1500$ mm/s, chiều dày lớp in $t = 0.06$ mm, tương ứng với cấu trúc tế vi có nhiều khuyết tật như lỗ hồng lớn, hạt kim loại lớn.

7 - Trong xem xét chế độ công nghệ để đạt được đa mục tiêu về chỉ tiêu chất lượng như độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất, độ nhám bề mặt nhỏ nhất, và độ xốp nhỏ nhất, bộ thông số công nghệ để đạt được bài toán đa mục tiêu là: $U = 350$ W; $V = 500$ mm/s, và $t = 0.03$ mm.

KẾT LUẬN CHUNG VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

a) Kết luận chung

Từ nội dung và kết quả đạt được của luận án, có thể rút ra các kết luận sau:

1 - Với đặc tính vật liệu, trường nhiệt thay đổi trạng thái pha của vật liệu đã được phân tích làm cơ sở xác định bộ thông số công nghệ phù hợp để đạt được nhiệt độ nóng chảy vật liệu Ti6Al4V là trên 1877 K và nhỏ hơn nhiệt độ bay hơi là 3533 K; mặt khác các tính chất nhiệt của vật liệu như nhiệt dung, hệ số dẫn nhiệt thay đổi theo nhiệt độ và trạng thái chuyển đổi pha cũng đã được xác định.

2 - Với phương pháp in SLM, cơ chế in SLM đã được phân tích để xác định các ứng xử cơ – nhiệt – hóa của vật liệu trong quá trình in. Xây dựng mô hình truyền nhiệt với các thông số chính bao gồm đặc tính vật liệu (nhiệt dung, hệ số dẫn nhiệt); chế độ in (vận tốc in, nguồn laser). Mặt khác, xác định được mô hình nhiệt và năng lượng nhiệt tổn hao.

3 - Với điều kiện in, các xử lý trước in (gia nhiệt bột in lên 2000C), các xử lý sau in (ủ cả mẫu in và tấm nền) đã được áp dụng nhằm giảm ứng suất dư do nhiệt.

4 - Với chế độ công nghệ in, bộ thông số công nghệ in bao gồm công suất nguồn laser, chiều dày lớp in, vận tốc in đã được nghiên cứu để xác định ảnh hưởng của bộ thông số công nghệ này tới độ nhám bề mặt; độ chính xác hình dạng, và đặc điểm cấu trúc tế vi. Với chế độ công nghệ in trong mối liên hệ với các chỉ tiêu chất lượng, các kết quả đạt được bao gồm:

- Thiết lập được phương trình truyền nhiệt khi in theo phương pháp in SLM, trong đó nguồn năng lượng tiêu hao đã được xác định. Phương trình truyền nhiệt với mô hình nguồn laser theo phân bố Gauss đã được sử dụng để sinh trường nhiệt độ khi in. Giá trị của trường nhiệt độ rất quan trọng, làm cơ sở để xác định năng lượng laser E và bộ thông số công nghệ in phù hợp.

- Thiết lập được mô hình toán thể hiện mối liên hệ giữa độ sai lệch hình dạng (D), độ nhám bề mặt (Ra) và độ xốp với các thông số công nghệ in gồm công suất nguồn laser U ; vận tốc in V (mm/s) và chiều dày lớp in t (mm).

- Xác định được bộ thông số công nghệ in tối ưu thảo mãn bài toán tối ưu đơn mục tiêu và đa mục tiêu và đạt được đồng thời độ sai lệch hình dạng nhỏ nhất, độ nhám nhỏ nhất và độ chặt lớn nhất

b) Hướng nghiên cứu tiếp theo:

Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu đã đạt được làm cơ sở để tiến hành các nghiên cứu kiểm soát chất lượng ngay trong quá trình in với việc ứng dụng thông minh nhân tạo nhằm giảm thiểu lỗi khi in và tiến hành nghiên cứu in 3D các sản phẩm có bề mặt phức tạp.

**DANH MỤC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ
LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN**

1. Tran Ngoc Hien, **Nguyen Thai Son**, Prediction of part distortion in metal. 3D printing. Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 6, năm 2021, trang 225-229
2. Ngoc-Hien Tran and **Thai-Son Nguyen**, “Calculating the Inherent Strain in 3D Printed Part Based on the Heat Affected Zone”, In: Long, B.T., et al. Proceedings of the 3rd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development (MMMS 2022). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-31824-5_12, Scopus.
3. **Nguyễn Thái Sơn**, Trần Ngọc Hiền, “Nghiên cứu thực nghiệm về ảnh hưởng các thông số công nghệ in 3D kim loại đến chất lượng sản phẩm in”, Tạp chí Cơ khí số 309, tháng 11, 2023.
4. **Thai-Son Nguyen** and Ngoc-Hien Tran, “Study on optimization of 3D printing parameters for part quality”, Proceedings of the 4th Annual International Conference on Material, Machines, and Methods for Sustainable Development (MMMS2024), <https://doi.org/10.1007/978-031-93816-0-8>, Scopus.
5. Ngoc-Hien Tran, **Thai-Son Nguyen**, Chapter 6: Additive Manufacturing and 3D Printing Revolution in Industry 5.0. In Book: Digital Manufacturing in Industry 5.0; Publisher: Springer Nature; Editor: Dr. Yogesh Kumar Singla, Dr. Ashwani Kumar, Dr. Michael R. Maughan; ISBN-13.978-3031914997; Publication date: 23 Jan. 2026.
6. **Nguyễn Thái Sơn**, Nguyễn Chí Sáng, Trần Ngọc Hiền, Nghiên cứu mô phỏng phân bố nhiệt trong công nghệ sản xuất bồi đắp. Tạp chí Cơ khí Việt Nam; số 331, 2025.
7. **T. S. Nguyen** and N. H. Tran, “An Experimental Investigation of the Shape Deviation of SLM Printed Parts”, Eng. Technol. Appl. Sci. Res., vol. 15, no. 5, pp. 26757–26764, Oct. 2025. <https://doi.org/10.48084/etasr.12777>
8. **Thai-Son Nguyen**, Ngoc-Hien Tran, Surface Roughness and Microstructure Characterization of the SLM printed Parts. EUREKA: Physics and Engineering, Scopus, 5(60), 117-131. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2025.003907>