

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO CHI TIẾT CHỊU UỐN CÓ DÙNG KẾT CẤU LATTICE

RESEARCH ON FABRICATION OF BENDING-RESISTANT PARTS USING LATTICE STRUCTURES

Trần Xuân Hoàng, Nguyễn Văn Tú, Nguyễn Quang Sáng, Tạ Nguyễn Minh Đức*

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

Email: 22144098@student.hcmute.edu.vn;

tunv@hcmute.edu.vn;

sangnq@hcmute.edu.vn;

*ductnm@hcmute.edu.vn

TÓM TẮT

Nghiên cứu chế tạo chi tiết chịu uốn sử dụng kết cấu lattice nhằm tối ưu hóa trọng lượng và độ bền cơ học của chi tiết. Kết cấu lattice là một mạng lưới các thanh kết nối với nhau, giúp giảm vật liệu mà vẫn đảm bảo khả năng chịu lực tốt, đặc biệt là trong các ứng dụng yêu cầu tiết kiệm trọng lượng như hàng không, ô tô, và xây dựng. Các phương pháp chế tạo chủ yếu bao gồm in 3D và gia công CNC, cho phép sản xuất các chi tiết có cấu trúc phức tạp mà không cần khuôn mẫu. Việc phân tích các đặc tính uốn của kết cấu lattice giúp tối ưu hóa thiết kế để đạt hiệu suất tối đa. Nghiên cứu này hướng đến việc cải thiện hiệu quả vật liệu, giảm chi phí và nâng cao tính linh hoạt trong sản xuất.

Từ khóa: Chi tiết chịu uốn; Kết cấu lattice; Độ bền cơ học; Mạng lưới thanh kết nối.

ABSTRACT

Research on manufacturing bending-resistant components using lattice structures aims to optimize the weight and mechanical strength of the components. Lattice structures, which consist of a network of interconnected struts, help reduce material usage while maintaining excellent load-bearing capacity. These structures are particularly advantageous in applications requiring weight savings, such as aerospace, automotive, and construction. The primary manufacturing methods include 3D printing and CNC machining, allowing the production of complex structures without molds. Analyzing the bending properties of lattice structures helps to optimize the design for maximum performance. This research focuses on improving material efficiency, reducing costs, and enhancing flexibility in production.

Keywords: Bending-resistant components; Lattice structure; Mechanical strength; Network of interconnected struts.

1. TỔNG QUAN

Sự phát triển của các ngành công nghiệp hiện đại như hàng không vũ trụ, ô tô, và y sinh đòi hỏi các chi tiết cơ khí có trọng lượng nhẹ, độ bền cao, và khả năng chịu tải tối ưu. Kết cấu lattice, với đặc trưng là mạng lưới ô không gian định kỳ, đã trở thành giải pháp tiềm năng cho các chi tiết chịu uốn nhờ khả năng giảm trọng lượng và duy trì hiệu suất cơ học [1]. Phần tổng quan này trình bày các đặc điểm của kết cấu lattice, ứng dụng trong chi tiết chịu uốn, phương pháp chế tạo, và những thách thức cần giải quyết để thúc đẩy ứng dụng thực tiễn.

(*) Đặc điểm của kết cấu lattice:

Kết cấu lattice là hệ thống các thanh, nút hoặc ô lặp lại trong không gian ba chiều, tạo ra cấu trúc nhẹ nhưng cứng vững. Đặc tính nổi bật của lattice là khả năng phân bố tải trọng đồng đều, giảm khối lượng so với vật liệu đặc, và cung cấp độ bền cao trong các ứng dụng chịu lực phức tạp [2]. Các nghiên cứu chỉ ra rằng lattice có thể được thiết kế với các ô hình học như body-centered cubic (BCC) hoặc octet-truss để tối ưu hóa khả năng chịu uốn, nén, hoặc hấp thụ năng lượng [3]. Tính linh hoạt này cho phép tùy chỉnh cấu trúc theo yêu cầu cụ thể, chẳng hạn như trong các bộ phận giảm chấn hoặc khung kết cấu [4].

