

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA QUY LUẬT CẤP TẢI ÁP SUẤT ĐẾN CHẤT LƯỢNG TẠO HÌNH THỦY LỰC ỐNG ĐỒNG DẠNG CHỮ U CÓ NHÁNH

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PRESSURE LOADING PATHS ON THE FORMING QUALITY OF BRANCHED U-SHAPED COPPER TUBES IN HYDROFORMING

Đinh Văn Duy¹, Nguyễn Đắc Trung¹,
Trịnh Kiều Tuấn², Trịnh Thị Mai^{1,2*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huieh5804.2026.162>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của quy luật cấp tải áp suất đến quá trình dập thủy lực ống đồng CDA110 dạng chữ U có nhánh thông qua mô phỏng số phần tử hữu hạn trên phần mềm Abaqus/CAE. Trong nghiên cứu, điều kiện cấp liệu dọc trục được giữ không đổi, trong khi áp suất trong ống được áp dụng theo 7 quy luật cấp tải khác nhau, bao gồm 1 quy luật tuyến tính và 6 quy luật phi tuyến. Kết quả cho thấy các quy luật cấp tải phi tuyến có ảnh hưởng rõ rệt đến chất lượng tạo hình so với quy luật tuyến tính, thể hiện qua khả năng điền đầy khuôn cao hơn và phân bố chiều dày hợp lý hơn. Ba dạng quy luật đặc trưng gồm tăng áp nhanh ban đầu, tăng áp trung bình và tăng nhanh ở giai đoạn giữa cho hiệu quả vượt trội khi xét đồng thời chiều cao vấu và mức độ biến mỏng. Hiệu quả của từng quy luật phụ thuộc vào mức áp suất cực đại, với một số quy luật phù hợp ở áp suất trung bình (20 - 25MPa) và các quy luật khác hiệu quả hơn ở áp suất cao (30MPa). Nhìn chung, các quy luật phi tuyến giúp tăng chiều cao vấu khoảng 8 - 16% so với quy luật tuyến tính, đồng thời vẫn kiểm soát tốt biến mỏng. Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở khoa học cho việc lựa chọn và tối ưu hóa quy luật cấp tải trong công nghệ dập thủy lực ống.

Từ khóa: Dập thủy tinh ống đồng, Abaqus/CAE, quy luật cấp tải áp suất, mô phỏng số.

ABSTRACT

This paper presents a study on the influence of pressure loading paths on the hydroforming of U-shaped CDA110 copper tubes with branches using finite element simulation in Abaqus/CAE. In the study, the axial feeding condition is kept constant, while the internal pressure is applied through seven different loading paths, including one linear and six nonlinear cases. The results show that nonlinear loading paths significantly affect forming quality compared to the linear case, leading to improved die filling and more uniform thickness distribution. Three characteristic loading paths, including rapid initial loading, moderate loading, and accelerated loading in the intermediate stage, exhibit superior performance in terms of both branch height and thickness thinning. The effectiveness of each loading path depends on the maximum pressure level, with some paths performing better at medium pressures (20 - 25MPa) and others at higher pressure (30MPa). Overall, nonlinear loading paths increase branch height by approximately 8 - 16% compared to the linear case while maintaining good thinning control. The findings provide a scientific basis for selecting and optimizing loading paths in tube hydroforming processes.

Keywords: Tube hydroforming, Abaqus/CAE, pressure loading path, numerical simulation.

¹Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

²Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

*Email: ttmai@uneti.edu.vn

Ngày nhận bài: 20/01/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 26/3/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. GIỚI THIỆU

Công nghệ dập thủy lực ống (tube hydroforming) là một trong những phương pháp gia công áp lực tiên tiến, cho phép chế tạo các chi tiết rỗng có hình dạng phức tạp với độ chính xác cao và phân bố chiều dày hợp lý [1-3]. Đặc biệt, đối với các chi tiết dạng chữ U có nhánh, công nghệ này thể hiện ưu thế vượt trội so với các phương pháp truyền thống nhờ khả năng tạo hình đồng thời nhiều vùng biến dạng trong một nguyên công [4-6].

