

# Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiệt độ nung phôi, bán kính chày và hành trình di chuyển chày đến lực tạo hình khi uốn thép tấm SS400

## A Study on the Effects of Temperature, Punch Radius and Punch Stroke on Forming Force When Bending SS400 Steel Plate

Vương Gia Hải<sup>1,2</sup>, Nguyễn Thị Hồng Minh<sup>1</sup>, Nguyễn Đức Toàn<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Hà Nội, Việt Nam

<sup>2</sup>Trường Đại học Hải Phòng, Hải Phòng, Việt Nam

\*Email: toan.nguyenduc@hust.edu.vn

### Tóm tắt

Biến dạng tạo hình kim loại tấm là một phương pháp gia công cơ bản trong lĩnh vực cơ khí. Trong đó, gia công biến dạng uốn là một phương pháp gia công phổ biến được ứng dụng rộng rãi để tạo hình các chi tiết làm từ tấm kim loại như: công nghiệp hàng không, đóng tàu, ô tô, v.v. Khi biến dạng tạo hình uốn tấm kim loại, lực tạo hình là thông số rất quan trọng cần được xác định để đảm bảo khả năng đủ tải của thiết bị gia công. Giá trị lực này sẽ thay đổi tùy theo điều kiện gia công khác nhau, dạng chi tiết khác nhau, vật liệu được sử dụng, v.v. Bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của các tham số công nghệ và hình học như: nhiệt độ nung phôi, hành trình chày uốn và bán kính chày đến lực uốn khi tạo hình chữ V cho vật liệu thép tấm SS400.

Từ khóa: Nhiệt độ nung phôi, thép tấm SS400, Taguchi, gia công biến dạng uốn.

### Abstract

Sheet metal forming process is a basic deformation method in the mechanical field. In particular, bending deformation processing is a universal processing method which is widely used to form sheet metal parts such as aviation industry, ship building, automotive and so on. During sheet metal bending process, the forming force is a very important output parameter that needs to be determined to ensure the load capacity of a machining equipment. This forming force magnitude will vary according to machining conditions, Geometric shapes of products, sheet materials, etc. This study examines the influence of technological and geometric parameters such as: workpiece temperature, punch stroke and punch radius to bending force when forming V-shape of SS400 sheet material.

Keywords: Workpiece temperature, SS400 steel sheet, Taguchi, bending process.

## 1. Giới thiệu

Hiện nay thép tấm đã và đang được sử dụng rất rộng rãi trong gia công kết cấu thép và tàu thuyền. Có rất nhiều công nghệ gia công khác nhau được ứng dụng trong gia công tấm như: cắt, hàn, lóc, uốn, sấn, v.v. [1]. Trong các dạng sản phẩm làm từ thép tấm thì các chi tiết có biên dạng cong được gia công bằng công nghệ uốn chiếm một tỷ trọng khá lớn. Lực tạo hình khi các chi tiết được gia công bằng phương pháp uốn thường chịu ảnh hưởng rất lớn từ các thông số công nghệ như: Chiều dày chi tiết, vận tốc chày uốn, nhiệt độ gia nhiệt khi uốn, v.v. Việc xác định được một bộ các thông số công nghệ phù hợp là hết sức cần thiết, nó có thể giúp cho nhà sản xuất tiết kiệm tối đa được chi phí sản xuất mà vẫn đem lại hiệu quả kinh tế cao. Để xác định được ảnh hưởng của các thông số công nghệ đó, hiện nay nhiều nghiên cứu đã áp dụng phương pháp thực nghiệm Taguchi [2-4] và đã đem lại hiệu quả rất tốt. Phương pháp thực nghiệm

Taguchi dựa trên phân tích thống kê thực nghiệm thông qua việc hạn chế tối đa chi phí hoặc quy trình thực nghiệm mà vẫn đảm bảo xác định được một bộ thông số thiết kế hợp lý. Ưu điểm của phương pháp này là nhiều yếu tố được xem xét cùng một lúc, bao gồm cả các yếu tố gây nhiễu. Phương pháp Taguchi khi kết hợp với các công cụ thống kê khác, như phân tích phương sai (ANOVA) trở thành một công cụ mạnh mẽ để lựa chọn các thông số gia công phù hợp.

Trong nghiên cứu này, phương pháp qui hoạch thực nghiệm Taguchi đã được sử dụng nhằm khảo sát ảnh hưởng của các thông số công nghệ như: Nhiệt độ nung phôi, bán kính chày và hành trình chày uốn đến lực tạo hình khi uốn chi tiết làm từ thép tấm SS400. Với mục đích chính là giảm lực tạo hình khi uốn, nghiên cứu này sử dụng ba cấp độ cho mỗi yếu tố thông qua mảng trực giao Taguchi L9 ( $3^3$ ) [5].