Việc thiết kế lattice được hỗ trợ bởi các công cụ tối ưu hóa tô pô, giúp điều chỉnh mật độ và hình dạng ô để đạt hiệu suất tối ưu [5]. Tuy nhiên, hiệu quả của kết cấu lattice phụ thuộc không chỉ vào thiết kế mà còn vào vật liệu và kỹ thuật chế tạo, vốn đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo tính khả thi.

(*) Ứng dụng trong chi tiết chịu uốn:

Chi tiết chịu uốn, như dầm, thanh ngang,

hoặc bộ phận kết cấu trong máy bay, yêu cầu sự cân bằng giữa độ bền, độ cứng, và trọng lượng. Kết cấu lattice thay thế lõi đặc bằng mạng lưới ô rỗng, giúp giảm khối lượng đáng kể mà vẫn đảm bảo khả năng chịu tải [6]. Trong hàng không vũ trụ, các bộ phận như cánh quạt hoặc khung thân sử dụng lattice đã giảm tới 30% trọng lượng so với thiết kế truyền thống, đồng thời duy trì độ bền uốn [7].

Trong y sinh, lattice được ứng dụng trong cấy ghép xương nhân tạo, nơi cấu trúc xốp mô phỏng đặc tính cơ học của xương, cải thiện tích hợp sinh học [8]. Những ứng dụng này minh chứng tiềm năng của lattice trong việc đáp ứng các yêu cầu phức tạp của chi tiết chịu uốn, từ công nghiệp đến y tế.

Công nghệ chế tạo bồi đắp (additive manufacturing - AM), hay in 3D, đã cách mạng hóa việc sản xuất kết cấu lattice. Các kỹ thuật như Selective Laser Melting (SLM) và Electron Beam Melting (EBM) cho phép tạo ra các cấu trúc lưới phức tạp với độ chính xác cao, đặc biệt khi sử dụng kim loại như titan hoặc hợp kim nhôm [9]. SLM nổi bật nhờ khả năng xử lý vật liệu kim loại, phù hợp với chi tiết chịu uốn trong môi trường khắc nghiệt [10].

Tuy nhiên, AM gặp hạn chế về độ chính xác với ô lattice kích thước nhỏ (dưới 1 mm) do co ngót nhiệt hoặc lỗi bề mặt [1]. Chi phí vận hành cao và thời gian sản xuất dài cho các chi tiết lớn cũng là rào cản [2]. Để khắc phục, các phương pháp kết hợp AM với gia công CNC đã được đề xuất để cải thiện chất lượng bề mặt và độ chính xác [3]. Ngoài AM, đúc đầu tư hoặc ép phun cũng được sử dụng cho lattice đơn giản, nhưng bị giới hạn bởi độ phức tạp hình học [4].

Mặc dù có nhiều ưu điểm, kết cấu lattice đối mặt với các thách thức lớn. Thứ nhất, việc dự đoán hành vi cơ học dưới tải uốn là phức tạp 

tạp. Các mô hình phần tử hữu hạn (FEM) yêu cầu tài nguyên tính toán lớn để mô phỏng cấu trúc lưới, đặc biệt khi có khuyết tật vi mô như lỗ rỗng hoặc nứt [5]. Những khuyết tật này có thể làm giảm độ bền chi tiết, đòi hỏi kiểm soát chất lượng nghiêm ngặt [6]. Thứ hai, tối ưu hóa thiết kế lattice vẫn là vấn đề khó. Các thuật toán tô pô hiện nay chưa hoàn toàn cân bằng được giữa hiệu suất, chi phí, và tính khả thi chế tạo [7]. Thiếu tiêu chuẩn thiết kế và kiểm tra chất lượng cho lattice cũng hạn chế ứng dụng rộng rãi [8]. Cuối cùng, lựa chọn vật liệu là yếu tố then chốt. Kim loại như titan mang lại độ bền cao nhưng chi phí đắt đỏ, trong khi polymer và composite có hạn chế về chịu nhiệt và độ bền lâu dài [9]. Các giải pháp vật liệu mới cần được nghiên cứu để đáp ứng yêu cầu đa dạng.