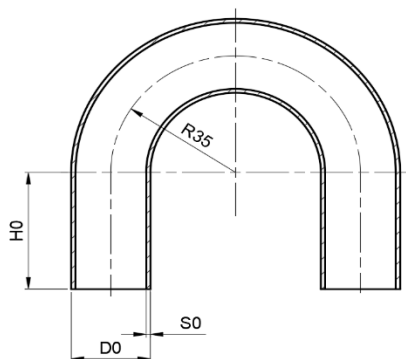
Tuy nhiên, quá trình tạo hình các chi tiết dạng này thường đối mặt với các vấn đề như biến mỏng cục bộ, phân bố chiều dày không đồng đều và khó khăn trong việc điền đầy khuôn, đặc biệt tại vùng nhánh và vùng bán kính cong ngoài [6, 7]. Những hạn chế này chịu ảnh hưởng mạnh bởi các thông số công nghệ, trong đó quy luật cấp tải áp suất theo thời gian (loading path) được xem là một trong những yếu tố quyết định đến cơ chế biến dạng và chất lượng sản phẩm [8-10].

Các nghiên cứu trước đây đã chỉ ra rằng việc điều chỉnh quy luật cấp tải có thể cải thiện đáng kể khả năng tạo hình, thông qua việc kiểm soát dòng chảy vật liệu và phân bố ứng suất trong quá trình biến dạng [10, 11]. Tuy nhiên, phần lớn các công trình tập trung vào các dạng chi tiết đơn giản hoặc chưa đánh giá một cách hệ thống ảnh hưởng của các dạng quy luật cấp tải khác nhau đối với chi tiết ống chữ U có nhánh [6, 7, 12].

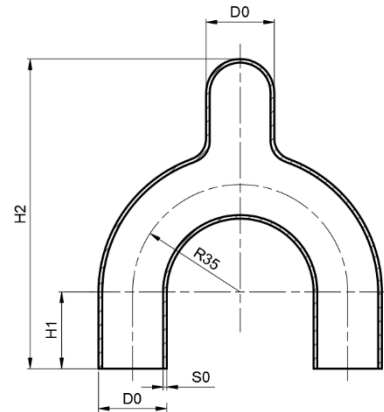
Xuất phát từ thực tế đó, nghiên cứu này tập trung phân tích ảnh hưởng của các quy luật cấp tải áp suất đến chất lượng tạo hình thủy lực ống chữ U có nhánh thông qua mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn. Các tiêu chí đánh giá chính bao gồm khả năng điền đầy khuôn (thể hiện qua chiều cao vấu) và mức độ biến mỏng thành ống. Trên cơ sở đó, nghiên cứu hướng tới việc xác định các quy luật cấp tải phù hợp nhằm nâng cao chất lượng tạo hình và hiệu quả công nghệ.

2. ĐỐI TƯỢNG NGHIÊN CỨU VÀ MÔ PHỎNG SỐ:

2.1. Đối tượng nghiên cứu



Hình 1. Bản vẽ chi tiết



Hình 2. Bản vẽ chi tiết sau tạo hình

Nghiên cứu được thực hiện trên phôi ống đồng CDA110 không hàn, có đặc tính cơ lý phù hợp cho quá trình tạo hình thủy lực nhờ độ dẻo cao và khả năng chống nứt tốt. Thông số phôi ban đầu và hình dạng sản phẩm sau khi tạo hình được thể hiện trong hình 1 và 2. Với giả sử sau uốn phôi có độ dày đồng đều trên toàn bộ ống và không tồn tại ứng suất dư.

Trong đó các thông số đầu vào:

$$D_0 = 22,22\text{mm}$$

$$S_0 = 1,2\text{mm}$$

$$H_0 = 35\text{mm}$$

$$R = 35\text{mm (bán kính đường trung hòa)}$$

Thông số đầu ra sản phẩm:

$$D_0 = 22,22\text{mm}$$

$$S_0 = 1,2\text{mm}$$

$$H_1 = 20\text{mm}$$

H_2 : Phụ thuộc vào chiều cao nhánh tạo thành sau mô phỏng, đây là biến cần xác định.

Bảng 1. Đặc tính kỹ thuật của vật liệu Cu CDA110 sau khi ủ [11]

Các thông số và đặc tính kỹ thuật của vật liệu CDA110	Giá trị
Nhiệt độ khảo sát thông số vật liệu ($^{\circ}\text{C}$)	24
Khối lượng riêng, ρ (kg/m^3)	8940
Mô đun đàn hồi, E (GPa)	115
Hằng số vật liệu, C (MPa)	325
Số mũ hóa bền, n	0,54
Hệ số Poisson, ν	0,33
Ứng suất chảy giới hạn, σ_y (MPa)	170
Ứng suất bền giới hạn, σ_u (MPa)	370
Mức độ giãn dài tương đối, ϵ (%)	40

Các thông số vật liệu CDA110 được trình bày trong bảng 1, bao gồm: mô đun đàn hồi, ứng suất chảy, giới hạn

bền kéo và hệ số hóa bền. Những dữ liệu này được khai báo trong thẻ Property của phần mềm Abaqus/CAE để phục vụ cho quá trình mô phỏng.