## 2. Vật liệu và mô hình vật liệu

### 2.1 Thiết lập thí nghiệm cơ bản

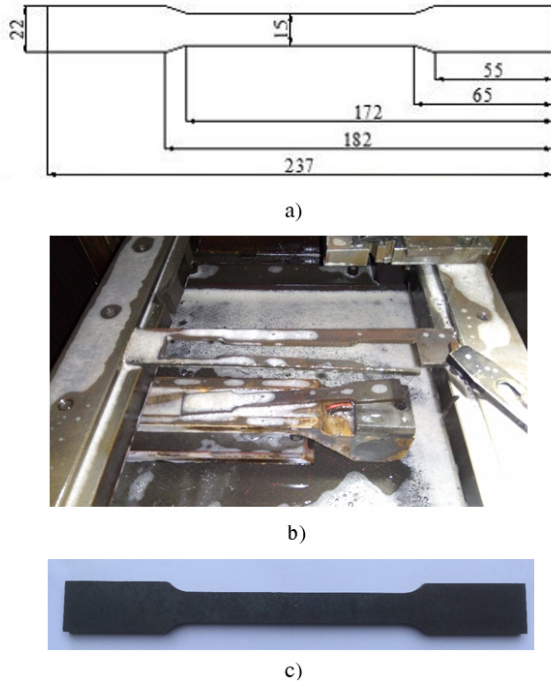
Vật liệu được sử dụng cho nghiên cứu này là thép tấm SS400 có thành phần hóa học như Bảng 1.

Bảng 1. Thành phần hóa học thép SS400

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,19 - 0,21	0,05 - 0,17	0,4 - 0,6	0,04	0,05	≤0,3

Trong cứu này ứng xử của vật liệu sẽ được xác định ở các điều kiện nhiệt độ khác nhau như. Các mẫu thử kéo được gia công bằng cắt dây theo hướng cán của tấm thép dày 6mm. Sau khi cắt dây mẫu thử kéo được xử lý qua bằng giấy giáp. Kích thước mẫu thử kéo theo tiêu chuẩn của nhà nước TCVN 197-85(197-2000), mẫu có kích thước và hình dạng như Hình 1(a). Hình 1(b) và(c) tương ứng là vật mẫu sau khi gia công và xử lý bề mặt.

Thử nghiệm kéo cho các tấm vật mẫu được thực hiện tại các điều kiện nhiệt độ khác nhau trên máy kéo nén Hung Ta H-200kN như trong Hình 2.



Hình 1. Mẫu thử kéo được thiết kế (a) gia công trên máy cắt dây CNC (b) và sau khi xử lý bề mặt (c)



Hình 2. Máy kéo nén Hung Ta H-200kN

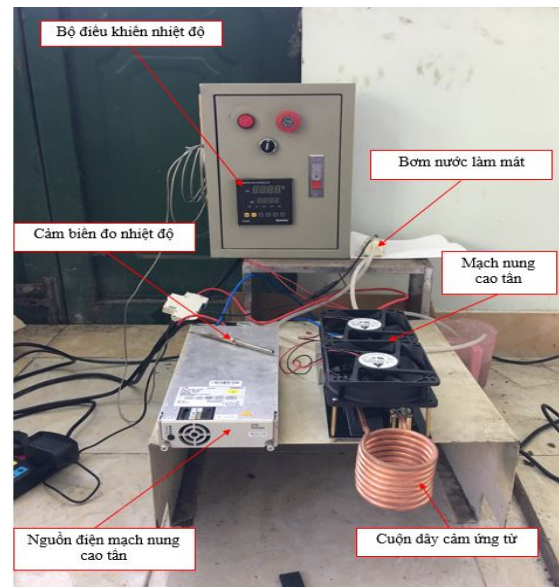
Để có thể gia nhiệt cho mẫu trong quá trình thử kéo, nghiên cứu đã sử dụng hệ thống gia nhiệt cảm ứng điện từ có công suất 2,5 kW như trong Hình 3. Hệ thống gia nhiệt tự động này sẽ giúp duy trì nhiệt độ đẳng hướng ở mức mà nghiên cứu tiến hành thực nghiệm.

Quá trình thử kéo có gia nhiệt và gá đặt bộ gia nhiệt trên thiết bị kéo/nén được thể hiện trong Hình 4.

