

NGHIÊN CỨU CƠ TÍNH VẬT LIỆU CẤU TRÚC LƯỚI CHO CÔNG NGHỆ IN 3D BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN

STUDYING THE MECHANICAL PROPERTIES OF LATTICE MATERIALS FOR 3D PRINTING USING THE FINITE ELEMENT METHOD

Hoàng Trọng Hiếu¹, Nguyễn Văn Thiên Ân², Nguyễn Công Hành², Nguyễn Đình Sơn^{2*}

¹Trường Sư phạm Kỹ thuật - Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam

²Trường Đại học Bách khoa - Đại học Đà Nẵng, Đà Nẵng, Việt Nam

*Tác giả liên hệ / Corresponding author: ndson@dut.udn.vn

(Nhận bài / Received: 14/7/2023; Sửa bài / Revised: 23/8/2023; Chấp nhận đăng / Accepted: 29/8/2023)

Tóm tắt - Một trong những ứng dụng chính của công nghệ gia công đắp lớp là chế tạo các cấu trúc lưới, là các cấu trúc có trọng lượng nhẹ và độ bền cao. Tuy nhiên, việc mô phỏng các cấu trúc lưới để đánh giá các tính chất cơ học của chúng là một thách thức, vì nó đòi hỏi nhiều thời gian tính toán và bộ nhớ. Bài báo này giới thiệu một phương pháp mới để tự động tạo mô hình hình học của các cấu trúc lưới trong môi trường thiết kế hỗ trợ bằng máy tính (CAD-Computer Aided Design). Mô hình này sau đó được sử dụng để mô phỏng bằng phân tích phần tử hữu hạn (FEA-Finite Element Analysis) nhằm kiểm tra các tính chất cơ học của từng cấu hình của cấu trúc lưới. Phương pháp này được áp dụng để mô phỏng các cấu trúc lưới có các hình dạng và kích thước khác nhau. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp này có thể được sử dụng để đánh giá chính xác các tính chất cơ học của các cấu trúc lưới.

Từ khóa - Vật liệu cấu trúc lưới; in 3D; mô phỏng; phần tử hữu hạn (FEA); gia công đắp lớp (AM).

1. Đặt vấn đề

Ngày nay, máy tính đã trở thành công cụ rất phổ biến và hữu ích để hỗ trợ các hoạt động thiết kế sản phẩm nhờ vào sự phát triển của khoa học và công nghệ. Các nhà thiết kế sản phẩm có thể xây dựng mô hình hình học 3D của sản phẩm một cách nhanh chóng nhờ môi trường thiết kế hỗ trợ máy tính. Hầu hết các mô phỏng để xác minh độ bền và tính chất cơ học của sản phẩm được thiết kế đều dựa trên mô hình này. Sau khi hoàn thành thiết kế mô hình sản phẩm trên máy tính, nhà thiết kế sản phẩm sau đó sẽ làm việc với các kỹ sư quá trình sản xuất để chọn quy trình sản xuất và công nghệ phù hợp để sản xuất sản phẩm thiết kế. Các yêu cầu về thời gian để thiết kế và sản xuất sản phẩm phải được giảm và rút ngắn trong bối cảnh hội nhập kinh tế toàn cầu. Đặc biệt, chất lượng và giá thành của sản phẩm là hai yếu tố quan trọng quyết định sự thành công của sản phẩm được thiết kế trên thị trường. Do đó, các nhà thiết kế sản phẩm luôn tìm cách thiết kế sản phẩm bằng cách sử dụng ít vật liệu nhất có thể, nhưng độ bền và tính chất cơ học của sản phẩm vẫn được đảm bảo. Hơn nữa, cần phải chọn quy trình sản xuất phù hợp để có thể chế tạo sản phẩm một cách nhanh chóng. Một trong những giải pháp để giảm việc sử dụng vật liệu và khối lượng của sản phẩm là sử dụng cấu trúc lưới để thay thế cho vật liệu đặc [1]. Việc sử dụng cấu trúc lưới thay thế vật liệu đặc bên trong không gian sản

Abstract - One of the key applications of additive manufacturing is to fabricate lattice structures, which are lightweight and high-strength ones. Consequently, lattice structures have found widespread application in industrial product design, effectively reducing material usage and product weight. However, the simulation and assessment of mechanical properties for lattice structures in the product design space present challenges, including extended computation times and memory consumption. In order to tackle these concerns, this paper presents an innovative approach for automatically generating geometric models of lattice structures within a computer-aided design environment. Subsequently, these models are utilized in finite element method simulations to thoroughly investigate the mechanical properties of various lattice structure configurations. The simulation results showed that this method can be used to accurately evaluate the mechanical properties of the lattice structures.

Key words - Lattice structure; 3D printing technology; simulation; Finite Element Analysis (FEM); additive manufacturing (AM).

phẩm có thể khiến sản phẩm không thể chế tạo bằng các công nghệ sản xuất truyền thống như đúc, rèn, dập, tiện và phay. Tuy nhiên, sự xuất hiện của các công nghệ gia công đắp lớp (Additive Manufacturing - AM) có thể giải quyết tất cả các nhược điểm của những công nghệ truyền thống. Cấu trúc lưới có thể được sản xuất nhanh chóng bởi các quy trình AM.

AM là một thuật ngữ khoa học để mô tả các công nghệ sản xuất được phát triển từ các công nghệ tạo mẫu nhanh trong những năm 1980 [2]. Nguyên tắc cơ bản của quy trình AM là phủ lên từng lớp vật liệu mỏng cho đến khi tạo thành sản phẩm cuối cùng. Các công nghệ AM có thể được chia thành bảy loại khác nhau:

- VAT Photopolymerization;
- Binder Jetting;
- Material Jetting;
- Material Extrusion;
- Powder Bed Fusion;
- Sheet Lamination;
- Directed Energy Deposition.