2.2. Mô phỏng số trên Abaqus/CAE

Trong nghiên cứu này, quá trình dập thủy tĩnh được mô phỏng bằng phần mềm Abaqus/CAE. Đây là một nền tảng phân tích phần tử hữu hạn (FEA) có độ chính xác cao, cho phép tái hiện chi tiết sự phân bố ứng suất và biến dạng trong vật liệu.

2.2.1. Quy trình mô phỏng số

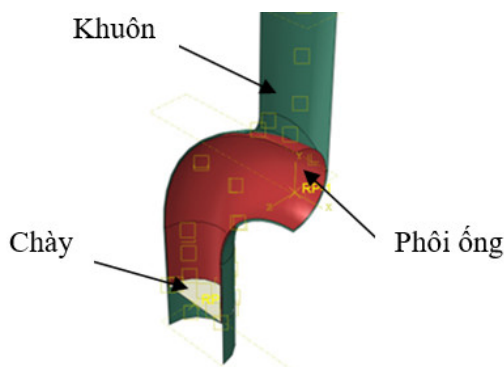
Mô phỏng được thực hiện theo các bước cơ bản: thiết kế hình học, khai báo vật liệu và thuộc tính phần tử, lắp ráp mô hình, chia lưới, thiết lập điều kiện biên và tải trọng, sau đó tiến hành tính toán và phân tích kết quả [13].

2.2.2. Mô hình hóa và điều kiện biên

Xây dựng mô hình hình học và tương tác:



Hình 3. Mô hình chia lưới phôi ống



Hình 4. Mô hình lắp ráp và tương tác

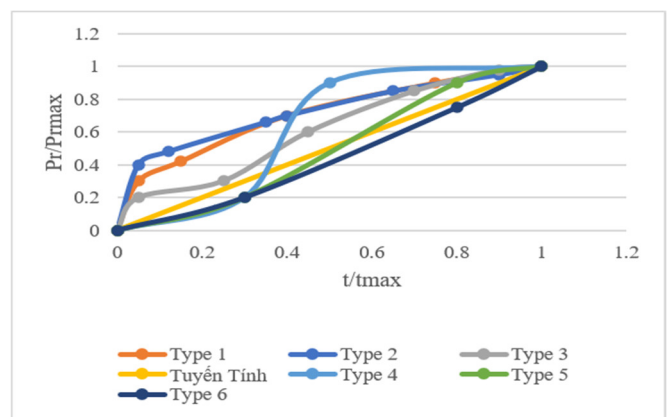
Để tiết kiệm thời gian và dung lượng tính toán, mô hình được xây dựng với $\frac{1}{4}$ hình học nhờ khai thác tính đối xứng của kết cấu [14]. Các bộ phận chính bao gồm khuôn, phôi ống và chày đầu ống. Phôi được mô hình hóa bằng

phần tử vỏ S4R trong Abaqus/CAE. Lưới phần tử phôi ống được chia với kích thước trung bình 0,5mm, các vùng cong được tinh chỉnh mịn hơn, nhỏ nhất khoảng 0,05mm thông qua thiết lập *Curvature control* và *Minimum size control*, với tổng cộng 9900 phần tử (hình 3). Tương tác tiếp xúc giữa các bề mặt (phôi - khuôn và phôi - chày) được định nghĩa với hệ số ma sát không đổi $\mu = 0,1$ [3] (hình 4).

Điều kiện biên:

Điều kiện biên là yếu tố ảnh hưởng trực tiếp đến kết quả mô phỏng. Khi gán điều kiện biên cho quá trình thủy tĩnh ống với bài nghiên cứu này cần chú ý đến các yếu tố: giá trị áp suất lòng ống, giá trị lực hay khoảng dịch chuyển chày đầu ống. Đồng thời cần phải chú ý đến việc khống chế chuyển động đối với những vùng lấy đối xứng để tránh những biến dạng không mong muốn. Trong mô hình, khuôn được cố định hoàn toàn. Các mặt phẳng đối xứng của phôi được gán ràng buộc symmetry để hạn chế chuyển động không mong muốn. Chày đầu ống được điều khiển dịch chuyển dọc trục Y (các bậc tự do khác bị khóa), trong khi mặt trong phôi được dùng để áp tải áp suất chất lỏng. Sau tất cả những thông số này thì vấn đề không nhỏ đó là quy luật cấp áp suất chất lỏng, dịch chuyển chày được đưa vào theo dạng nào: Tuyến tính hay phi tuyến.