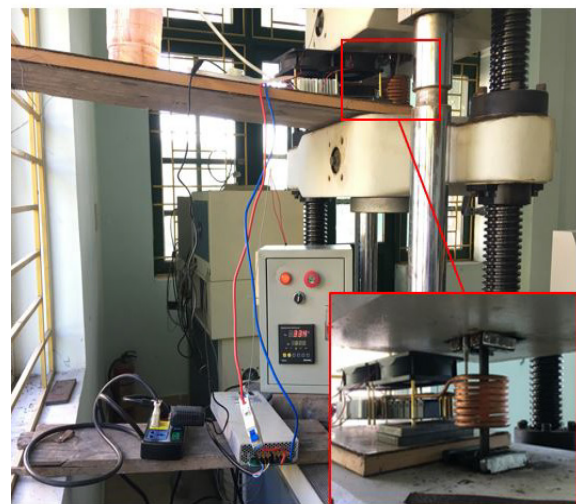
## 2.2 Nhận dạng các thông số của mô hình vật liệu

Bảng 2. Các tham số hóa bền vật liệu ở các mức nhiệt độ khác nhau theo qui luật Voce's.

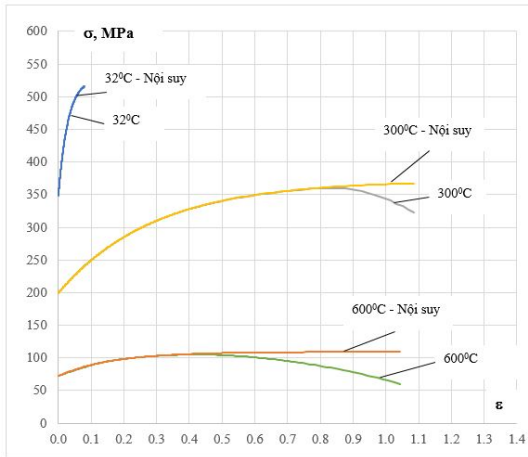
Nhiệt độ (°C)	$\sigma_y$	A	B
32	348,7	188,86	28,3293
300	199,3	171,56	3,452
600	72,43	36,89	6,0145



Hình 3. Hệ thống gia nhiệt cảm ứng điện từ



Hình 4. Hệ thống thử kéo có gia nhiệt



Hình 5. Biểu đồ ứng suất - biến dạng tại các nhiệt độ khác nhau cho các tấm vật mẫu

Kết quả thực nghiệm thử kéo ở các điều kiện nhiệt độ khác nhau được thể hiện trong Hình 6. Để nhận dạng các thông số của mô hình vật liệu tương thích phù hợp với các dữ liệu sau khi thử kéo theo qui luật hóa bền của Voce's [6], các đường cong ứng suất - biến dạng công thức (1) được sử dụng. Phần mềm Excel 2013 với công cụ SOLVER dựa trên phương pháp tổng bình phương sai lệch nhỏ nhất để dàng tìm ra các hệ số của phương trình như trong Bảng 2. Các hệ số thu được sẽ được khai báo trong mô hình vật liệu đầu vào khi thực hiện các mô phỏng số bằng phần mềm Abaqus.

$$\bar{\sigma} = \sigma_y + A(1 - \exp(-B\varepsilon_{eq}^n)) \quad (1)$$

trong đó:  $\sigma_y$  là giới hạn chảy,  $A$  và  $B$  là các tham số,  $\bar{\sigma}$  là ứng suất tương đương,  $\varepsilon_{eq}^n$  là biến dạng tương đương. Các tham số thuộc tính vật liệu khác sử dụng cho mô phỏng dự đoán lực tạo hình uốn ở các điều kiện khác nhau được thể hiện trong Bảng 3.

### 3. Thủ tục mô phỏng và thực nghiệm.

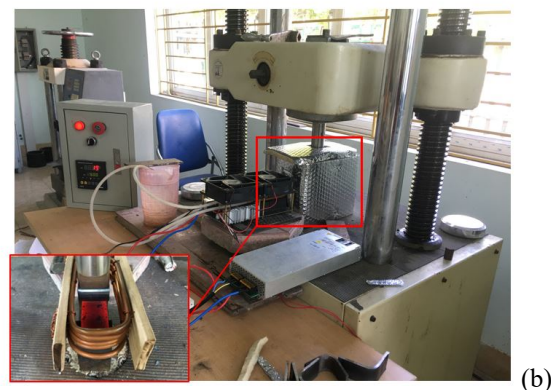
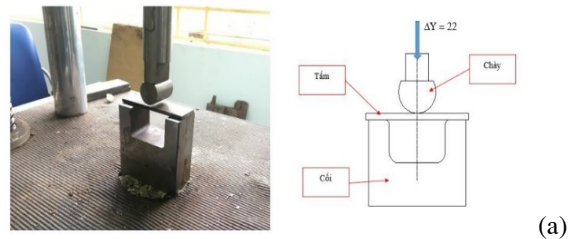
#### 3.1 Mô phỏng số dự báo ảnh hưởng của nhiệt độ đối với lực uốn

