

NGHIÊN CỨU ỨNG DỤNG PHƯƠNG PHÁP IN 3D TỪ VẬT LIỆU LỎNG TRONG CHẾ TẠO CHI TIẾT CÓ KẾT CẤU DẠNG LATTICE

RESEARCH ON THE APPLICATION OF 3D PRINTING USING LIQUID MATERIALS IN THE MANUFACTURING OF LATTICE-STRUCTURED COMPONENTS

Nguyễn Dương Quang Huy, Tạ Nguyễn Minh Đức, Huỳnh Quang Duy, Nguyễn Văn Sơn*

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

Email: 22144100@student.hcmute.edu.vn; ductnm@hcmute.edu.vn;

duyhq@hcmute.edu.vn; *sonnv@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Công nghệ in 3D bằng vật liệu lỏng (như SLA, DLP) ngày càng được ứng dụng rộng rãi nhờ khả năng tạo ra các chi tiết có độ chính xác cao và hình dạng phức tạp. Trong đó, kết cấu dạng lattice (mạng lưới rỗng với cấu trúc lặp) được sử dụng phổ biến trong các lĩnh vực như y sinh, hàng không, ô tô... nhờ đặc tính nhẹ, chịu tải tốt và khả năng hấp thụ năng lượng. Nghiên cứu này tập trung vào việc ứng dụng phương pháp in 3D từ vật liệu lỏng để chế tạo chi tiết có kết cấu dạng lattice. Phương pháp này bao gồm các công nghệ tiên tiến như SLA và DLP, sử dụng vật liệu nhựa quang hóa để tạo ra các chi tiết có độ chính xác cao. Kết cấu lattice được thiết kế để giảm trọng lượng, đảm bảo khả năng chịu tải và hấp thụ năng lượng hiệu quả. Kết quả nghiên cứu và thảo luận cho thấy tiềm năng to lớn của công nghệ in 3D từ vật liệu lỏng trong việc sản xuất các chi tiết kỹ thuật với độ chính xác và hiệu suất cao. Công nghệ này có thể tạo ra các sản phẩm có hình dạng phức tạp và đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật đặc thù.

Từ khóa: Công nghệ in 3D; SLA; DLP; Kết cấu dạng lattice.

ABSTRACT

3D printing technology using liquid materials (such as SLA and DLP) is increasingly popular due to its ability to produce highly precise and complex-shaped components. Lattice structures (hollow networks with repeating patterns) are widely used in fields like biomedicine, aerospace, and automotive, thanks to their lightweight nature, load-bearing capacity, and energy absorption. This research focuses on applying liquid material 3D printing to fabricate components with lattice structures. This method includes advanced technologies like SLA and DLP, using photopolymer resins to create highly accurate parts. Lattice structures are designed to reduce weight while ensuring load-bearing capacity and efficient energy absorption. Research results and discussion highlight the significant potential of liquid material 3D printing in producing high-precision and high-performance technical components. This technology can create complex-shaped products and meet specific technical requirements.

Keywords: 3D printing technology; SLA; DLP; Lattice structure.

1. TỔNG QUAN

Công nghệ in 3D, hay còn gọi là sản xuất đắp dần (additive manufacturing - AM), đã trở thành một bước đột phá trong lĩnh vực chế tạo, cho phép tạo ra các chi tiết phức tạp với độ chính xác cao mà không cần các phương pháp gia công truyền thống như cắt gọt hay đúc [1]. Trong số các kỹ thuật in 3D, phương pháp sử dụng vật liệu lỏng, chẳng hạn như nhựa quang hóa (photopolymer resin) hoặc vật liệu polymer lỏng, đã thu hút sự chú ý nhờ khả năng tạo ra các chi tiết có độ phân giải cao và cấu trúc phức tạp, đặc biệt là các kết cấu dạng lattice [2]. Kết cấu lattice, với đặc trưng là các mạng lưới lặp lại của các đơn vị ô (unit cells), mang lại các ưu điểm vượt trội như trọng lượng nhẹ, độ bền cao và khả năng hấp thụ năng lượng tốt, khiến chúng trở thành lựa chọn lý tưởng trong nhiều ứng dụng từ hàng không vũ trụ, y sinh đến cơ khí chế tạo [3]. Bài báo này tập trung vào việc nghiên cứu ứng dụng phương pháp in 3D từ vật liệu lỏng để chế tạo các chi tiết có kết cấu dạng lattice, phân tích tiềm năng, thách thức và các hướng phát triển trong tương lai.

