

THỬ NGHIỆM ĐỘ BỀN CHI TIẾT CHỊU BIẾN DẠNG UỐN VỚI CÁC KẾT CẤU DẠNG LATTICE

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE BENDING STRENGTH OF COMPONENTS WITH LATTICE STRUCTURES

Nguyễn Gia Hưng, Âu Thị Kim Loan, Hoàng Trọng Nghĩa, Tạ Nguyễn Minh Đức*

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

Email: 22144111@student.hcmute.edu.vn;

loanatk@hcmute.edu.vn;

nghiaht@hcmute.edu.vn;

*ductnm@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Trong lĩnh vực nghiên cứu vật liệu và cơ học ứng dụng, việc thiết kế và chế tạo mẫu thử độ bền uốn cho kết cấu dạng lattice đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá đặc tính cơ học của các cấu trúc nhẹ nhưng có độ bền cao. Kết cấu lattice, với đặc điểm hình học phức tạp và khả năng phân bố ứng suất hiệu quả, đang được ứng dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp tiên tiến như hàng không, y sinh và sản xuất bồi đắp. Nghiên cứu này tập trung vào quá trình thiết kế tối ưu hình dạng và thông số cấu trúc của mẫu thử, kết hợp với công nghệ in 3D để chế tạo chính xác các chi tiết có hình học vi mô phức tạp. Thông qua việc thử nghiệm độ bền kéo và phân tích ứng xử cơ học, nghiên cứu nhằm đánh giá ảnh hưởng của cấu trúc lattice đến khả năng chịu lực, từ đó cung cấp cơ sở cho việc tối ưu hóa thiết kế trong các ứng dụng thực tiễn.

Từ khóa: Kết cấu lattice; Độ bền chi tiết; Chi tiết chịu biến dạng uốn; Mô phỏng; In 3D lattice.

ABSTRACT

In the field of materials research and applied mechanics, the design and fabrication of tensile test specimens for lattice structures play a crucial role in evaluating the mechanical properties of lightweight yet high-strength configurations. Lattice structures, characterized by their complex geometries and effective stress distribution capabilities, are increasingly being applied in advanced industries such as aerospace, biomedical engineering, and additive manufacturing. This study focuses on the optimal design of geometry and structural parameters of test specimens, combined with 3D printing technology to precisely fabricate components with intricate microstructures. Through tensile testing and mechanical behavior analysis, the research aims to assess the influence of lattice structures on load-bearing capacity, thereby providing a foundation for structural optimization in practical applications.

Keywords: Lattice structures; Component strength; Bending deformation resistance; Simulation; 3D-printed lattice.



1. TỔNG QUAN

Các kết cấu dạng lattice đã trở thành một giải pháp kỹ thuật quan trọng trong các lĩnh vực như hàng không vũ trụ, ô tô, và xây dựng nhờ đặc tính trọng lượng nhẹ, độ bền cao, và khả năng tùy chỉnh linh hoạt [1]. Những cấu trúc này được hình thành từ các đơn vị tế bào lặp lại theo mô hình không gian, cho phép tối ưu hóa hiệu suất cơ học thông qua điều chỉnh hình học, vật liệu, và phương pháp chế tạo [2]. Khi chịu biến dạng uốn, hiệu suất của các kết cấu lattice phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm thành phần vật liệu, cấu hình hình học, phân bố tải trọng, và các đặc trưng vi cấu trúc. Các nghiên cứu gần đây đã tập trung vào việc cải thiện khả năng chịu uốn của các kết cấu này thông qua thiết kế sáng tạo, mô phỏng số, và thử nghiệm thực nghiệm. Phần tổng quan này thảo luận về các tiên bộ mới nhất, nhấn mạnh các yếu tố ảnh hưởng đến độ bền uốn và các phương pháp nghiên cứu hiện đại.