Hiệu quả quan trọng nhất của công nghệ AM là có thể tạo ra bất kỳ hình dạng phức tạp nào của sản phẩm. Kết quả là, cấu trúc lưới có khả năng được sản xuất. Nó được sử

¹ The University of Danang – University of Technology and Education, Danang, Vietnam (Hoang Trong Hieu)

² The University of Danang – University of Science and Technology, Danang, Vietnam (Nguyen Van Thien An, Nguyen Cong Hanh, Nguyen Dinh Son)

dụng rộng rãi trong thiết kế sản phẩm công nghiệp để giảm thiểu việc sử dụng vật liệu và giảm trọng lượng của sản phẩm. Cấu trúc lưới được áp dụng trong nhiều ứng dụng công nghiệp về cải thiện độ bền và tính chất cơ học của vật liệu [3, 4], kỹ thuật nhiệt [5-7], kỹ thuật y sinh [8, 9].

Cấu trúc lưới là một tập hợp các thanh nối với nhau để tạo ra một cấu trúc thống nhất trong không gian thiết kế. Cấu trúc lưới có thể được phân loại thành hai loại là cấu trúc lưới tuần hoàn và không tuần hoàn [10]. Cấu trúc lưới tuần hoàn bao gồm cấu trúc ô đơn vị lặp lại một cách có hệ thống dọc theo ba hướng của hệ tọa độ. Cấu trúc lưới không tuần hoàn được tạo bởi các thanh liên kết với nhau một cách tự do mà không cần cấu trúc ô đơn vị. Chiều dài và bán kính của các thanh là hoàn toàn khác nhau trong một khối lượng của cấu trúc lưới không tuần hoàn.

Có nhiều nghiên cứu để tạo ra một khối cấu trúc lưới tuần hoàn trong môi trường thiết kế có sự trợ giúp của máy tính [11-13]. Các phương pháp được đề xuất có thể giúp người thiết kế sản phẩm tích hợp cấu trúc lưới vào không gian của sản phẩm một cách nhanh chóng. Kết quả là, mô hình hình học của sản phẩm với cấu trúc lưới có thể được tạo ra trong bất kỳ phần mềm thiết kế hỗ trợ máy tính thương mại nào. Nhà thiết kế sản phẩm có thể sử dụng cấu trúc lưới thay thế không gian vật liệu đặc của sản phẩm được thiết kế. Việc sử dụng vật liệu để sản xuất sản phẩm được thiết kế có thể được giảm đáng kể bởi cấu trúc lưới. Tuy nhiên, việc thay thế vật liệu đặc bằng cấu trúc lưới có thể khiến sản phẩm được thiết kế có nguy cơ không đáp ứng được độ bền và tính chất cơ học của nó. Vì vậy, các câu hỏi nghiên cứu quan trọng phải được xem xét:

- Làm thế nào để thay thế vật liệu đặc bằng cấu trúc lưới phù hợp?
- Làm thế nào để nghiên cứu độ bền và tính chất cơ học của sản phẩm với cấu trúc lưới?

Để tìm ra câu trả lời cho những câu hỏi này, có một số nghiên cứu để khảo sát các tính chất cơ học của cấu trúc lưới bằng cách sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEA) [14, 15]. Tuy nhiên, các nghiên cứu này sử dụng phương pháp chia lưới trên mô hình hình học của cấu trúc lưới, nên số lượng phần tử rất lớn và thời gian tính toán cũng rất cao [16]. Chính vì vậy, bài báo này sẽ giới thiệu một phương pháp mô phỏng mới để khảo sát cơ tính của vật liệu cấu trúc lưới với nhiều cấu hình khác nhau, từ đó tìm ra được mối quan hệ giữa các yếu tố của tính chất cơ học và bán kính của các thanh trong cấu trúc lưới. Phương pháp đề xuất này có thể giảm rất nhiều số lượng phần tử và thời gian tính toán.

2. Phương pháp nghiên cứu cơ tính vật liệu cấu trúc lưới

Vật liệu cấu trúc lưới là tập hợp của rất nhiều các phần tử, có thể lên đến hàng ngàn, hàng triệu phần tử trong một thể tích vật liệu cấu trúc lưới. Bên cạnh đó, mỗi phần tử là sự kết hợp của nhiều thanh liên kết với nhau. Chính vì vậy, việc nghiên cứu tính chất cơ tính của vật liệu cấu trúc lưới sử dụng phương pháp FEA sẽ tốn rất nhiều thời gian và bộ nhớ vì số lượng các FEA sẽ tăng lên một cách đáng kể. Đó là lí do vì sao bài báo này giới thiệu một phương pháp phù hợp để có thể nghiên cứu cơ tính của nó bằng cách sử dụng FEA.

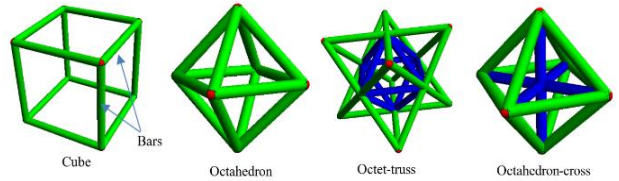


Hình 1. Phương pháp xây dựng mô hình FEA

Phương pháp đề xuất trong nghiên cứu này được thể hiện như trong Hình 1, trong đó việc xây dựng một mô hình hình học để trích xuất các dữ liệu hình học cơ bản gồm điểm và đường thẳng liên kết giữa các đỉnh với nhau. Dữ liệu này sau đó sẽ được sử dụng để xây dựng mô hình FEA (phần tử thanh được sử dụng thay thế cho phần tử 3D khác) và tiến hành khảo sát một số các tính chất cơ tính của vật liệu cấu trúc lưới thông qua việc khảo sát độ cứng, môđun đàn hồi hay ứng suất lớn nhất.