Công nghệ in 3D từ vật liệu lỏng chủ yếu dựa trên các phương pháp như lập thể in quang (Stereolithography - SLA), xử lý ánh sáng kỹ thuật số (Digital Light Processing - DLP) và in phun liên tục (Continuous Liquid Interface Production - CLIP) [4]. Các phương pháp này sử dụng ánh sáng (thường là tia UV hoặc laser) để làm cứng từng lớp vật liệu lỏng, thường là nhựa quang hóa, theo mô hình được thiết kế trước. Điểm nổi bật của các phương pháp này là khả năng đạt độ phân giải cao, thậm chí ở mức micromet, phù hợp để chế tạo các chi tiết có cấu trúc phức tạp như lattice [5].

So với các kỹ thuật in 3D khác như ép đùn vật liệu (Fused Deposition Modeling -

FDM) hay thiêu kết laser chọn lọc (Selective Laser Sintering - SLS), in 3D từ vật liệu lỏng có ưu điểm về độ mịn bề mặt và khả năng tái hiện chi tiết. Tuy nhiên, hạn chế của phương pháp này bao gồm chi phí vật liệu cao, thời gian xử lý sau in (post-processing) phức tạp và sự phụ thuộc vào tính chất cơ học của vật liệu lỏng [6]. Các nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc cải tiến vật liệu lỏng, chẳng hạn như phát triển nhựa composite hoặc nhựa sinh học, nhằm nâng cao độ bền và khả năng ứng dụng trong các môi trường khắc nghiệt [7].

(*) Kết cấu lattice và vai trò trong chế tạo hiện đại

Kết cấu lattice là các cấu trúc không gian ba chiều được tạo thành từ các đơn vị ô lặp lại, chẳng hạn như hình lập phương, lục giác hoặc cấu trúc giàn (truss) [8]. Nhờ vào thiết kế tối ưu hóa, các kết cấu này có thể đạt được tỷ lệ độ bền trên trọng lượng cao, đồng thời cho phép kiểm soát các tính chất cơ học như độ cứng, độ dẻo hoặc khả năng hấp thụ năng lượng [9]. Trong lĩnh vực hàng không vũ trụ, các chi tiết lattice được sử dụng để giảm trọng lượng của các bộ phận như cánh máy bay hoặc khung vệ tinh mà vẫn đảm bảo độ bền cơ học [10]. Trong y sinh, cấu trúc lattice được ứng dụng trong sản xuất các khung xương nhân tạo (scaffolds) nhờ khả năng tương thích sinh học và cấu trúc xốp phù hợp với sự phát triển của tế bào [11].

Việc chế tạo kết cấu lattice bằng các phương pháp truyền thống như đúc hoặc gia công CNC thường gặp khó khăn do độ phức tạp hình học và chi phí sản xuất cao. Công nghệ in 3D, đặc biệt là từ vật liệu lỏng, đã mở ra cơ hội để chế tạo các cấu trúc này với độ chính xác cao và thời gian sản xuất ngắn hơn [12]. Tuy nhiên, việc thiết kế và tối ưu hóa kết cấu lattice đòi



hỏi sự kết hợp giữa mô phỏng số (finite element analysis - FEA) và các thuật toán tối ưu hóa topo (topology optimization) để đảm bảo hiệu suất tối ưu [13].

(*) Ứng dụng của in 3D từ vật liệu lỏng trong chế tạo kết cấu lattice

Phương pháp in 3D từ vật liệu lỏng đã được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực nhờ khả năng tạo ra các chi tiết lattice có độ phức tạp cao. Trong ngành hàng không vũ trụ, các nhà nghiên cứu đã sử dụng kỹ thuật SLA để chế tạo các cấu trúc lattice làm từ nhựa composite, giúp giảm 30-40% trọng lượng của các chi tiết so với vật liệu rắn truyền thống [10]. Trong y sinh, các khung xương nhân tạo được in bằng kỹ thuật DLP từ nhựa sinh học đã cho thấy khả năng hỗ trợ tái tạo mô và tích hợp tốt với cơ thể người [11].

Ngoài ra, trong lĩnh vực cơ khí, các cấu trúc lattice được chế tạo từ vật liệu lỏng có thể được sử dụng làm bộ phận hấp thụ năng lượng trong các hệ thống giảm chấn hoặc vỏ bảo vệ. Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng các cấu trúc lattice với thiết kế phân cấp (hierarchical lattice) có thể tăng khả năng hấp thụ năng lượng lên đến 50% so với các cấu trúc đồng nhất [14]. Tuy nhiên, để đạt được hiệu quả tối ưu, cần phải giải quyết các thách thức liên quan đến tính chất cơ học của vật liệu lỏng, chẳng hạn như độ giòn hoặc khả năng chịu nhiệt độ cao.