(*) Đặc điểm của kết cấu lattice trong ứng dụng chịu uốn

Kết cấu lattice thường được thiết kế với các đơn vị tế bào lặp lại như hình lập phương, lục giác, hoặc các cấu trúc phức tạp hơn như gyroid và auxetic [3]. Các cấu trúc này có thể được chế tạo từ kim loại, polymer, hoặc vật liệu composite, tùy thuộc vào yêu cầu ứng dụng cụ thể [1]. Khi chịu tải uốn, chúng thể hiện các đặc trưng cơ học độc đáo, như khả năng hấp thụ năng lượng cao và phân bố ứng suất đồng đều [4]. Tuy nhiên, hiệu suất uốn bị ảnh hưởng bởi tỷ lệ rỗng, độ dày thanh, và góc liên kết giữa các thanh trong tế bào lattice. Các nghiên cứu chỉ ra rằng các cấu trúc lattice với tỷ lệ rỗng cao thường có mô đun uốn thấp hơn, nhưng vượt trội trong việc giảm trọng lượng [5].

Một hướng nghiên cứu nổi bật là sử dụng các kết cấu lattice hai pha, kết hợp các đơn vị tế bào cứng và mềm để cải thiện hiệu suất uốn. Các cấu trúc này tận dụng sự tương tác giữa các vùng có độ cứng khác nhau để tối ưu hóa khả năng hấp thụ năng lượng và giảm nguy cơ gãy vỡ cục bộ [6]. Chẳng hạn, một nghiên cứu đã chứng minh rằng các cấu trúc lattice hai pha với lõi mềm có thể tăng cường độ bền uốn lên đến 30% so với các cấu trúc đơn pha truyền thống [7]. Điều này cho thấy tiềm năng của các thiết kế lai trong việc đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật khắt khe.

(*) Ảnh hưởng của hình học và vật liệu đến độ bền uốn

Hình học của các đơn vị tế bào đóng vai trò quan trọng trong việc xác định khả năng chịu uốn của kết cấu lattice. Các cấu trúc auxetic, với hệ số Poisson âm, cải thiện độ bền uốn nhờ cơ chế biến dạng độc đáo, mở rộng theo hướng vuông góc khi bị nén [8]. Ngoài ra, các cấu trúc tái nhập (re-entrant) trong lõi của các tấm sandwich tăng cường độ bền uốn đồng thời giảm thiểu ứng suất cắt [9]. Các nghiên cứu cũng cho thấy việc điều chỉnh góc nghiêng của các thanh trong tế bào lattice có thể làm thay đổi đáng kể mô đun uốn và khả năng chống gãy [2].

Về vật liệu, các hợp kim nhẹ như titan hoặc nhôm được sử dụng rộng rãi trong các cấu trúc lattice nhờ tỷ lệ độ bền trên trọng lượng cao [3]. Gần đây, các vật liệu composite và polymer cải tiến, như polymer gia cường sợi carbon, đã được tích hợp để cải thiện khả năng chịu uốn và chống mỏi [6]. Tuy nhiên, thách thức lớn là đảm bảo tính đồng nhất của vật liệu trong quá trình chế tạo, đặc biệt khi sử dụng các phương pháp in 3D như thiêu kết laser chọn lọc hoặc stereolithography [5].

(*) Mô phỏng và thử nghiệm thực nghiệm

Các phương pháp mô phỏng số, như phương pháp phần tử hữu hạn (FEA), đã trở thành công cụ quan trọng để đánh giá hiệu suất uốn của các kết cấu lattice. Mô phỏng cho phép dự đoán sự phân bố ứng suất, biến dạng, và điểm gãy trong các cấu hình lattice trước khi thử nghiệm thực tế [7]. Một số nghiên cứu đã sử dụng FEA để tối ưu hóa thiết kế lattice, như xác định tỷ lệ rỗng tối ưu hoặc cấu hình tế bào phù hợp với các điều kiện tải cụ thể [9]. Các mô hình vi cơ học cũng được phát triển để làm rõ cách các đặc trưng vi cấu trúc ảnh hưởng đến hiệu suất uốn tổng thể [8].

Về thực nghiệm, các thử nghiệm uốn ba điểm và bốn điểm thường được sử dụng để đánh giá độ bền uốn, cung cấp dữ liệu về mô đun uốn, độ bền gãy, và khả năng hấp thụ năng lượng [4]. Gần đây, kỹ thuật chụp cắt lớp vi tính (micro-CT) đã được áp dụng để phân tích các khuyết tật bên trong cấu trúc lattice sau thử nghiệm, làm rõ mối quan hệ giữa vi cấu trúc và hiệu suất cơ học [5]. Sự kết hợp giữa mô phỏng và thử nghiệm thực nghiệm đã mở ra cơ hội để phát triển các thiết kế lattice tối ưu hơn.