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Kết cấu lattice là mạng lưới các thanh kết nối với nhau, được thiết kế để tối ưu hóa trọng lượng và khả năng chịu lực. Các mô hình toán học và phương pháp phân tích cơ học được sử dụng để mô phỏng và dự đoán hành vi của kết cấu này dưới tác động của lực uốn. Các vật liệu phổ biến bao gồm kim loại, hợp kim nhẹ, và vật liệu composite. Đặc tính cơ học của vật liệu, như độ bền kéo, độ cứng và khả năng chịu mỏi, đóng vai trò quan trọng trong việc thiết kế và chế tạo. Công nghệ in 3D và gia công CNC là hai phương pháp chính, cho phép tạo ra các chi tiết có cấu trúc phức tạp mà không cần khuôn mẫu. Các nghiên cứu lý thuyết thường tập trung vào việc tối ưu hóa quy trình chế tạo để đảm bảo độ chính xác và hiệu suất cao.

Mô phỏng nghiên cứu chế tạo chi tiết chịu uốn sử dụng kết cấu lattice thường được thực hiện bằng các phương pháp như phân tích phần tử hữu hạn (Finite Element Analysis - FEA). Phương pháp này cho phép các nhà

nghiên cứu đánh giá khả năng chịu lực, đặc tính uốn, và tối ưu hóa thiết kế của kết cấu lattice trong các điều kiện tải trọng khác nhau.

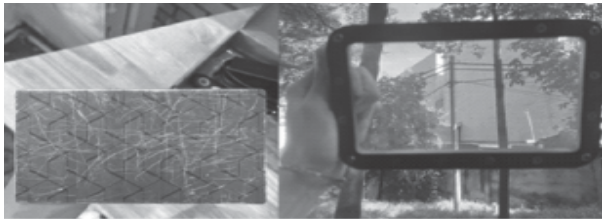
Mô phỏng chế tạo chi tiết chịu uốn sử dụng kết cấu lattice bằng phần mềm ANSYS là một quy trình phức tạp nhưng rất hiệu quả để phân tích và tối ưu hóa thiết kế. Sử dụng ANSYS Design Modeler để tạo mô hình chi tiết với kết cấu lattice. Mô hình này cần phản ánh chính xác hình học và các đặc điểm của chi tiết thực tế. Sử dụng ANSYS Meshing để chia lưới mô hình. Quá trình này giúp phân chia mô hình thành các phần tử nhỏ hơn để phân tích chính xác hơn. Nhập các thông số vật liệu như độ bền kéo, độ cứng, và khả năng chịu mỏi. ANSYS hỗ trợ nhiều loại vật liệu, từ kim loại đến composite. Mô phỏng các điều kiện tải trọng thực tế, như lực uốn, lực kéo, hoặc áp suất. Điều kiện biên cũng cần được thiết lập để phản ánh môi trường hoạt động của chi tiết. Sử dụng các module như ANSYS Mechanical để phân tích ứng suất, biến dạng, và khả năng chịu uốn của kết cấu lattice. Tối ưu hóa thiết kế bằng cách điều chỉnh các thông số như độ dày thanh, hình dạng, hoặc cấu trúc mạng lưới.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

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. Biến dạng của chi tiết được phân bố đồng đều hơn khi thiết kế tối ưu, giúp cải thiện khả năng chịu uốn. Các thiết kế lattice tối ưu hóa có thể giảm đáng kể trọng lượng mà vẫn đảm bảo độ bền cơ học. 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. Các kết quả mô phỏng có thể gợi ý những cải tiến trong thiết kế, chẳng hạn như thay đổi vật liệu hoặc cấu trúc để tăng khả

năng chịu lực. Thảo luận cũng có thể bao gồm các hạn chế của mô phỏng, như độ chính xác của mô hình vật liệu hoặc điều kiện biên.