Mặc dù có nhiều tiềm năng, việc ứng dụng in 3D từ vật liệu lỏng trong chế tạo kết cấu lattice vẫn đối mặt với một số thách thức. Thứ nhất, tính chất cơ học của vật liệu lỏng, đặc biệt là nhựa quang hóa, thường bị hạn chế bởi độ bền kéo và khả năng chịu tải thấp so với kim loại hoặc polymer rắn [6]. Các nghiên

cứu đang tập trung vào việc phát triển vật liệu composite lỏng, kết hợp các hạt nano hoặc sợi để cải thiện tính chất cơ học, nhưng chi phí sản xuất vẫn là một rào cản lớn [7].

Thứ hai, quy trình in 3D từ vật liệu lỏng đòi hỏi các bước xử lý sau in phức tạp, bao gồm rửa, làm cứng bằng UV và loại bỏ vật liệu hỗ trợ (support structures). Những bước này không chỉ làm tăng thời gian sản xuất mà còn có thể ảnh hưởng đến độ chính xác của chi tiết, đặc biệt với các cấu trúc lattice có kích thước nhỏ [5]. Thứ ba, việc tối ưu hóa thiết kế lattice để đạt được hiệu suất tối đa đòi hỏi sự kết hợp giữa phần mềm thiết kế, mô phỏng và thử nghiệm thực tế, dẫn đến chi phí tính toán và thời gian phát triển cao [13].

Để vượt qua các thách thức trên, các hướng nghiên cứu trong tương lai cần tập trung vào ba khía cạnh chính: phát triển vật liệu mới, cải tiến công nghệ in và tối ưu hóa thiết kế. Về vật liệu, các loại nhựa lỏng có tính chất cơ học cải tiến, chẳng hạn như nhựa sinh học hoặc nhựa chịu nhiệt, sẽ mở rộng phạm vi ứng dụng của kết cấu lattice [7]. Về công nghệ, các phương pháp in 3D tốc độ cao như CLIP có thể giảm thời gian sản xuất và cải thiện hiệu suất của quy trình [4]. Về thiết kế, việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) và học máy (machine learning) trong tối ưu hóa topo và thiết kế lattice có thể giúp tạo ra các cấu trúc hiệu quả hơn với chi phí thấp hơn [9].

Ngoài ra, việc tích hợp in 3D từ vật liệu lỏng với các công nghệ khác, chẳng hạn như in 4D (sử dụng vật liệu có khả năng thay đổi hình dạng theo thời gian), có thể mở ra các ứng dụng mới trong các lĩnh vực như robot mềm hoặc thiết bị y tế thông minh [12]. Các nghiên cứu liên ngành giữa kỹ thuật vật liệu, cơ khí và công nghệ thông tin sẽ đóng vai trò quan trọng

trong việc thúc đẩy sự phát triển của công nghệ này.

Công nghệ in 3D từ vật liệu lỏng đã chứng minh tiềm năng to lớn trong việc chế tạo các chi tiết có kết cấu dạng lattice, mang lại lợi ích về trọng lượng, độ bền và tính linh hoạt trong thiết kế. Tuy nhiên, để ứng dụng rộng rãi trong thực tiễn, cần phải giải quyết các thách thức liên quan đến vật liệu, quy trình sản xuất và tối ưu hóa thiết kế. Với sự tiến bộ của khoa học vật liệu và công nghệ in 3D, kết cấu lattice được chế tạo từ vật liệu lỏng hứa hẹn sẽ đóng vai trò quan trọng trong các ngành công nghiệp hiện đại, từ hàng không vũ trụ đến y sinh và cơ khí chế tạo.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Cơ sở lý thuyết của nghiên cứu ứng dụng phương pháp in 3D từ vật liệu lỏng trong chế tạo chi tiết có kết cấu dạng lattice bao gồm các khía cạnh chính như sau. Công nghệ in 3D từ vật liệu lỏng, bao gồm SLA (Stereolithography) và DLP (Digital Light Processing), sử dụng vật liệu nhựa quang hóa có khả năng đông cứng dưới tác động của ánh sáng, cho phép tạo ra các chi tiết có độ chính xác cao và hình dạng phức tạp. Kết cấu lattice, với mạng lưới rỗng và cấu trúc lặp, được thiết kế để giảm trọng lượng mà vẫn đảm bảo khả năng chịu tải tốt, đồng thời có khả năng hấp thụ năng lượng hiệu quả trong các ứng dụng yêu cầu độ bền cao và tiết kiệm vật liệu. Các phân tích cơ học thông qua mô hình toán học và phương pháp phần tử hữu hạn (FEA) giúp dự đoán hành vi của kết cấu lattice dưới tác động của lực, từ đó phân tích ứng suất, biến dạng và khả năng chịu tải để tối ưu hóa thiết kế. Trong thực tiễn, công nghệ này được ứng dụng rộng rãi trong y sinh để sản xuất các thiết bị cấy ghép và mô hình giải phẫu, trong hàng không để chế tạo các bộ phận máy bay