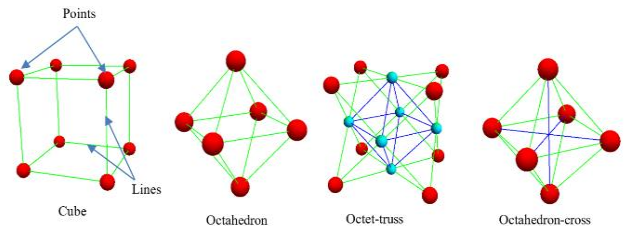
2.1. Mô hình hình học cấu trúc lưới

Cấu trúc lưới là một sự kết hợp của nhiều phần tử thanh liên kết giữa các điểm kết nối với nhau, đặc biệt đối với cấu trúc lưới tuần hoàn thì đó là sự lặp lại của phần tử cơ bản trong không gian của cấu trúc lưới [17, 18]. Nếu sử dụng các mô hình của các nghiên cứu trước đó để xây dựng mô hình FEA sẽ rất phức tạp vì hầu hết các mô hình cấu trúc lưới này được tạo trên phần mềm CAD 3D (xem Hình 2).



Hình 2. Mô hình 3D của các loại phần tử cấu trúc lưới

Việc xây dựng mô hình FEA trực tiếp từ các mô hình CAD 3D này thì số phần tử sử dụng để tính toán sẽ vô cùng lớn, dẫn đến thời gian tính toán sẽ tăng theo. Do vậy, việc khảo sát tính chất cơ tính như môđun đàn hồi, độ cứng và ứng suất lớn nhất trong một khối cấu trúc lưới sẽ không khả thi bằng phương pháp mô phỏng số so với phương pháp thực nghiệm vì số lượng phần tử và thời gian tính toán vô cùng lớn. Chính vì vậy, nghiên cứu này đề xuất xây dựng mô hình hình học cấu trúc lưới một cách đơn giản hơn dựa trên các tham số hình học đó là tọa độ điểm và đường kết nối giữa các điểm với nhau (xem Hình 3).



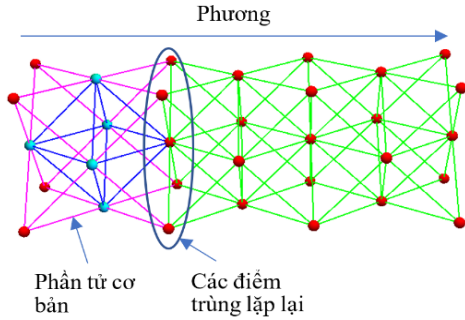
Hình 3. Mô hình hình học của các loại phần tử cấu trúc lưới

Mô hình hình học của cấu trúc lưới được đề xuất trong nghiên cứu này dựa trên bốn bước chính như sau:

- Bước 1: Tạo một hàng các cấu trúc lưới dựa trên phần tử cơ bản

Dựa trên các phần tử cơ bản của cấu trúc lưới như trong Hình 3 (chỉ bao gồm các tọa độ điểm và đường nối giữa các điểm) chúng ta sẽ sao chép các phần tử này một hướng nào đó theo hệ trục tọa độ (có thể chọn bất kỳ trục Ox hoặc Oy hoặc Oz). Việc sao chép này thực hiện bằng cách thay đổi số

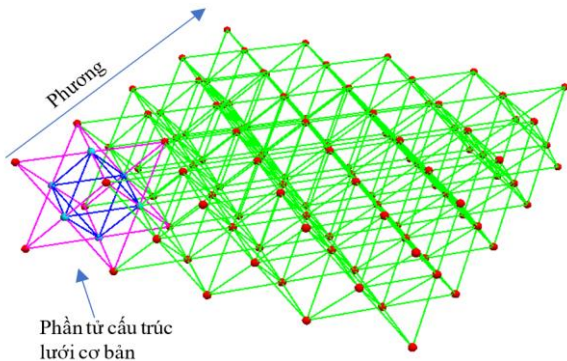
thứ tự các điểm, tọa độ của các điểm, xóa bỏ các điểm trùng lặp giữa hai phần tử cơ bản và sau đó sẽ cập nhật đường nối giữa các điểm trong phần tử mới (xem Hình 4).



Hình 4. Mô hình hình học của một hàng cấu trúc lưới

• Bước 2: Tạo một lớp các phần tử cấu trúc lưới

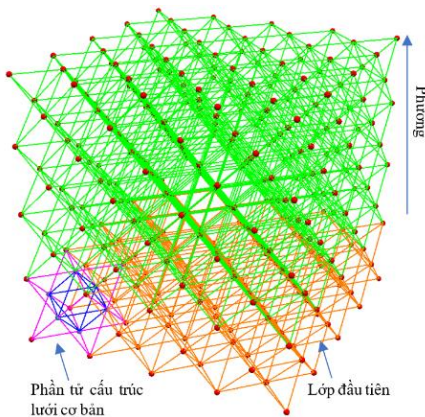
Sau khi một hàng các phần tử cấu trúc lưới được tạo ra, chúng ta sẽ sao chép một hàng các cấu trúc lưới này theo phương vuông góc (theo trục Oy của hệ trục tọa độ) để tạo thành một lớp các phần tử cơ bản của cấu trúc lưới. Tọa độ của các điểm mới và đường kết nối giữa các điểm sẽ được cập nhật và xóa bỏ các điểm trùng lặp giữa các hàng khi sao chép (xem Hình 5).



Hình 5. Mô hình hình học của một lớp cấu trúc lưới

• Bước 3: Tạo một khối cấu trúc lưới trong không gian

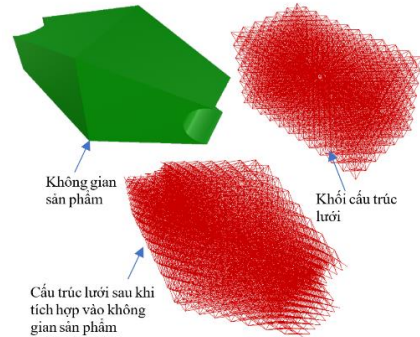
Sau khi một lớp cấu trúc lưới được tạo ra, chúng ta tiếp tục sao chép và xếp chồng từng lớp cấu trúc lưới để tạo thành một khối cấu trúc lưới trong không gian. Trong quá trình tạo khối cấu trúc này, tọa độ và số thứ tự các điểm của lớp mới sẽ được cập nhật, các điểm trùng lặp cũng sẽ bị loại bỏ (xem Hình 6).