3.1. Chuẩn bị thí nghiệm



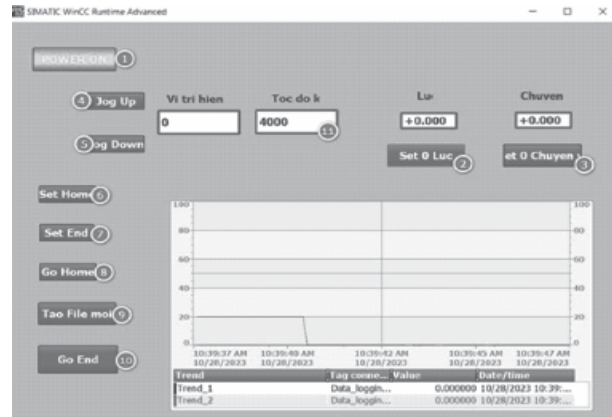
Hình 1. Kiểm tra màn UV



Hình 2. Cài đặt các thông số in 3D

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.



Hình 3. Giao diện cài đặt thông số 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.

3.2. Sản phẩm

3.2.1. Khái quát

Sản phẩm được thiết kế dưới dạng *lưới cubic*, đây là một kiểu cấu trúc phổ biến trong

kỹ thuật với các ô đều đặn, có tính ứng dụng cao trong công nghiệp, kỹ thuật cơ khí, và các hệ thống kỹ thuật công trình. Được chế tạo từ vật liệu nhựa có tính chịu lực và chống mài mòn, sản phẩm này đáp ứng các tiêu chuẩn kỹ thuật khắt khe và phù hợp với các ứng dụng đòi hỏi tính chính xác và bền bỉ.

Với kiểu dáng nhỏ gọn và được tối ưu hóa qua việc phân bố đồng đều các ô lưới, sản phẩm không chỉ nhẹ mà còn có khả năng chịu tải trọng tốt, thích hợp cho cả môi trường áp lực cao hay môi trường yêu cầu tính thông thoáng như hệ thống lọc khí, lọc nước, hoặc làm bề mặt giảm ma sát.



Hình 4. Sản phẩm in 3D

- Cấu hình mạng ô đều (Uniform Grid): Lưới cubic được hình thành từ các ô hình vuông hoặc chữ nhật đều đặn, với các đường liên kết vuông góc tạo thành mạng lưới ba chiều. Điều này đảm bảo sự phân bố đồng đều của tải trọng và tối ưu hóa không gian trống.

- Tỷ lệ rỗng so với đặc (Void-to-Solid Ratio): Thiết kế mạng ô đều cung cấp tỷ lệ rỗng lớn, tạo ra khả năng thông khí, thoát nước hoặc giảm trọng lượng mà không làm suy giảm đáng kể độ bền kết cấu.

- Tính đối xứng: Lưới cubic đảm bảo sự đối xứng hoàn hảo, giúp cải thiện hiệu suất cơ học, dễ dàng dự đoán và kiểm soát hành vi của cấu trúc dưới tác động của lực.

- Phân phối tải trọng: Lưới cubic phân bố lực đồng đều trên toàn bộ bề mặt, giảm thiểu nguy cơ tập trung lực (stress concentration) tại

các điểm kết nối. Điều này giúp tăng tuổi thọ sản phẩm và giảm nguy cơ hư hỏng. Khả năng chịu lực nén và lực kéo phụ thuộc vào mật độ ô (cell density) và độ dày của thành ô.

- Độ bền uốn: Với cấu trúc ô đều, lưới cubic có khả năng chịu được lực uốn từ nhiều hướng khác nhau mà vẫn giữ được độ ổn định hình dạng.

- Khả năng chống biến dạng: Cấu trúc ba chiều cho phép chống lại sự biến dạng trong điều kiện áp suất lớn hoặc tải trọng thay đổi liên tục.