2.2.3. Kích bản cấp tải



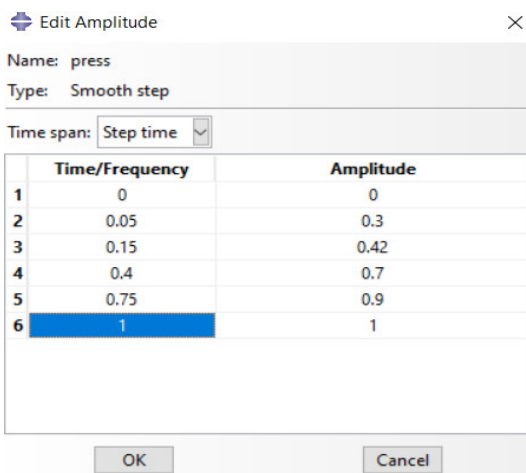
Hình 5. Các quy luật cấp tải áp suất không thứ nguyên ($P/P_{\max} - t/t_{\max}$)

Để đánh giá ảnh hưởng của quy luật cấp tải áp suất, nghiên cứu xem xét 1 quy luật tuyến tính (Linear) và 6 quy luật phi tuyến (Type 1 - Type 6), được xây dựng dưới dạng không thứ nguyên ($P/P_{\max} - t/t_{\max}$). Các quy luật được xây dựng nhằm đại diện cho các dạng phân bố áp suất điển hình, bao gồm tăng nhanh ở giai đoạn đầu, tăng đều theo thời gian và tăng trễ ở giai đoạn đầu kết hợp tăng nhanh ở các giai đoạn sau (hình 5). Các điểm đặc trưng của từng quy luật được lựa chọn nhằm đảm

bảo bao phủ các dạng phân bố áp suất điển hình trong quá trình tạo hình thủy lực.

Trong nghiên cứu này, các quy luật cấp tải được xây dựng bằng Tabular Amplitude trong Abaqus/Explicit, với thời gian được chuẩn hóa trong khoảng từ 0 đến 1 (hình 6). Việc sử dụng Tabular Amplitude cho phép mô tả linh hoạt các quy luật phi tuyến, đồng thời đảm bảo kiểm soát chính xác sự biến thiên áp suất theo thời gian.

Các hàm biên độ tương ứng với từng quy luật được định nghĩa trực tiếp trong tệp đầu vào (*.inp), nhằm thuận tiện cho việc hiệu chỉnh và triển khai các kịch bản mô phỏng khác nhau. Trong nghiên cứu này, áp suất chất lỏng cực đại (P_{max}) được lựa chọn tại ba mức 20, 25 và 30MPa [5].

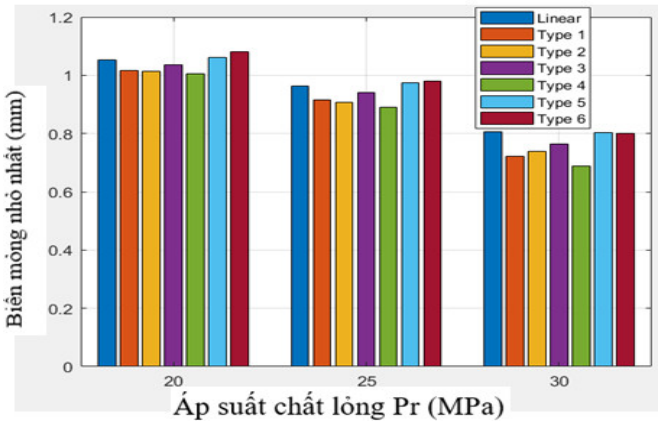
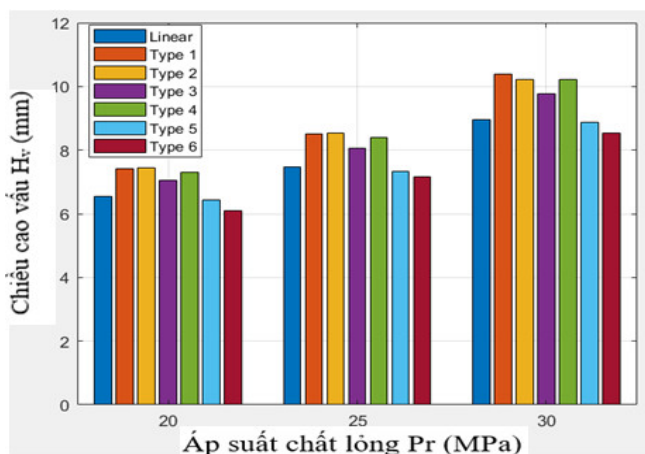