nhẹ mà bền và trong ngành ô tô để sản xuất các chi tiết nhẹ, chịu lực tốt, giúp cải thiện hiệu suất vận hành. Các lợi ích chính của công nghệ bao gồm việc tiết kiệm vật liệu, giảm chi phí sản xuất, tăng tính linh hoạt trong thiết kế và sản xuất, đồng thời đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật phức tạp trong nhiều ngành công nghiệp. Đây là cơ sở quan trọng để ứng dụng và phát triển công nghệ in 3D từ vật liệu lỏng trong chế tạo chi tiết có kết cấu dạng lattice.

3. MÔ PHỎNG

Quy trình mô phỏng cơ bản thường bao gồm các bước như sau: Xây dựng mô hình 3D của chi tiết với kết cấu lattice bằng các phần mềm thiết kế như Solidworks, CATIA hoặc Fusion 360, đảm bảo phản ánh chính xác cấu trúc thực tế. Mô hình sau đó có thể được xuất sang định dạng phù hợp (như STL) để sử dụng trong các phần mềm mô phỏng miễn phí hoặc mã nguồn mở như FreeCAD hoặc Code_Aster. Trong giai đoạn tiếp theo, các đặc tính vật liệu, như độ bền kéo, độ cứng và khả năng chịu mỏi, được xác định thông qua phân tích lý thuyết hoặc dữ liệu thực nghiệm. Điều kiện tải trọng như lực uốn, lực kéo hoặc áp suất được thiết lập dựa trên các ứng dụng thực tế. Sau đó, các phương pháp toán học hoặc thuật toán mô phỏng được sử dụng để phân tích ứng suất, biến dạng và khả năng chịu lực của kết cấu lattice. Kết quả mô phỏng sẽ cung cấp thông tin về hiệu suất của thiết kế, từ đó điều chỉnh thông số cấu trúc để tối ưu hóa. Ngoài ra, mô phỏng cũng có thể kết hợp dữ liệu thực nghiệm để tăng độ chính xác, sử dụng các công cụ như Excel hoặc Python để tính toán và hiển thị kết quả.

4. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG

Mô phỏng nghiên cứu ứng dụng phương pháp in 3D từ vật liệu lỏng trong chế tạo chi tiết 

có kết cấu dạng lattice bằng phần mềm ANSYS là quy trình quan trọng giúp phân tích và tối ưu hóa thiết kế. Quá trình bắt đầu bằng việc xây dựng mô hình 3D chi tiết với kết cấu lattice, sử dụng ANSYS Design Modeler để tạo hình học phản ánh chính xác đặc điểm của chi tiết. Sau đó, lưới mô hình được chia nhỏ thông qua ANSYS Meshing nhằm đảm bảo phân tích chính xác các yếu tố cơ học. Vật liệu như độ bền kéo, độ cứng và khả năng chịu mỏi được định nghĩa trong hệ thống, với hỗ trợ các loại vật liệu từ kim loại đến composite. Tải trọng thực tế, bao gồm lực uốn, lực kéo hoặc áp suất, được áp dụng cùng với các điều kiện biên để mô phỏng chính xác môi trường hoạt động. Các phân tích ứng suất, biến dạng và khả năng chịu uốn được thực hiện qua module ANSYS Mechanical để đánh giá hiệu suất và tối ưu hóa thiết kế bằng cách điều chỉnh độ dày thanh, hình dạng hoặc cấu trúc của kết cấu lattice. Cuối cùng, các thông số đầu ra như ứng suất tối đa, độ võng và hiệu suất tổng thể được đánh giá để kiểm tra tính khả thi và hiệu quả của thiết kế. Đây là quy trình mô phỏng đầy triển vọng, mang lại giá trị thực tiễn lớn trong việc ứng dụng công nghệ in 3D từ vật liệu lỏng vào chế tạo chi tiết có kết cấu dạng lattice.