Hình 6. Mô hình hình học của một lớp cấu trúc lưới

• Bước 4: Tạo cấu trúc lưới trong không gian của sản phẩm tích hợp

Một khối thể tích các phần tử cấu trúc lưới được tạo ra, chúng ta tiếp tục đưa khối thể tích này vào trong một không gian của sản phẩm cần tạo cấu trúc lưới để thay thế cấu trúc đặc ban đầu. Có nhiều cách để chúng ta có thể đưa cấu trúc này vào, chúng ta có thể loại bỏ phần cấu trúc lưới dư ra hoặc có thể sắp xếp lại các cấu trúc lưới này sao cho hoàn toàn nằm trong không gian đó (xem Hình 7).



Hình 7. Mô hình hình học của một lớp cấu trúc lưới

2.2. Phân tích FEA

Việc đánh giá tính chất cơ tính của vật liệu cấu trúc lưới thông qua phương pháp thực nghiệm sẽ tốn kém nhiều chi phí và thời gian thực hiện [19, 20]. Bên cạnh đó, việc tiến hành nghiên cứu thực nghiệm chỉ có thể thực hiện trên một số cấu trúc lưới tuần hoàn đặc biệt mà không thể nghiên cứu trên nhiều loại cấu trúc lưới tuần hoàn khác nhau.

Ngoài những nghiên cứu thực nghiệm như đã kể trên, cũng có một số nghiên cứu tính chất vật liệu cấu trúc lưới sử dụng phương pháp mô phỏng số dựa trên phương pháp FEA [21-23]. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu này đều thiết lập mô hình FEA dựa trên mô hình 3D của các cấu trúc lưới nên dẫn đến số phần tử và số bậc tự do vô cùng lớn. Do vậy, thời gian tính toán cho một lần mô phỏng là tương đối lớn nên khó có thể nghiên cứu được cơ tính của một số lượng lớn các phần tử cấu trúc lưới khác nhau.

Ưu điểm của phương pháp đã đề xuất trong bài báo là cho phép xác định một số thông số cơ bản cơ tính vật liệu như mô-đun đàn hồi, ứng suất lớn nhất và độ cứng vật liệu cấu trúc lưới một cách nhanh chóng, bên cạnh đó có thể xác định được mối quan hệ giữa các tham số và thông số hình học của vật liệu cấu trúc lưới. Phương pháp xây dựng mô hình được giới thiệu trong nghiên cứu này gồm có các bước sau (xem Hình 8):



Hình 8. Phương pháp xây dựng mô hình mô phỏng phần tử hữu hạn

• Bước 1: Nhập dữ liệu từ mô hình hình học cấu trúc lưới

Mô hình hình học một thể tích cấu trúc lưới được tạo ra với dữ liệu gồm tọa độ các điểm và đường kết nối giữa các điểm với nhau. Dữ liệu này sẽ được trích xuất để sử dụng trong việc xây dựng mô hình FEA.

• Bước 2: Xây dựng mô hình FEA

Dữ liệu sau khi trích xuất sẽ được sử dụng để xây dựng mô hình FEA. Trong đó, tọa độ các điểm của mô hình cấu trúc lưới sẽ là các nút trong mô hình FEA. Các đường kết nối giữa các điểm chính là phần tử thanh (dầm) trong mô hình FEA. Các điều kiện biên của mô hình cũng được thiết lập thông qua điều kiện khảo sát tính chất cơ tính của vật liệu cấu trúc lưới.

• Bước 3: Mô phỏng FEA

Sau khi xây dựng xong mô hình FEA, việc tính toán mô phỏng sẽ được thực hiện theo một vòng lặp. Trong đó, các thông số hình học của vật liệu cấu trúc lưới như đường kính của các thanh (dầm) sẽ thay đổi sau khi tính toán xong các tham số cơ tính.

• Bước 4: Xử lý kết quả

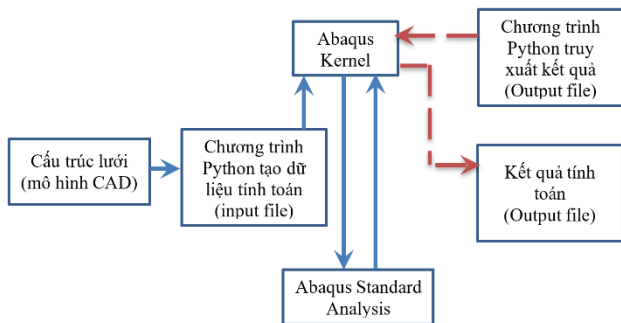
Kết quả tính toán mô phỏng sẽ được sử dụng để thiết lập mối quan hệ giữa các thông số cơ tính và tham số hình học của cấu trúc lưới.

3. Mô phỏng cơ tính vật liệu cấu trúc lưới trên phần mềm Abaqus

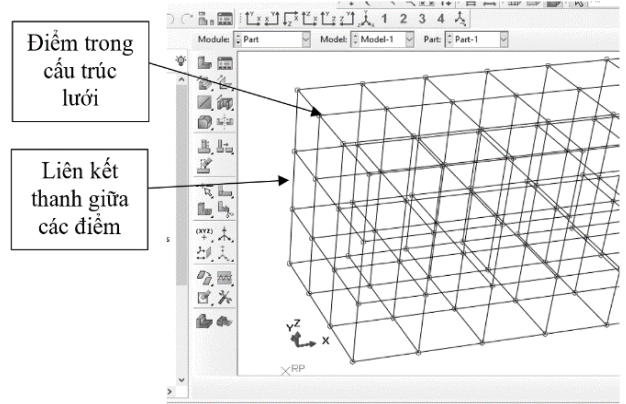
Phần mềm thương mại Abaqus dựa trên phương pháp FEA được sử dụng trong các ứng dụng công nghiệp nhằm giải quyết các bài toán từ đơn giản đến phức tạp. Nhằm hướng đến các bài toán cho nhiều lĩnh vực khác nhau trong thực tế, phần mềm được thiết kế theo dạng mô đun và có thể kết hợp với các phần mềm chuyên dụng khác để giải quyết các bài toán phức tạp. Ngoài ra, phần mềm có sẵn đầy đủ thư viện các phần tử và các loại vật liệu được sử dụng trong cơ khí cũng như xây dựng, nên phần mềm đáp ứng tốt với mục tiêu ứng dụng cũng như phát triển nghiên cứu sản phẩm hay vật liệu mới.