Hình 6. Biên độ cấp tải theo thời gian của Type 1

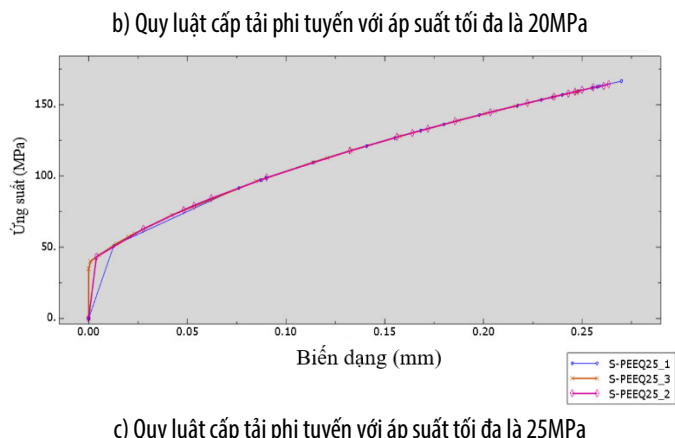
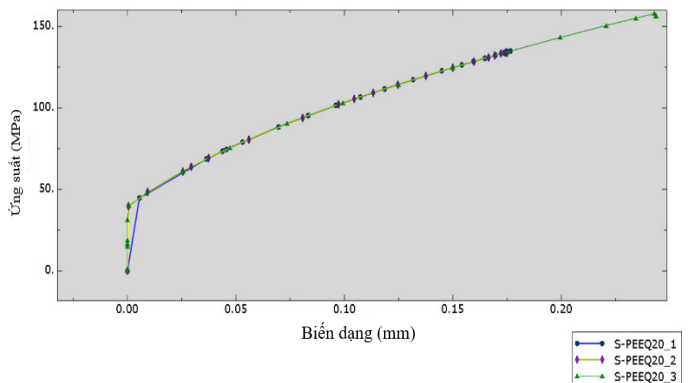
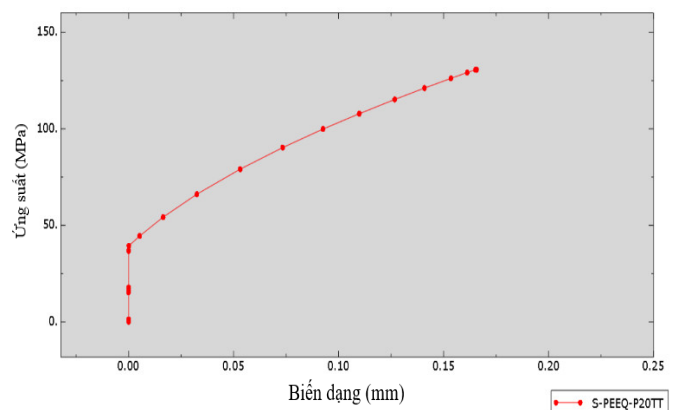
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

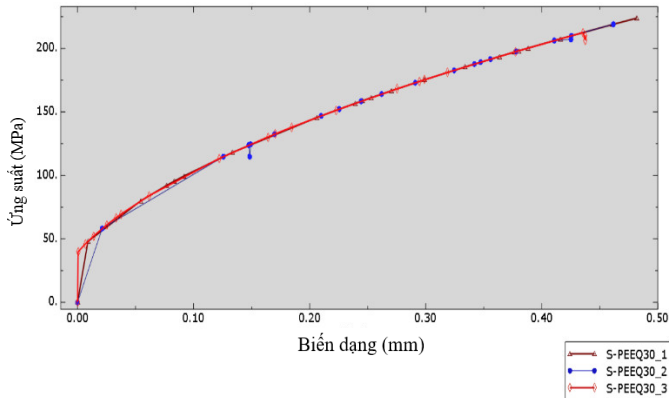
3.1. Thu thập kết quả

Sau khi thực hiện 21 mô phỏng (3 tuyến tính và 18 phi tuyến), kết quả thu thập thể hiện trong biểu đồ hình 7. Các đại lượng chính bao gồm: độ biến mỏng tại vùng xa nhất của vấu (STH) và chiều cao vấu (H_v). Ngoài ra, quan hệ ứng suất von Mises - biến dạng PEEQ tại đỉnh vấu theo các quy luật cấp tải được thể hiện ở hình 8.