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả và thảo luận về nghiên cứu ứng dụng phương pháp in 3D từ vật liệu lỏng trong chế tạo chi tiết có kết cấu dạng lattice cho thấy tiềm năng to lớn của công nghệ này trong việc sản xuất các chi tiết kỹ thuật với độ chính xác và hiệu suất cao. Công nghệ in 3D bằng vật liệu lỏng, bao gồm SLA và DLP, đã khẳng định khả năng tạo ra các sản phẩm có hình dạng phức tạp và đáp ứng được các yêu cầu kỹ thuật đặc thù. Kết cấu dạng lattice, với thiết kế mạng lưới rỗng và cấu trúc lặp, giúp tối ưu hóa trọng lượng mà vẫn đảm bảo khả năng chịu tải tốt. Trong phân

tích cơ học, các thông số như ứng suất, độ võng và biến dạng của kết cấu đã được đánh giá kỹ lưỡng thông qua các phương pháp mô phỏng và thực nghiệm, chứng minh khả năng hấp thụ năng lượng và độ bền cơ học vượt trội. Ngoài ra, các ứng dụng thực tiễn trong lĩnh vực y sinh, hàng không và ô tô đã cho thấy lattice đóng vai trò quan trọng trong việc sản xuất các chi tiết nhẹ, bền và phù hợp với yêu cầu sử dụng cụ thể. Tuy nhiên, nghiên cứu cũng chỉ ra một số thách thức cần cải thiện như giảm chi phí vật liệu hoặc rút ngắn thời gian sản xuất để tăng tính cạnh tranh. Thảo luận về các kết quả đạt được mở ra triển vọng mới cho việc phát triển và ứng dụng công nghệ này, đồng thời tạo động lực để tiếp tục nghiên cứu sâu hơn nhằm tối ưu hóa các thiết kế và quy trình sản xuất.

5.1. Setup thí nghiệm

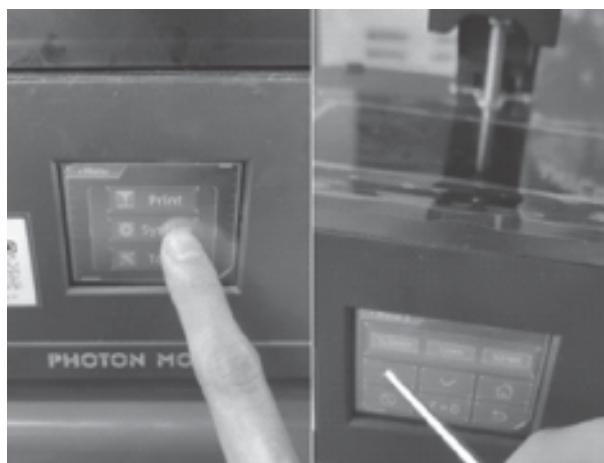


Hình 1. Chuẩn bị thiết bị

Khi bắt đầu quy trình in 3D bằng máy Anycubic Photon Mono, trước tiên người dùng cần khởi động máy bằng cách nhấn nút nguồn. Sau khi màn hình cảm ứng hiển thị giao diện chính, người dùng chọn mục “Tool” để vào phần điều chỉnh và hiệu chuẩn. Tiếp theo, trong mục “Move Z”, người dùng sử dụng các nút điều khiển để di chuyển trục Z theo các bước 0.1mm, 1mm hoặc 10mm nhằm đưa bàn in về vị trí ban đầu hoặc điều chỉnh khoảng cách chính xác giữa bàn in và màn hình. Sau khi đã đưa bàn in về đúng vị trí, người dùng nhấn “Z = 0” để đặt lại gốc tọa độ Z, đảm bảo các lớp in sau sẽ chính xác. Sau bước căn chỉnh, quay

trở lại màn hình chính và chọn “Print” để chuẩn bị file in, đồng thời lúc này người dùng cần đổ resin (nhựa lỏng) vào khay in, đảm bảo mực đủ để in toàn bộ mô hình. Kiểm tra lại khay resin đã được lắp đúng cách và không có vật cản. Tất cả các thông tin và bước cài đặt được hiển thị rõ ràng trên màn hình cảm ứng như lựa chọn hệ thống (System), công cụ (Tool), và in (Print), giúp người dùng dễ dàng thao tác trước khi bắt đầu quá trình in 3D.