(*) Thách thức và triển vọng

Dù mang lại nhiều lợi ích, các kết cấu lattice vẫn đối mặt với các thách thức như chi phí chế tạo cao, đặc biệt khi sử dụng kỹ thuật in 3D tiên tiến [1]. Việc đảm bảo tính đồng nhất và độ chính xác ở quy mô vi mô cũng là một rào cản kỹ thuật [3]. Trong tương lai, các nghiên cứu cần tập trung vào phát triển các phương pháp chế tạo chi phí thấp và các thiết kế lattice thích ứng với nhiều điều kiện tải khác nhau.

Tóm lại, các kết cấu dạng lattice cho thấy tiềm năng lớn trong các ứng dụng chịu

biến dạng uốn nhờ đặc tính cơ học vượt trội và khả năng tùy chỉnh linh hoạt. Các tiến bộ trong thiết kế, mô phỏng, và thử nghiệm thực nghiệm đang mở ra những cơ hội mới để tối ưu hóa hiệu suất. Tuy nhiên, để ứng dụng rộng rãi, cần thêm nghiên cứu về vật liệu, quy trình chế tạo, và phương pháp đánh giá hiệu suất.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Thử nghiệm độ bền chi tiết chịu biến dạng uốn với các kết cấu lattice dựa trên nguyên lý cơ học vật liệu và phân tích kết cấu, tập trung vào phân bố ứng suất, cơ chế hấp thụ năng lượng, phương pháp thử nghiệm và mô phỏng số. Các kết cấu lattice có hình học phức tạp, dẫn đến sự phân bố ứng suất không đồng đều, ảnh hưởng đến khả năng chịu tải và nguy cơ phá hủy. Chúng hấp thụ năng lượng thông qua biến dạng đàn hồi và dẻo, với các thiết kế hai pha giúp tối ưu hóa sự phân bố lực. Các thử nghiệm phổ biến như uốn ba điểm và uốn bốn điểm được sử dụng để đánh giá khả năng chịu tải, trong khi phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) hỗ trợ dự đoán ứng suất, biến dạng và cơ chế phá hủy của kết cấu dưới tải trọng uốn.

3. MÔ PHỎNG

Các mô phỏng thử nghiệm độ bền chi tiết chịu biến dạng uốn với kết cấu lattice thường sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) để phân tích ứng suất, biến dạng và cơ chế phá hủy. Một nghiên cứu đã thiết kế và mô phỏng các kết cấu lattice in 3D bằng titan, đánh giá độ bền thông qua thử nghiệm nén và mô phỏng tĩnh tuyến tính. Một nghiên cứu khác đã phân tích các cấu trúc lattice dạng dầm uốn, sử dụng phần mềm Solidworks để đánh giá hiệu suất cơ học dưới tải trọng uốn. Ngoài ra, mô hình đàn hồi - dẻo cũng được áp dụng để nghiên cứu tải



trọng uốn trên các kết cấu lattice, giúp dự đoán phản ứng vật liệu dưới điều kiện tải trọng thực tế.

4. PHƯƠNG PHÁP MÔ PHÒNG

Mô phỏng chế tạo chi tiết chịu uốn sử dụng kết cấu lattice bằng phần mềm ANSYS là một quy trình phức tạp nhưng rất hiệu quả để phân tích và tối ưu hóa thiết kế. Đầu tiên, sử dụng ANSYS Design Modeler để tạo mô hình chi tiết với kết cấu lattice. Mô hình này cần phản ánh chính xác hình học và các đặc điểm của chi tiết thực tế, bao gồm các yếu tố như mật độ, hình dạng các tế bào và sự phân bố lực. Tiếp theo, sử dụng ANSYS Meshing để chia lưới mô hình. Quá trình này giúp phân chia mô hình thành các phần tử nhỏ hơn, từ đó cải thiện độ chính xác trong phân tích ứng suất và biến dạng. Sau khi hoàn thành việc chia lưới, các thông số vật liệu như độ bền kéo, độ cứng và khả năng chịu mỏi được nhập vào. ANSYS hỗ trợ nhiều loại vật liệu, từ kim loại truyền thống đến composite hoặc vật liệu đặc biệt phù hợp với kết cấu lattice. Sau đó, các điều kiện tải trọng thực tế, như lực uốn, lực kéo hoặc áp suất, được mô phỏng để mô phỏng các điều kiện làm việc thực tế của chi tiết. Các điều kiện biên cần được thiết lập để phản ánh môi trường hoạt động của chi tiết, như các kẹp chặt hoặc điều kiện tải trọng bất đối xứng. Cuối cùng, sử dụng ANSYS Mechanical để phân tích ứng suất, biến dạng và khả năng chịu uốn của kết cấu lattice. Quá trình này cho phép các nhà thiết kế tối ưu hóa cấu trúc lattice bằng cách điều chỉnh các thông số như độ dày thanh, hình dạng hoặc cấu trúc mạng lưới, từ đó đạt được sự cân bằng giữa hiệu quả chịu lực và trọng lượng nhẹ của chi tiết.

5. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

5.1. Setup thí nghiệm



Hình 1. Các bước kiểm tra máy

Kết quả mô phỏng cho thấy các vùng ứng suất tập trung cao nhất thường xuất hiện tại các điểm giao nhau của các thanh trong kết cấu lattice, nơi mà các ứng suất có xu hướng tập trung do sự thay đổi đột ngột của hình học cấu trúc. Biến dạng của chi tiết được phân bố đồng đều hơn khi thiết kế tối ưu, điều này giúp cải thiện khả năng chịu uốn của chi tiết. Các thiết kế lattice tối ưu hóa có thể giảm đáng kể trọng lượng của chi tiết mà vẫn đảm bảo được độ bền cơ học cần thiết. Các kết quả mô phỏng thường chỉ ra rằng việc thay đổi hình dạng hoặc kích thước của các thanh lattice có thể cải thiện hiệu suất tổng thể của kết cấu, đặc biệt là trong việc phân phối ứng suất và giảm thiểu các điểm yếu. Kết quả mô phỏng còn cung cấp những gợi ý về các cải tiến trong thiết kế, như thay đổi vật liệu sử dụng hoặc điều chỉnh cấu trúc để tăng cường khả năng chịu lực và giảm thiểu sự mất mát năng lượng. Tuy nhiên, thảo luận cũng cần lưu ý đến các hạn chế của mô phỏng, chẳng hạn như độ chính xác của mô hình vật liệu hoặc điều kiện biên, khi mà sự tương đồng giữa mô phỏng và thực tế có thể bị ảnh hưởng bởi những yếu tố không thể mô phỏng đầy đủ, như sự không đồng đều trong quá trình chế tạo hoặc các khuyết tật vật liệu.

5.2. Vận hành máy móc



Hình 2. Các bước setup thông số

Để bắt đầu in 3D với máy Anycubic Photon Mono, người dùng cần bật nguồn bằng cách nhấn nút khởi động. Khi màn hình cảm ứng hiển thị giao diện chính, chọn mục “Tool” để vào phần thiết lập và hiệu chuẩn. Trong mục “Move Z”, sử dụng các nút điều khiển để di chuyển trục Z với các bước 0.1mm, 1mm hoặc 10mm, nhằm điều chỉnh bàn in sao cho chính xác, đưa nó về đúng vị trí hoặc thiết lập khoảng cách phù hợp với màn hình. Sau khi đã căn chỉnh xong, nhấn “Z = 0” để đặt lại gốc tọa độ Z, đảm bảo các lớp in sau này sẽ chính xác. Sau khi hoàn tất bước hiệu chỉnh, quay lại màn hình chính và chọn “Print” để chuẩn bị file in. Đồng thời, người dùng cần đổ đầy resin (nhựa lỏng) vào khay in, chắc chắn lượng resin đủ để in mô hình hoàn chỉnh. Kiểm tra xem khay resin đã được lắp đúng và không có vật cản. Tất cả các thông tin về cài đặt và các bước sẽ được hiển thị rõ ràng trên màn hình cảm ứng, bao gồm lựa chọn hệ thống (System), công cụ (Tool) và chế độ in (Print), giúp người dùng dễ dàng thực hiện các thao tác cần thiết trước khi bắt đầu quá trình in 3D.