Hình 7. Biểu đồ mối quan hệ quy luật cấp tải và áp suất lớn nhất đến chiều cao vấu và biến mỏng nhỏ nhất





d) Quy luật cấp tải phi tuyến với áp suất tối đa là 30MPa

Hình 8. Biểu đồ quan hệ ứng suất và biến dạng PEEK tại đỉnh vấu theo các kịch bản cấp tải

3.2. Thảo luận

Trong phạm vi nghiên cứu này, giá trị chiều dày nhỏ nhất khoảng 0,84mm (tương ứng với mức giảm chiều dày khoảng 30% so với ban đầu) được sử dụng như một mốc tham chiếu dựa trên kinh nghiệm, nhằm hỗ trợ so sánh và đánh giá các quy luật cấp tải.

3.2.1. Ảnh hưởng của cấp tải tuyến tính

Với quy luật cấp tải tuyến tính, khi áp suất tăng từ 20MPa lên 30MPa, chiều cao vấu tăng từ 6,554mm lên 8,950mm, trong khi chiều dày nhỏ nhất giảm từ 1,054mm xuống 0,807mm. Kết quả này cho thấy việc tăng áp suất giúp cải thiện khả năng điền đầy khuôn, tuy nhiên đồng thời làm gia tăng mức độ biến mỏng thành ống. Tại áp suất 30MPa, giá trị STH = 0,807mm thấp hơn ngưỡng tham chiếu (0,84mm), cho thấy nguy cơ mất ổn định và phá hủy cục bộ có thể xảy ra.

3.2.2. Ảnh hưởng của cấp tải phi tuyến

Kết quả mô phỏng cho thấy các quy luật cấp tải phi tuyến có xu hướng cải thiện rõ rệt khả năng tạo hình so với quy luật tuyến tính. Ở cùng mức áp suất, chiều cao vấu của các quy luật phi tuyến đều lớn hơn. Ví dụ, tại 30MPa, quy luật tuyến tính đạt $H_v = 8,950\text{mm}$, trong khi các quy luật phi tuyến tiêu biểu đạt $H_v = 10,376\text{mm}$ (quy luật 1), 10,209mm (quy luật 2) và 9,775mm (quy luật 3).

Đồng thời, các quy luật phi tuyến cho phép duy trì chiều dày thành trong phạm vi chấp nhận được ở các mức áp suất trung bình. Tại 25MPa, giá trị STH của các quy luật phi tuyến nằm trong khoảng 0,908 - 0,941mm, so với 0,963mm của quy luật tuyến tính, cho thấy sự đánh đổi hợp lý giữa khả năng tăng chiều cao vấu và kiểm soát biến mỏng.

Kết hợp với hình 7, có thể thấy các quy luật phi tuyến, đặc biệt là quy luật 1 và 2 ở mức áp suất 25MPa, giúp tăng chiều cao vấu từ 8 - 16% so với tuyến tính, đồng thời vẫn đảm bảo khả năng kiểm soát biến mỏng.

3.2.3. So sánh giữa các quy luật phi tuyến

Khi so sánh giữa các quy luật phi tuyến, có thể nhận thấy sự khác biệt rõ rệt về khả năng cân bằng giữa chiều cao vấu và mức độ biến mỏng:

- Quy luật 1 và 2 (tăng áp nhanh ở giai đoạn đầu) cho chiều cao vấu lớn nhất, đạt tới 10,37 mm tại 30MPa, tuy nhiên đồng thời dẫn đến mức biến mỏng lớn, với STH giảm xuống tới 0,722 mm, thấp hơn ngưỡng tham chiếu.
- Quy luật 3 cho kết quả trung gian, với chiều cao vấu tương đối cao (khoảng 10,209mm tại 30MPa) và mức biến mỏng thấp hơn so với quy luật 1 và 2, tuy nhiên vẫn chưa đạt ngưỡng an toàn về chiều dày.
- Quy luật 4 (tăng chậm ban đầu, tăng nhanh ở giai đoạn giữa) cho thấy sự gia tăng đáng kể chiều cao vấu khi áp suất tăng, tuy nhiên mức biến mỏng cũng tăng mạnh, dẫn đến nguy cơ mất ổn định ở áp suất cao.
- Quy luật 5 và 6 (tăng chậm 20% ban đầu, gần tuyến tính phần còn lại) cho kết quả cân bằng hơn giữa chiều cao vấu và chiều dày thành. Đặc biệt tại 30MPa, các quy luật này đạt $H_v \approx 9,775\text{mm}$ và $STH \approx 0,763\text{mm}$, cho thấy khả năng kiểm soát biến mỏng tốt hơn so với các quy luật khác.