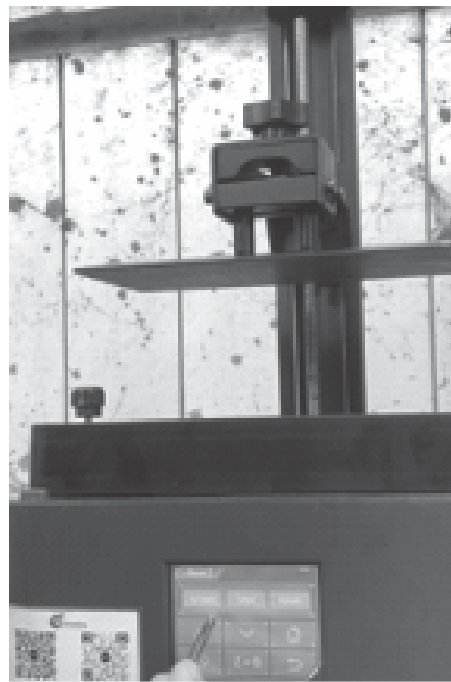
5.2. Vận hành thiết bị



Hình 2. Cài đặt thông số máy in

Máy in 3D resin hoạt động bằng cách sử dụng nhựa cảm quang lỏng được đổ vào khay in; đầu tiên, người dùng sẽ căn chỉnh bàn in bằng thao tác di chuyển trục Z sao cho bàn in sát mặt phim FEP trong khay resin, đảm bảo lớp đầu tiên in ra được dính chắc vào bề mặt; sau đó, màn hình LCD phía dưới khay sẽ hiển thị từng lớp cắt của mô hình, ánh sáng UV từ đèn LED chiếu xuyên qua các vùng hình ảnh này để làm đông cứng nhựa tại những khu vực mong muốn; khi một lớp đã được xử lý xong, bàn in sẽ từ từ nâng lên để lớp nhựa mới tràn vào chỗ cũ; quy trình này lặp lại liên tục, từng lớp một, cho đến khi toàn bộ mô hình được tạo thành; sau khi in hoàn tất, vật thể được nâng

hắn lên khỏi khay resin, và cần qua các bước hậu xử lý như rửa bằng cồn và chiếu UV để làm cứng hoàn toàn, được thể hiện như hình 1.



Hình 3. Nhập các thông số trước khi in

Ngoài ra, trong quá trình căn chỉnh bàn in, người dùng sử dụng một que nhọn để thao tác trên màn hình cảm ứng nhằm điều khiển độ cao trục Z; thao tác này giúp di chuyển bàn in lên xuống với độ chính xác cao mà không chạm tay trực tiếp vào màn hình, tránh sai lệch và giữ cho bề mặt luôn sạch sẽ.

5.3. Sản phẩm

a) Tổng quan

Sản phẩm có hình dạng giống mẫu thử kéo tiêu chuẩn (dạng dog-bone), được dùng phổ biến trong thử nghiệm cơ học vật liệu. Phần thân giữa có thiết kế dạng lưới với các cell hình trụ/hình hộp rỗng (đục lỗ). Hai đầu được giữ nguyên dạng khối đặc để gá kẹp khi thử nghiệm như hình 2.