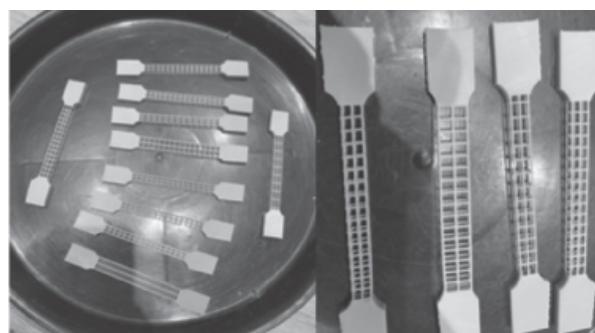
Máy in 3D resin hoạt động dựa trên việc sử dụng nhựa lỏng cảm quang, được đổ vào

khay in. Đầu tiên, người dùng cần điều chỉnh bàn in bằng cách di chuyển trục Z để bàn in tiếp xúc gần với mặt phim FEP trong khay resin, nhằm đảm bảo lớp in đầu tiên bám chặt vào bề mặt. Sau đó, màn hình LCD dưới khay sẽ chiếu các lớp cắt của mô hình, và ánh sáng UV từ đèn LED sẽ xuyên qua các vùng đã được xác định, làm đông cứng nhựa ở những khu vực đó. Khi một lớp hoàn thành, bàn in sẽ từ từ nâng lên, đồng thời lớp nhựa mới sẽ được đưa vào vị trí cũ để tiếp tục in. Quá trình này được lặp lại liên tục, lớp sau sẽ được in lên trên lớp trước cho đến khi mô hình hoàn thiện. Sau khi in xong, vật thể sẽ được nâng lên khỏi khay resin, và cần thực hiện các bước hậu xử lý như rửa bằng cồn và chiếu UV để làm cứng hoàn toàn.

5.3. Sản phẩm

(*) Khái quát

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.

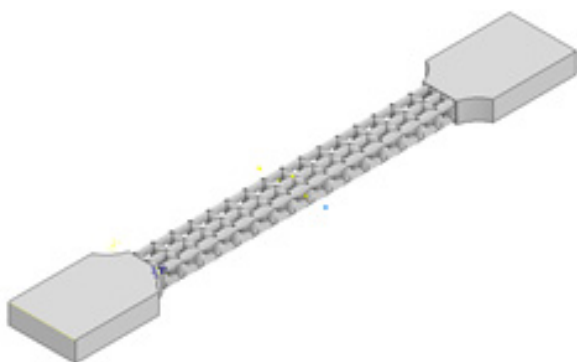


Hình 3. Sản phẩm sau in 3D

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 uốn, 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.

(*) Thông số kích thước

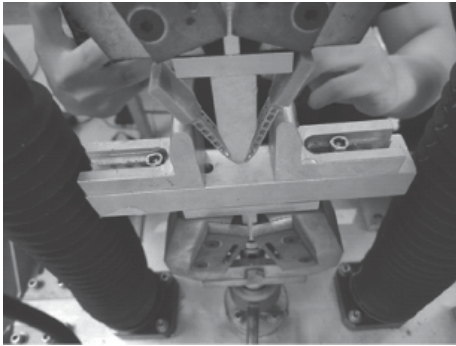


Hình 4. Mô hình 3D của sản phẩm

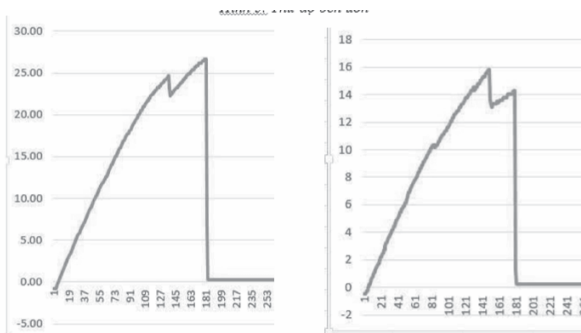
- Kiểu lưới: Lưới cubic dạng mạng ô đều.
- Chiều dài tổng thể sản phẩm: 150mm.
- Chiều cao sản phẩm: 10mm.
- Khoảng cách giữa hai phần sản phẩm: 88mm.
- Đường kính một cell (ô lưới): 2mm.
- Vật liệu: Nhựa kỹ thuật, có khả năng chống mài mòn, chịu nhiệt độ cao và kháng hóa chất.

(*) Phân tích

Dựa trên hình ảnh mô tả phần 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, phần 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.