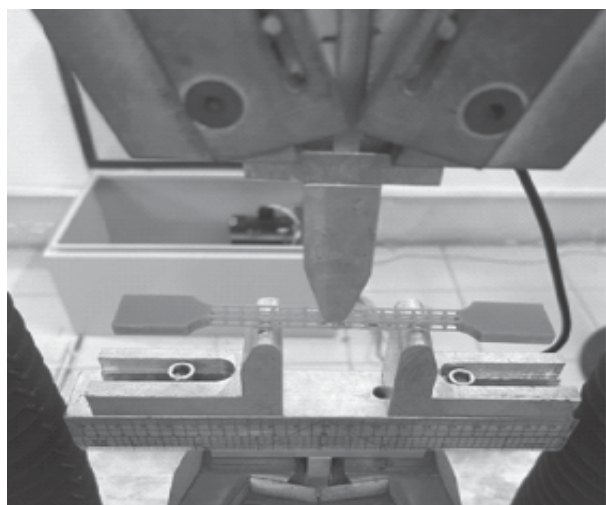
- Ứng dụng trong ngành xây dựng: Lưới cubic được sử dụng làm lưới gia cố trong nền móng hoặc các bề mặt cần khả năng thoát nước tốt, như trong thi công đường bộ hoặc tòa nhà.

- Ứng dụng trong ngành cơ khí: Các mạng ô đều được tích hợp vào thiết kế các bộ phận giảm trọng lượng, như khung máy móc, hoặc làm lớp giảm chấn trong hệ thống cơ động.

- Ứng dụng trong công nghiệp in 3D: Cấu trúc này thường được sử dụng trong in 3D để tạo ra các sản phẩm nhẹ nhưng vẫn đảm bảo độ bền cao.

- Ưu điểm: Tối ưu hóa vật liệu, hiệu năng cao, và đa dạng ứng dụng từ cơ khí, xây dựng, y tế đến chế tạo các sản phẩm công nghiệp phức tạp.

- Hạn chế: Việc chế tạo lưới cubic đòi hỏi công nghệ gia công hiện đại để đảm bảo tính đồng nhất và kích thước chính xác. Ngoài ra, tùy vào vật liệu sử dụng, khả năng chịu nhiệt của lưới có thể bị giới hạn.



Hình 5. Thử uốn mẫu

3.2.2. Thông số kích thước

- 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.

3.2.3. Phân tích

a) Ưu điểm cấu trúc và thiết kế:

- Độ bền cao: Thiết kế dạng lưới cubic đảm bảo phân bố đều lực tác động, giảm tải trọng tập trung, giúp sản phẩm có khả năng chịu lực tốt mà không bị biến dạng.
- Khối lượng nhẹ: Với vật liệu nhựa kỹ thuật và cấu trúc lưới, sản phẩm đạt được trọng lượng nhẹ, lý tưởng cho việc vận chuyển và lắp ráp.
- Khả năng thông thoáng tối ưu: Các ô lưới đường kính 2mm hỗ trợ lưu thông khí, nước hoặc chất lỏng, rất hữu ích trong các hệ thống làm mát, lọc hoặc thoát nước.
- Tính đa dụng: Phù hợp với nhiều lĩnh vực công nghiệp như:
 - + Hệ thống lọc khí, lọc nước.

+ Khuôn đúc sản phẩm hoặc làm bộ phận giảm ma sát trong cơ khí.

+ Vật liệu trong xây dựng, dùng làm bề mặt giảm lực hoặc hấp thụ nhiệt.

b) Hạn chế cần lưu ý:

- Khả năng chịu nhiệt giới hạn: Trong trường hợp nhiệt độ vượt quá mức chịu đựng của nhựa kỹ thuật, sản phẩm có thể bị hư hỏng hoặc biến dạng.

- Ứng dụng cụ thể: Kiểu thiết kế này không phù hợp với những hệ thống chịu lực cực lớn hoặc môi trường có áp suất vượt quá ngưỡng kỹ thuật.

c) Ứng dụng thực tiễn:

Sản phẩm này có thể được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực:

- Ngành cơ khí chế tạo: Sử dụng làm các bộ phận đệm hoặc giảm rung.
- Hệ thống môi trường: Làm phần tử trong hệ thống lọc nước hoặc khí.
- Ngành xây dựng: Lót bề mặt, tạo lớp giảm ma sát hoặc giảm áp lực nước tại các khe hở.