3.1. Tạo cấu trúc lưới trong Abaqus

Mô hình CAD của cấu trúc lưới có thể được xây dựng trong module Abaqus CAE hay có thể được khởi tạo từ phần mềm được xây dựng trước để đưa vào. Trong nghiên cứu này, các cấu trúc lưới được xây dựng từ chương trình do nhóm nghiên cứu tự phát triển trước đó. Tuy nhiên, để đưa mô hình vào Abaqus, nhóm nghiên cứu cần trích xuất mô hình CAD của cấu trúc lưới sang file dữ liệu gồm tập hợp tọa độ các điểm và thứ tự liên kết giữa các điểm trong cấu trúc. Kết nối dữ liệu của cấu trúc lưới với phần mềm Abaqus được minh họa trong Hình 9. Chương trình Python được xây dựng sẽ tạo ra mô hình CAD trong Abaqus từ dữ liệu tập hợp điểm và các kết nối giữa các điểm. Toàn bộ dòng lệnh đọc dữ liệu CAD và tạo mới mô hình CAD trong Abaqus được thực hiện trực tiếp trên Abaqus Kernel.



Hình 9. Quy trình tạo dữ liệu tính toán trong Abaqus

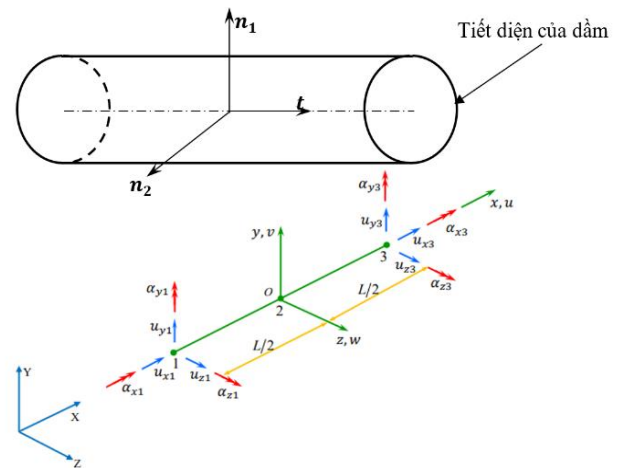


Hình 10. Cấu trúc lưới dạng lập phương trong Abaqus

Mô hình CAD được tạo trong Abaqus dưới dạng Wirepolylines 3D (xem Hình 10). Vật liệu được sử dụng trong tính toán là vật liệu đàn hồi. Các điều kiện biên của bài toán cũng được thiết lập một cách tự động qua chương trình Python. Các điều kiện biên được thiết lập tương ứng với kết cấu chịu kéo nén đúng tâm, chịu xoắn và chịu uốn.

3.2. Tính toán ứng xử của cấu trúc lưới

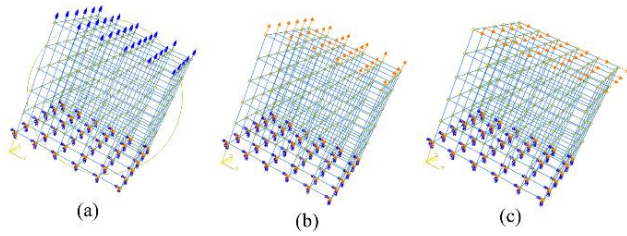
Ứng xử của cấu trúc lưới được thực hiện trong phân tích Abaqus Analysis Standard Implicit. Do cấu trúc lưới được cấu tạo từ các thanh thẳng có chiều dài lớn hơn nhiều so với các kích thước khác nên phần tử dầm (beam element) được sử dụng để nghiên cứu ứng xử của kết cấu. Phần tử dầm cho phép giảm đáng kể số bậc tự do của kết cấu từ đó giảm được thời gian tính toán so với phần tử khối 3D. Để xét đến ảnh hưởng của biến dạng cắt và biến dạng dọc trục của dầm trong cấu trúc, phần tử dầm B32H theo lý thuyết Timoshenko được sử dụng trong các tính toán.



Hình 11. Phần tử dầm và hệ trục định vị mặt cắt ngang của dầm

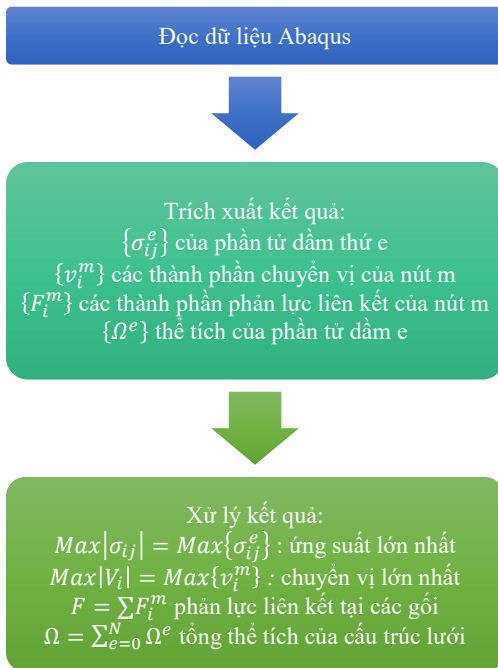
Cách bố trí mặt cắt ngang và phần tử dầm được biểu diễn qua Hình 11. Vectơ chỉ phương của mỗi phần tử dầm trong cấu trúc lưới được tính toán tự động trong chương trình python nhập dữ liệu mô hình từ tọa độ của các điểm trong cấu trúc lưới.