Hình 5. Thử độ bền uốn



Hình 6. Kết quả thử uốn các mẫu với các thông số khác nhau

6. KẾT LUẬN

Nghiên cứu về chi tiết chịu uốn với kết cấu lattice đã chứng minh tiềm năng mạnh mẽ trong việc tối ưu hóa trọng lượng và độ bền cơ học của sản phẩm, đặc biệt trong các ngành công nghiệp đòi hỏi hiệu quả cao như hàng không, ô tô, và xây dựng. Kết cấu lattice không chỉ giúp giảm vật liệu sử dụng mà còn đảm bảo khả năng chịu lực vượt trội nhờ cấu trúc ô đều và đối xứng. Với việc tích hợp công nghệ hiện đại như in 3D và gia công CNC, quá trình chế tạo đã được tinh gọn và đạt độ chính xác cao, góp phần mở rộng ứng dụng thực tiễn của sản phẩm.

Sản phẩm lưới cubic là minh chứng rõ ràng cho tính linh hoạt, hiệu quả trong thiết kế, và khả năng ứng dụng rộng rãi từ cơ khí đến xây dựng. Tuy nhiên, những hạn chế như khả

năng chịu nhiệt giới hạn và yêu cầu công nghệ gia công phức tạp cần được xem xét để đảm bảo tối ưu hóa hiệu suất. Tổng quan, kết cấu lattice và sản phẩm lưới cubic hứa hẹn sẽ tiếp tục trở thành một giải pháp quan trọng trong việc cải thiện hiệu quả vật liệu, giảm chi phí sản xuất, và thúc đẩy sự phát triển của các ngành công nghiệp hiện đại.

(*) Đóng góp của tác giả:

- Hình thành ý tưởng và mục tiêu nghiên cứu: Nguyễn Văn Minh;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Nguyễn Gia Hưng, Âu Thị Kim Loan, Hoàng Trọng Nghĩa, Tạ Nguyễn Minh Đức.

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: SV2025-373. ♦

Ngày nhận bài: 06/5/2025

Ngày phản biện: 16/5/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016), "Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications – A comprehensive review". Advanced Drug Delivery Reviews, 107, 367-392.
- [2]. Madrid, A. P. M., Vrech, S. M., Sanchez, M. A., & Rodriguez, A. P. (2019), "Advances in additive manufacturing for bone tissue engineering scaffolds". Materials Science and Engineering: C, 100, 631-644. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.03.037>

- [3]. Xiao, L., & Song, W. (2018), “*Additively-manufactured functionally graded Ti-6Al-4V lattice structures with high strength under static and dynamic loading: Experiments*”. International Journal of Impact Engineering, 111, 255-272.
- [4]. Jin, N., Wang, F., Wang, Y., Zhang, B., Cheng, H., & Zhang, H. (2019), “*Failure and energy absorption characteristics of four lattice structures under dynamic loading*”. Materials & Design, 169, 107655. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107655>
- [5]. Naghieh, S., Ravari, M. R., Badrossamay, M., Foroozmehr, E., & Kadkhodaei, M. (2016), “*Numerical investigation of the mechanical properties of the additive manufactured bone scaffolds fabricated by FDM: The effect of layer penetration and post-heating*”. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 59, 241-250.
- [6]. Guo, H., Takezawa, A., Honda, M., Kawamura, C., & Kitamura, M. (2020), “*Finite element simulation of the compressive response of additively manufactured lattice structures with large diameters*”. Computational Materials Science, 175, 109610.
- [7]. Li, P. (2015), “*Constitutive and failure behaviour in selective laser melted stainless steel for microlattice structures*”. Materials Science and Engineering: A, 622, 114-120.
- [8]. Li, C., Lei, H., Liu, Y., Zhang, X., Xiong, J., Zhou, H., & Fang, D. (2018), “*Crushing behavior of multi-layer metal lattice panel fabricated by selective laser melting*”. International Journal of Mechanical Sciences, 145, 389-399.
- [9]. Ullah, I., Brandt, M., & Feih, S. (2016), “*Failure and energy absorption characteristics of advanced 3D truss core structures*”. Materials & Design, 92, 937-948.
- [10]. Entezari, A., Fang, J., Sue, A., Zhang, Z., Swain, M. V., & Li, Q. (2016), “*Yielding behaviors of polymeric scaffolds with implications to tissue engineering*”. Materials Letters, 184, 108-111.