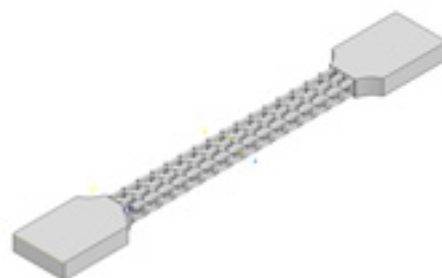


Hình 4. Sản phẩm sau khi in thử

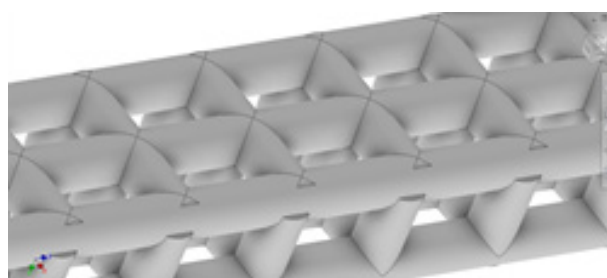
Cấu trúc dạng dog-bone (xương chó) là một thiết kế mẫu thử tiêu chuẩn được sử dụng rộng rãi trong các thí nghiệm kéo nhằm đánh giá đặc tính cơ học của vật liệu như độ bền kéo, độ giãn dài và mô đun đàn hồi; điểm nổi bật của thiết kế này là phần giữa được làm hẹp lại so với hai đầu, tạo ra vùng tập trung ứng suất rõ rệt, giúp đảm bảo quá trình đứt gãy xảy ra tại khu vực mong muốn thay vì ở các vị trí gập, từ đó tăng độ chính xác và độ tin cậy của kết quả thử nghiệm. Thiết kế này cũng giúp hạn chế các ảnh hưởng từ biến dạng cục bộ hoặc trượt tại đầu mẫu khi kẹp vào thiết bị kéo, đồng thời dễ dàng trong việc quan sát và đo lường biến dạng thực tế trong quá trình mẫu bị kéo đứt, đặc biệt phù hợp với các vật liệu in 3D, vật liệu composite hoặc vật liệu có cấu trúc rỗng cần kiểm chứng hiệu suất chịu lực trong điều kiện chuẩn hóa.

b) Thông số kích thước sản phẩm

Tổng quan về hình ảnh 3D được thể hiện qua hình 3 và kích thước, khoảng cách giữa các cell được thể hiện qua hình 5 và 6.



Hình 5. Hình dáng 3D của sản phẩm



Hình 6. Kích thước của cell

c) Phân tích

Dựa trên hình ảnh mô tả phân thân giữa của mẫu thử và thông tin chi tiết về cấu trúc ô lưới (cell) với đường kính 2 mm, chiều cao và chiều rộng đều là 5.5 mm, có thể nhận thấy rằng thiết kế mới đã được tối ưu theo hướng giảm mật độ vật liệu mà vẫn giữ được sự ổn định về hình dạng và cơ tính. Cụ thể, phân thân giữa của mẫu thử có cấu trúc lưới với các ô rỗng được phân bố đều, tạo thành dạng mạng lưới ba chiều, trong đó mỗi cell có hình dạng gần như hình hộp chữ nhật rỗng với cạnh bo tròn, góp phần giảm trọng lượng tổng thể của sản phẩm nhưng vẫn duy trì được khả năng chịu lực tốt nhờ vào sự phân bố tải trọng đều qua các thanh nối giữa các cell. Việc tăng đường kính cell lên 2 mm đã làm cho mật độ vật liệu giảm đi rõ rệt, các lỗ hổng lớn hơn giúp dễ dàng quan sát biến dạng, đồng thời tăng khả năng hấp thụ năng lượng và giảm chấn trong các ứng dụng liên quan đến tải động hoặc mô phỏng mô mềm sinh học. Thiết kế này cũng đồng nghĩa với

việc giảm tiêu hao vật liệu in và thời gian sản xuất trong quy trình in 3D, đồng thời vẫn đảm bảo được tính toàn vẹn của cấu trúc trong suốt quá trình thử nghiệm cơ học. Từ hai mẫu giống nhau được đánh dấu ký hiệu “1” trong hình ảnh đầu tiên, có thể suy luận đây là các mẫu chuẩn hoặc mẫu đối chứng trong cùng một loạt thử nghiệm, nhằm kiểm tra tính lặp lại và độ tin cậy của thiết kế mới. Thực tế quan sát cho thấy không có dấu hiệu nứt vỡ hay biến dạng sau in, chứng tỏ rằng việc tăng đường kính cell không làm suy yếu cấu trúc một cách đáng kể mà ngược lại còn giúp cải thiện một số đặc tính cơ học nhất định nhờ thiết kế tối ưu hóa, từ đó làm nổi bật khả năng ứng dụng của sản phẩm trong các lĩnh vực yêu cầu tính nhẹ, linh hoạt và khả năng chịu tải cao như y sinh, thiết bị bảo hộ hoặc cấu trúc chịu lực nhẹ.

6. KẾT LUẬN

Tổng kết lại, việc ứng dụng công nghệ in 3D để tạo ra các cấu trúc lattice kết hợp với thiết kế mẫu dạng dog-bone đã mang lại nhiều ưu điểm vượt trội trong quá trình nghiên cứu và thử nghiệm cơ học vật liệu, đặc biệt là trong việc đánh giá hiệu quả của cấu trúc rỗng. Thiết kế dog-bone giúp tập trung ứng suất tại vùng giữa mẫu, cho phép kiểm tra chính xác tính chất cơ học của phần cấu trúc lattice mà không bị ảnh hưởng bởi gá kẹp, trong khi đó các ô cell có kích thước đường kính 2 mm, chiều cao và chiều rộng 5.5 mm được phân bố đều tạo nên một mạng lưới không gian nhẹ, thông thoáng nhưng vẫn đảm bảo độ bền và khả năng chịu tải tốt. Cấu trúc này không chỉ giúp giảm đáng kể khối lượng vật liệu và thời gian in, mà còn mang lại khả năng hấp thụ năng lượng, chống biến dạng và điều chỉnh đặc tính đàn hồi theo nhu cầu sử dụng, từ đó khẳng định tiềm năng ứng dụng rộng rãi của thiết kế trong các lĩnh vực y sinh, kỹ thuật cơ khí và các ngành công