Tại mức áp suất 25MPa, quy luật 3 tuy cho kết quả an toàn nhất với $STH = 0,941\text{mm}$ và $H_v = 8,072\text{mm}$, trong khi quy luật 1 và 2 cho chiều cao vấu lớn hơn và mức biến mỏng nhỏ nhất vẫn nằm trong giới hạn tham chiếu (0,84mm)

Như vậy, không tồn tại một quy luật cấp tải tối ưu cho mọi điều kiện. Hiệu quả của từng quy luật phụ thuộc rõ rệt vào mức áp suất áp dụng.

3.2.4. Quan hệ ứng suất - biến dạng

Hình 8 trình bày quan hệ giữa ứng suất von Mises và biến dạng dẻo tương đương (PEEQ) tại vùng đỉnh vấu. Các đường cong cho thấy ứng suất tăng dần theo biến dạng, phản ánh cơ chế hóa bền của vật liệu đồng CDA110.

So với quy luật tuyến tính, các quy luật phi tuyến làm đường cong dịch lên phía trên, tức là tại cùng mức biến dạng, ứng suất đạt được lớn hơn. Điều này góp phần thúc đẩy quá trình điền đầy khuôn và hình thành chiều cao vấu lớn hơn. Quy luật 1 và 2 tạo ra mức ứng suất cao nhất,

tương ứng với khả năng tạo hình sâu hơn nhưng cũng làm gia tăng nguy cơ biến mỏng cục bộ.

Xu hướng này phù hợp với kết quả phân tích hình học đã trình bày ở trên, qua đó giải thích sự gia tăng chiều cao vấu trong các quy luật cấp tải phi tuyến.

3.2.5. Nhận xét tổng hợp

Kết quả mô phỏng cho thấy quy luật cấp tải áp suất có ảnh hưởng rõ rệt đến cơ chế biến dạng và chất lượng tạo hình trong dập thủy lực ống. So với quy luật tuyến tính, các quy luật phi tuyến cải thiện khả năng điền đầy khuôn và phân bố chiều dày thành hợp lý hơn, đặc biệt ở vùng áp suất trung bình và cao, phù hợp với các nghiên cứu cơ bản về hydroforming [1-3].

Sự khác biệt giữa các quy luật chủ yếu xuất phát từ quá trình tích lũy biến dạng dẻo theo thời gian. Các quy luật tăng áp nhanh ở giai đoạn đầu giúp nâng cao chiều cao vấu ở áp suất trung bình (20 - 25MPa) do thúc đẩy dòng chảy vật liệu sớm vào vùng nhánh [4, 12]. Tuy nhiên, ở áp suất cao, đặc trưng này có thể làm gia tăng biến mỏng cục bộ do phân bố biến dạng chưa đồng đều [7, 8]. Ngược lại, các quy luật tăng chậm ban đầu và tăng nhanh ở giai đoạn giữa cho phép vật liệu phân bố ổn định hơn trước khi chịu tải lớn, từ đó cải thiện sự cân bằng giữa điền đầy khuôn và kiểm soát biến mỏng ở mức áp suất 30MPa [10, 11].

Kết quả cũng cho thấy không tồn tại một quy luật cấp tải tối ưu cho mọi điều kiện. Hiệu quả của từng quy luật phụ thuộc vào mức áp suất cực đại và trạng thái biến dạng tương ứng, phù hợp với các nghiên cứu trước [5, 9, 11]. Trong đó, ba dạng quy luật đặc trưng gồm: tăng áp nhanh ban đầu, tăng áp theo từng giai đoạn và tăng chậm ban đầu kết hợp tăng nhanh ở giai đoạn giữa cho kết quả tốt hơn khi xét đồng thời chiều cao vấu và mức độ biến mỏng.