Ứng xử của cấu trúc lưới được xem xét qua các trường hợp chịu lực khác nhau là kéo nén đúng tâm, xoắn thuần túy và uốn phẳng. Điều kiện biên trong mô hình tính toán được định nghĩa trong chương trình nhập dữ liệu bằng Python (xem Hình 12).



Hình 12. Điều kiện biên khi chịu xoắn thuần túy (a), chịu kéo (b), chịu uốn (c)

Để đánh giá cơ tính của các cấu trúc lưới khác nhau, nghiên cứu cần chỉ ra sự phân bố của ứng suất bên trong cấu trúc, chuyển vị của các thanh bên trong cũng như tính được thể tích của các thanh tạo nên cấu trúc lưới. Kết quả tính toán Abaqus có sẵn các giá trị ứng suất của phần tử thanh, chuyển vị của các nút và thể tích của thanh. Nhóm nghiên cứu đã phát triển một công cụ tự động có khả năng đọc kết quả tính toán trong Abaqus để lấy ra chuyển vị lớn nhất, ứng suất lớn nhất và thể tích của cấu trúc thông qua thuật toán như Hình 13.



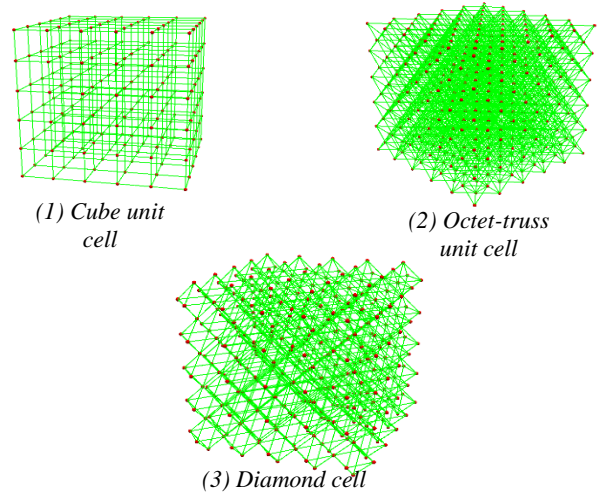
Hình 13. Xử lý kết quả bằng chương trình Python

4. Mô phỏng cơ tính vật liệu cấu trúc lưới trên phần mềm Abaqus

Để tiến hành thực hiện phương pháp nghiên cứu đề xuất, nhóm nghiên cứu đã tiến hành mô phỏng cơ tính của 3 loại cấu trúc lưới tuần hoàn với ô cơ sở có thể tích 10x10x10 (mm³). Trong đó, các thông số cơ bản đầu vào gồm mô-đun đàn hồi E=110GPa, hệ số Poisson ν=0,315. Tất cả các mô hình FEA đều sử dụng phần tử thanh (dầm) B32. Sau đó tiến hành kiểm tra các thông số độ cứng của cấu trúc lưới và ứng suất Von-Mises của cấu trúc lưới với thể tích 5x5x5 ô cấu trúc cơ bản cho các bài toán xoắn và nén đúng tâm.

Để thực hiện được những kết quả đó, đầu tiên cần xây dựng mô hình thể tích cấu trúc lưới với 3 loại ô cấu trúc cơ bản khác nhau (xem Hình 14). Sau đó, tiến hành thiết lập điều kiện biên cho các bài toán nén đúng tâm và uốn. Kết

quả mô phỏng được thể hiện trong các hình dưới đây (kết quả mô phỏng đầy đủ các bài toán cho 3 loại cấu trúc lưới được trình bày trong phần phụ lục).



Hình 14. Mô hình hình học cấu trúc lưới

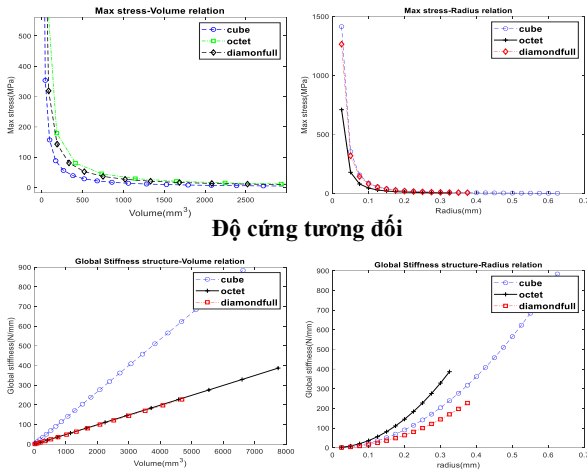
Kết quả tính toán mô phỏng được lặp đi lặp lại cho từng giá trị bán kính của các thanh liên kết giữa các điểm của cấu trúc lưới. Kết quả của chuyển vị tổng thể của bài toán uốn và nén đúng tâm được sử dụng để tính toán độ cứng tương đối của toàn bộ khối cấu trúc lưới và cũng như giá trị ứng suất lớn nhất xuất hiện trong khối cấu trúc lưới. Sau khi tính toán các tham số cơ bản của cơ tính, vẽ đồ thị thiết lập mối quan hệ giữa tham số hình học là bán kính của thanh trong các phần tử hoặc là thể tích của phần tử và các tham số cơ tính. Các kết quả mối quan hệ này được thể hiện trong các Hình 15 và 16 (có thể xem toàn bộ kết quả của các bài toán trong phần phụ lục).

Trong tất cả các bài toán nén đúng tâm và xoắn thì ứng suất lớn nhất xuất hiện trong các thanh của khối cấu trúc lưới giảm xuống một cách nhanh chóng theo hàm số mũ khi bán kính của thanh tăng lên. Điều này là phù hợp với lý thuyết vì khi bán kính của thanh tăng lên thì kích thước của thanh sẽ lớn hơn và khả năng chịu lực tốt hơn. Hay nói cách khác, tiết diện của thanh lớn hơn nên ứng suất trong thanh sẽ giảm xuống. Trong tất cả các bài toán trên, thì phần tử cấu trúc cơ sở lập phương là có giá trị ứng suất lớn nhất cao hơn các phần tử còn lại. Điều này thể hiện cấu trúc cơ sở lập phương có cơ tính kém hơn các phần tử còn lại nếu xét về tổng thể tích của khối cấu trúc lưới khảo sát. Như vậy, qua kết quả đánh giá sơ bộ ba loại cấu trúc lưới cơ sở này chúng ta có thể lựa chọn ô cấu trúc lưới cơ sở nào để tạo cấu trúc lưới tuần hoàn sử dụng trong việc thiết kế các sản phẩm. Ứng với mỗi vùng chịu lực và độ bền của sản phẩm mà chúng ta có thể lựa chọn được thể tích cấu trúc lưới phù hợp.