ng nghiệp đòi hỏi cấu trúc nhẹ nhưng bền vững.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Phan Thị Đăng Thư;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Dương Quang Huy, Tạ Nguyễn Minh Đức, Huỳnh Quang Duy, Nguyễn Văn Sơn;

- Tác giả liên hệ: Nguyễn Văn Sơn.

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: SV2025-372. ❖

Ngày nhận bài: 05/5/2025

Ngày phản biện: 19/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Zhou, B., Zhao, J. B., & Li, L. (2015), “CNC double spiral tool-path generation based on parametric surface mapping”. *Computer-Aided Design*, 67–68, 87–106. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.05.008>
- [2]. Ye, G. Y., Bi, H. J., & Hu, Y. C. (2020), “Compression behaviors of 3D printed pyramidal lattice truss composite structures”. *Composite Structures*, 233, 111537. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111537>
- [3]. Pantz, O., & Trabelsi, K. (2008), “A post-treatment of the homogenization method for shape optimization”. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 47, 1380–1398. <https://doi.org/10.1137/070703479>

- [4]. Xiong, J., Mines, R., Ghosh, R., Vaziri, A., Ma, L., Ohrndorf, A., & Wu, L. (2015), “*Advanced micro-lattice materials*”. *Advanced Engineering Materials*, 17, 1253–1264. <https://doi.org/10.1002/adem.201500106>
- [5]. Yi, B., Zhou, Y. Q., Yoon, G. H., & Saitou, K. (2019), “*Topology optimization of functionally-graded lattice structures with buckling constraints*”. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 354, 593–619. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2019.06.033>
- [6]. Koizumi, Y., Okazaki, A., Chiba, A., Kato, T., & Takezawa, A. (2016), “*Cellular lattices of biomedical Co-Cr-Mo-alloy fabricated by electron beam melting with the aid of shape optimization*”. *Additive Manufacturing*, 12, 305–313. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2016.05.008>
- [7]. Salonitis, K., Chantzis, D., & Kappatos, V. (2017), “*A hybrid finite element analysis and evolutionary computation method for the design of lightweight lattice components with optimized strut diameter*”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90, 2689–2701. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9584-9>
- [8]. Guo, Q., Yao, W., Li, W., & Gupta, N. (2021), “*Constitutive models for the structural analysis of composite materials for the finite element analysis: A review of recent practices*”. *Composite Structures*, 260, 113267. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113267>
- [9]. Verners, O., & Dobelis, M. (2010), “*Shape optimization of a superelement of hexagonal lattice structure*”. *Construction Science*, 11, 66–76.
- [10]. Zhai, X. Y., & Chen, F. L. (2019), “*Path planning of a type of porous structures for additive manufacturing*”. *Computer-Aided Design*, 115, 218–230. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.06.006>
- [11]. Tang, Y., Dong, G., Zhou, Q., & Zhao, Y. F. (2018), “*Lattice structure design and optimization with additive manufacturing constraints*”. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 15, 1546–1562. <https://doi.org/10.1109/TASE.2018.2810248>
- [12]. Reinhart, G., & Teufelhart, S. (2013), “*Optimization of mechanical loaded lattice structures by orientating their struts along the flux of force*”. *Procedia CIRP*, 12, 175–180. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.09.030>
- [13]. Niutta, C. B., Ciardiello, R., & Tridello, A. (2022), “*Experimental and numerical investigation of a lattice structure for energy absorption: Application to the design of an automotive crash absorber*”. *Polymers*, 14, 1116. <https://doi.org/10.3390/polym14061116>
- [14]. Mahendran, M. (2007), “*Applications of finite element analysis in structural engineering*”. In *Proceedings of the International Conference on Computer Aided Engineering* (pp. 38–46). Indian Institute of Technology Madras.
- [15]. Matthews, F. L., Davies, G. A. O., Hitchings, D., & Soutis, C. (2000), “*Finite Element Modelling of Composite Materials and Structures*”. Elsevier.