Nhìn chung, ảnh hưởng của quy luật cấp tải trở nên rõ rệt khi biến dạng dẻo tích lũy đủ lớn, làm xuất hiện sự khác biệt về phân bố ứng suất và dòng chảy vật liệu [3, 13]. Do đó, việc lựa chọn quy luật cấp tải phù hợp là yếu tố quan trọng nhằm tối ưu hóa quá trình dập thủy lực ống và nâng cao chất lượng tạo hình.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã làm rõ ảnh hưởng của quy luật cấp tải áp suất đến chất lượng tạo hình thủy lực ống chữ U có nhánh. Kết quả cho thấy các quy luật cấp tải phi tuyến cải thiện đáng kể khả năng điền đầy khuôn và phân bố chiều dày thành so với quy luật tuyến tính, đặc biệt trong vùng áp suất trung bình và cao.

Các quy luật tăng áp nhanh ở giai đoạn đầu giúp nâng cao chiều cao vấu, trong khi các quy luật tăng chậm ban đầu và tăng nhanh ở giai đoạn giữa cho khả năng kiểm soát biến mỏng tốt hơn ở áp suất cao. Tuy nhiên, không tồn tại một quy luật tối ưu duy nhất; hiệu quả phụ thuộc vào sự phối hợp giữa quy luật cấp tải và mức áp suất cực đại.

Kết quả nghiên cứu là cơ sở để lựa chọn quy luật cấp tải phù hợp, góp phần nâng cao chất lượng tạo hình và hiệu quả của quá trình dập thủy lực ống.

Tuy nhiên, nghiên cứu hiện tại mới xét đến điều kiện ma sát đồng đều và chưa xem xét ảnh hưởng của đối áp cũng như các yếu tố công nghệ khác. Trong các nghiên cứu tiếp theo, cần mở rộng khảo sát với các điều kiện biên khác nhau, kết hợp thực nghiệm kiểm chứng nhằm nâng cao độ tin cậy và khả năng ứng dụng của kết quả.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Phạm Văn Nghệ, *Công nghệ dập thủy lực*. Đại học Bách khoa Hà Nội, 2006.
- [2]. Harjinder Singh, *Fundamentals of Hydroforming*. Society of Manufacturing Engineers (SME), 2003.
- [3]. Schuler GmbH, *Metal Forming Handbook*. Springer, 1998.
- [4]. Hajime Yasui, et al., "Material Deformation Behavior in T-Shape Hydroforming of Metal Microtubes," *Metals*, 10, 199, 2020. doi:10.3390/met10020199
- [5]. Trinh Thi Mai, Dinh Van Duy, et al., "Hydro-Forming of U-Shaped Parts with Branches," *Engineering Technology & Applied Science Research*, 15, 1, 19226-19231, 2025. Doi: <https://doi.org/10.48084/etasr.9227>
- [6]. Vũ Đức Quang, *Nghiên cứu công nghệ dập thủy tĩnh để tạo hình chi tiết rỗng dạng trụ bậc và chữ T từ phôi ống*. Luận án tiến sĩ, Đại học Bách khoa Hà Nội, 2024.
- [7]. Mihaita Matei, et al., "Assessment of process modeling tools for tube hydroforming using Abaqus software: finite element modeling and failure modes analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, 169, 127-133, 2005. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.06.045
- [8]. Edina Karabegović, et al., "Strain Zones and Attrition Influential Zones in Tube Hydroforming Process," *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering IJMME-IJENS*, 13, 01, 2013.
- [9]. B.Sreenivasulu, et al., "Simulative analysis of tube hydroforming process," *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2013.
- [10]. Rakesh A. Shinde, et al., "Optimization of Tube Hydroforming Process (without Axial feed) by using FEA Simulations," *Procedia Technology*, 23, 398 - 405, 2016. doi: 10.1016/j.protcy.2016.03.043

[11]. Vu Duc Quang, et al., "Effect of loading paths on hydroforming ability of stepped hollow shaft components from double layer pipes," *EUREKA: Physics and Engineering*, 4, 143-154, 2023. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.002797>.

[12]. Xiangwen Fan, et al., "Study on Forming Characteristics of Natural Bulging Area of Metal Thin-walled Tube Under Liquid Impact Forming," *Research Square*, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-821651/v1>

[13]. Nguyễn Đức Trung và cộng sự, *Mô phỏng số quá trình biến dạng*. NXB Bách khoa Hà Nội, 2011.

[14]. Simulia, *Abaqus 2016 Documentation*. [Online]. Available: <http://130.149.89.49:2080/v2016/index.html>.

AUTHORS INFORMATION

**Dinh Van Duy¹, Nguyen Duc Trung¹,
Trinh Kieu Tuan², Trinh Thi Mai^{1,2}**

¹School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

²Faculty of Mechanical Engineering, University of Economics - Technology for Industries, Vietnam