Bên cạnh đó, phương pháp này sử dụng phần tử thanh (dầm) nên giảm được rất nhiều thời gian tính toán cho một lần mô phỏng. Cụ thể thời gian cho mỗi lần tính toán khoảng 30 giây cho một lần chạy và khoảng 10 phút cho toàn bộ kết quả tính toán và thiết lập mối quan hệ giữa tham số cơ tính và tỉ trọng khối lượng cũng như kích thước của bán kính thanh thay đổi (cấu hình của máy tính là Intel Core i5 M460 2.53Ghz RAM 8GB).

Ứng suất lớn nhất cho bài toán nén

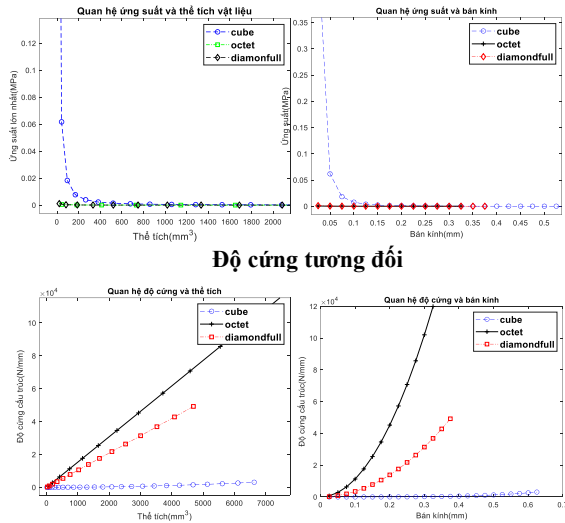
TÀI LIỆU THAM KHẢO



Độ cứng tương đối

Hình 15. Kết quả ứng suất lớn nhất và độ cứng trong bài toán nén đùng tâm

Ứng suất lớn nhất cho bài toán xoắn



Độ cứng tương đối

Hình 16. Kết quả ứng suất lớn nhất và độ cứng trong bài toán xoắn

5. Kết luận

Bài báo đã đề xuất một phương pháp đánh giá sơ bộ các tham số cơ tính của vật liệu cấu trúc lưới thông qua việc mô phỏng dựa trên phương pháp FEA. Phương pháp này cho phép thực hiện việc mô phỏng cho nhiều loại cấu trúc tuần hoàn với các ô cơ sở khác nhau và có thể thiết lập được mối liên hệ giữa các tham số cơ tính và tỉ trọng khối lượng hay thông số hình học của ô cấu trúc lưới. Với kết quả nghiên cứu này, sẽ giúp cho các nhà thiết kế sản phẩm tích hợp cấu trúc lưới bên trong sản phẩm một cách dễ dàng trong việc lựa chọn loại cấu trúc lưới như thế nào cho phù hợp. Đặc biệt là thiết kế các sản phẩm có khối lượng nhẹ trong các lĩnh vực hàng không và y tế.

Trong tương lai, hướng nghiên cứu sẽ tiếp tục phát triển cho các dạng cấu trúc lưới phức tạp hơn như cấu trúc lưới ngẫu nhiên và có thể sử dụng kết quả nghiên cứu này để tối ưu hóa các vùng cấu trúc lưới trong các sản phẩm khi nó chịu lực khác nhau.

- [1] J. Plocher and A. Panesar, "Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: Towards next-generation lightweight structures", *Materials & Design*, vol. 183, p. 108164, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108164>.
- [2] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive manufacturing technologies*, Springer, 2015, 10.1007/978-1-4939-2113-3.
- [3] B. Jagadeesh, M. Duraiselvam, K. G. Prashanth, "Deformation behavior of metallic lattice structures with symmetrical gradients of porosity manufactured by metal additive manufacturing", *Vacuum*, vol. 211, p. 111955, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2023.111955>.
- [4] X. Yu, Z. Wang, W. Fu, Z. Yu, Y. Wang, Y. Zhao, and J. Zhao, "Compression performances and damage mechanisms of Al₂O₃ ceramic lattices fabricated by additive manufacturing: Imitating metal crystal structures", *Ceramics International*, vol. 49, no. 1, pp. 1419-1435, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.123>.
- [5] T. Dixit, E. Al-Hajri, M. C. Paul, P. Nithiarasu, and S. Kumar, "High performance, microarchitected, compact heat exchanger enabled by 3D printing", *Applied Thermal Engineering*, vol. 210, p. 118339, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118339>.
- [6] I. Kaur, S. Mujahid, Y. Paudel, H. Rhee, and P. Singh, "Numerical Analysis of Flow and Heat Transfer Characteristics of Lattice-Based Compact Heat Sinks", *Journal of Electronic Packaging*, vol. 145, no. 3, pp. 1-18, 2022. DOI: 10.1115/1.4056305.
- [7] M. Shahrzadi, M. Davazdah Emami, and A. H. Akbarzadeh, "Heat transfer in BCC lattice materials: Conduction, convection, and radiation", *Composite Structures*, vol. 284, p.115159, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115159>.
- [8] S. A. Tyagi and M. Manjaia, "Additive manufacturing of titanium-based lattice structures for medical applications – A review", *Bioprinting*, vol. 30, e00267, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2023.e00267>.
- [9] X. Yue, J. Shang, M. Zhang, B. Hur, and X. Ma, "Additive manufacturing of high porosity magnesium scaffolds with lattice structure and random structure", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 859, p. 144167, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144167>.
- [10] A. Nazir, K. M. Abate, A. Kumar, and J.-Y. Jeng, "A state-of-the-art review on types, design, optimization, and additive manufacturing of cellular structures", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 104, no. 9, pp. 3489-3510, 2019. DOI: 10.1007/s00170-019-04085-3.
- [11] D. W. Rosen, "Computer-Aided Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures", *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 4, no. 5, pp. 585-594, 2007. DOI: 10.1080/16864360.2007.10738493.
- [12] C. Chu, G. Graf, and D. W. Rosen, "Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures", *Computer-Aided Design and Applications*, vol. 5, no. 5, pp. 686-696, 2008. DOI: 10.3722/cadaps.2008.686-696.
- [13] A. H. Azman, F. Vignat, F. Villeneuve, and D. S. Nguyen, "Creation of lattice structures with skeleton model for additive manufacturing", *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, vol. 15, no. 4, pp. 381-396, 2021. DOI: 10.1007/s12008-021-00767-z.
- [14] N. Lebaal, Y. Zhang, F. Demoly, S. Roth, S. Gomes, and A. Bernard, "Optimised lattice structure configuration for additive manufacturing", *CIRP Annals*, vol. 68, no. 1, pp. 117-120, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.054>.
- [15] H. Guo, A. Takezawa, M. Honda, C. Kawamura, and M. Kitamura, "Finite element simulation of the compressive response of additively manufactured lattice structures with large diameters", *Computational Materials Science*, vol. 175, p.109610, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2020.109610>.
- [16] D. Li, R. Qin, B. Chen, and J. Zhou, "Analysis of mechanical properties of lattice structures with stochastic geometric defects in additive manufacturing", *Materials Science and Engineering: A*, vol. 822, p. 141666, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141666>.
- [17] D. S. Nguyen, "Design of lattice structure for additive manufacturing in CAD environment", *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, vol. 13, no. 3, JAMDSM0057-JAMDSM0057, 2019. DOI: 10.1299/jamdsm.2019jamdsm0057.
- [18] D. S. Nguyen and F. Vignat, "A method to generate lattice structure