4. 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: Trần Thái Sơn;

- Thực hiện nghiên cứu, thu thập dữ liệu, phân tích dữ liệu, viết và chỉnh sửa bài báo: Trần Xuân Hoàng, Nguyễn Văn Tú, Nguyễn Quang Sáng, Tạ Nguyễn Minh Đức;

- Tác giả liên hệ: Tạ Nguyễn Minh Đức.

Lời cảm ơn:

Nhóm nghiên cứu xin gửi lời cảm ơn chân thành và sâu sắc nhất đến Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh vì đã tạo điều kiện tài trợ kinh phí và hỗ trợ tận tình trong suốt quá trình thực hiện nghiên cứu. Những sự đồng hành và giúp đỡ quý báu từ nhà trường đã góp phần rất lớn trong việc hoàn thiện đề tài nghiên cứu khoa học với mã số SV2025-369 này. Sự hỗ trợ không chỉ mang lại nguồn lực mà còn là động lực lớn để nhóm thực hiện nghiên cứu, đóng góp vào sự phát triển khoa học và kỹ thuật. Một lần nữa, nhóm xin chân thành cảm ơn sự ủng hộ và tin tưởng từ Quý nhà trường. ❖

Ngày nhận bài: 08/4/2025

Ngày phản biện: 22/4/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Lee, D.-W., Khan, K. A., & Abu Al-Rub, R. K. (2017), "Stiffness and yield strength of architected foams based on the Schwarz Primitive triply periodic minimal surface". International Journal of Plasticity, 95, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2017.03.005>
- [2]. Abueidda, D. W., Elhebeary, M., Shiang, C.-S. (Andrew), Abu Al-Rub, R. K., & Jasiuk, I. M. (2020), "Compression and buckling of microarchitected Neovius-lattice". Extreme Mechanics Letters, 37, 100688. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2020.100688>
- [3]. Celestine, A.-D. N., Agrawal, V., & Runnels, B. (2020), "Experimental and numerical investigation into mechanical degradation of polymers". Composites Part B: Engineering, 201, 108369. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108369>
- [4]. Wu, W., Geng, P., Li, G., Zhao, D., Zhang, H., & Zhao, J. (2015), "Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS". Materials, 8(9), 5834-5846. <https://doi.org/10.3390/ma8095271>
- [5]. Modrek, M., Viswanath, A., Khan, K. A., Hassan Ali, M. I., & Abu Al-Rub, R. K. (2023), "Multi-objective topology optimization of passive heat sinks including self-weight based on triply periodic minimal surface lattices". Case Studies in Thermal Engineering, 42, 102684. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102684>
- [6]. Maskery, I., Aremu, A. O., Parry, L., Wildman, R. D., Tuck, C. J., & Ashcroft, I. A. (2018), "Effective design and simulation of surface-based lattice structures featuring volume fraction and cell type grading". Materials & Design, 155, 220-232.
- [7]. Viswanath, A., Khalil, M., Khan, M. K. A., Al Maskari, F., Cantwell, W. J., & Khan, K. A. (2024), "A novel design strategy to enhance buckling resistance of thin-walled single-cell lattice structures via topology optimisation". Virtual and Physical Prototyping, 19(1), e2345390. <https://doi.org/10.1080/17452759.2024.2345390>
- [8]. Zhu, Y., Pan, J., Polyzos, E., Wang, J., & Pyl, L. (2024), "Design and numerical analysis of perforated plate lattice structures". Thin-Walled Structures, 204, 112339. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112339>
- [9]. Zhang, Q., et al. (2015), "Bioinspired engineering of honeycomb structure – using nature to inspire human innovation". Progress in Materials Science, 74, 332-400. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.05.001>
- [10]. Zhang, J., & Lu, G. (2023), "Energy absorption of re-entrant honeycombs in tension and compression". Engineering Structures, 288, 116237. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116237>