for Additive Manufacturing", in *2016 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 2016, pp. 966-970, DOI: 10.1109/IEEM.2016.7798021.

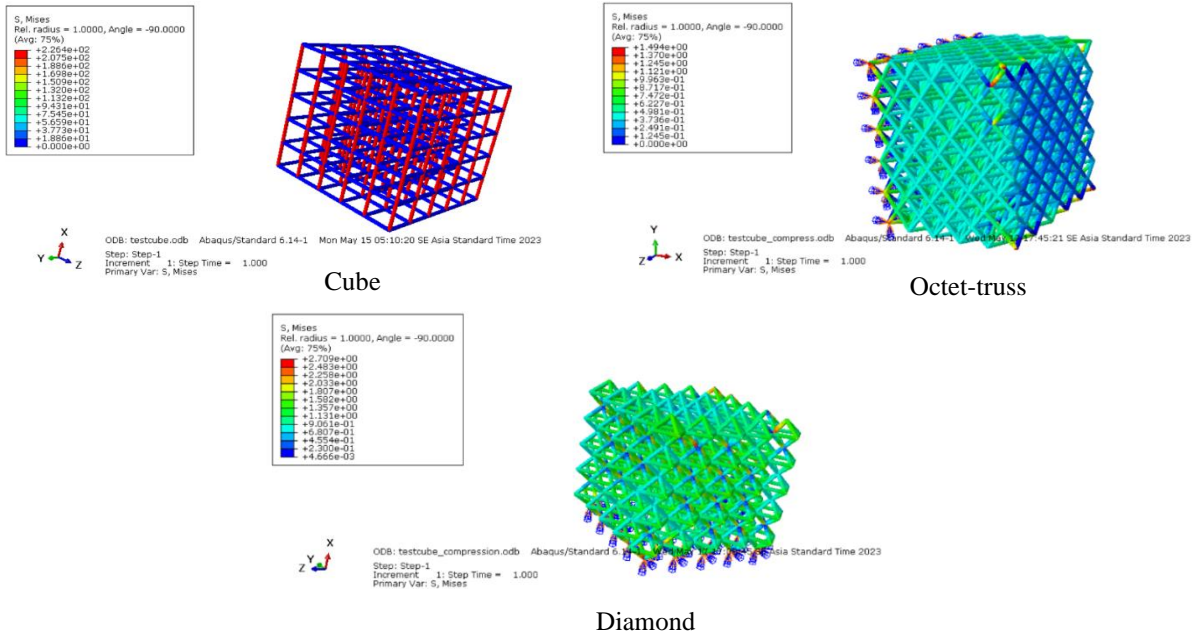
- [19] D. W. Abueidda, M. Elhebeary, C.-S. Shiang, S. Pang, R. K. Abu Al-Rub, and I. M. Jasiuk, "Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study", *Materials & Design*, vol. 165, 107597, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107597>.
- [20] X. Geng, Y. Lu, C. Liu, W. Li, and Z. Yue, "Fracture characteristic analysis of cellular lattice structures under tensile load", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 163, pp.170-177, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2019.01.006>.
- [21] H. S. Abdulhadi and A. Mian, "Effect of strut length and orientation

on elastic mechanical response of modified body-centered cubic lattice structures", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol 233, no. 11, p.1464420719841084, 2019. DOI: 10.1177/1464420719841084.

- [22] W. Chen, X. Zheng, and S. Liu, "Finite-Element-Mesh Based Method for Modeling and Optimization of Lattice Structures for Additive Manufacturing", *Materials*, vol. 11, no. 11, p. 2073, 2018. DOI: 10.3390/ma11112073.
- [23] M. Helou and S. Kara, "Design, analysis and manufacturing of lattice structures: an overview", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 31, no. 3, pp. 243-261, 2018. DOI: 10.1080/0951192X.2017.1407456.

PHỤ LỤC KẾT QUẢ MÔ PHỎNG TRÊN ABAQUS

I. BÀI TOÁN NÉN



II. BÀI TOÁN XOẪN