Để dự đoán ảnh hưởng của nhiệt độ đến lực tạo hình khi uốn tấm SS400, các dữ liệu từ kết quả thí nghiệm và tính toán được sử dụng làm dữ liệu đầu vào cho quá trình mô phỏng số bằng phương pháp phần tử hữu hạn qua phần mềm (ABAQUS/Explicit). Mô hình biến dạng tạo hình uốn được thể hiện như trong Hình 7. Trong đó, khuôn trên, khuôn dưới được mô hình hóa bằng thuộc tính phần tử vỏ (S4R) và tấm vật mẫu được mô hình bằng phần tử khối (R3D4). Các kích thước phần tử trung bình cho tấm vật mẫu kính thước dài-rộng-cao (110 mm x 35 mm x 5 mm) tương ứng là (8 x 9 x 2 mm<sup>3</sup>). Khi mô phỏng, khuôn dưới được cố định và khuôn trên chỉ có thể di chuyển theo phương thẳng đứng. Hệ số ma sát được mô hình hóa bằng cách sử dụng luật ma sát Coulomb. Hệ số ma sát  $\mu$  giữa tấm vật mẫu với khuôn trên và khuôn dưới được giả định là 0,1. Để xác định lực tạo hình

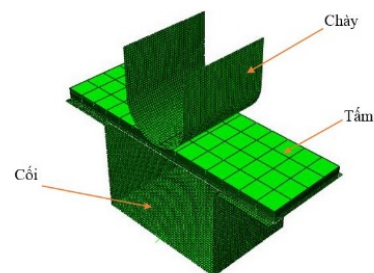
uốn qua mô phỏng và thực nghiệm, quá trình biến dạng uốn chi tiết chữ V được thực hiện bằng cách cho chày dịch chuyển xuống theo phương thẳng đứng  $\Delta Y = 22$  mm, tốc độ dịch chuyển của chày là 1 mm/s. Thiết lập thực nghiệm tương ứng cho quá trình tạo hình uốn tấm thép SS400 được thể hiện trong Hình 6.

Bảng 3. Các tham số thuộc tính vật liệu dùng cho mô phỏng số

Thông số	Các mức
Nhiệt độ (°C)	32; 300; 600
Tốc độ uốn (mm/s)	1
Độ dày phôi (mm)	6
Hệ số Poisson's	0.3
Khối lượng riêng, kg/m <sup>3</sup>	7850
Hệ số modul đàn hồi, E (MPa)	213000 (32 °C); 184410 (300 °C); 107640 (600 °C)



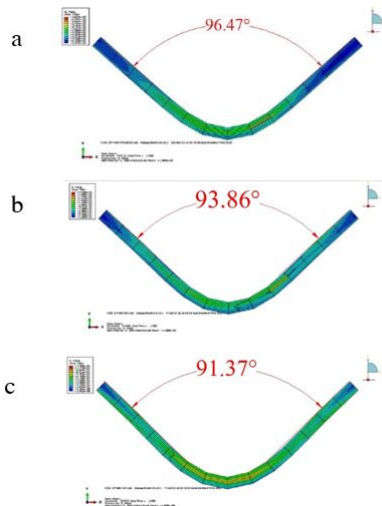
Hình 6. Lắp đặt hệ thống uốn chi tiết hình chữ V (a) nhiệt độ phòng, (b) nhiệt độ cao



Hình 7. Mô hình phần tử hữu hạn trong mô phỏng uốn chi tiết chữ V

Bảng 4. Bảng so sánh kết quả mô phỏng và thực nghiệm

T (°C)	$\alpha_{TN}$ (°)	$\alpha_{MP}$ (°)	$\Delta\alpha$ (°)	$P_{MP}$ (N)	$P_{TN}$ (N)	$\Delta P$ (%)
32	95,95	96,47	0,52	8122	8024	1,22
300	93,5	93,86	0,36	5472	5546	1,33
600	90,5	91,37	0,87	2212	2189	1,05



Hình 8. Kết quả mô phỏng uốn chi tiết hình chữ V, (a) ở nhiệt độ phòng, (b) ở 300 °C và (c) ở 600 °C.

Hình 8 thể hiện hình dạng chi tiết hình chữ V sau khi mô phỏng bằng phần mềm ABAQUS, Hình 9 (a, b và c) tương ứng là các chi tiết thực nghiệm sau khi tạo hình uốn ở các điều kiện nhiệt độ phòng (32 °C), 300 °C và 600 °C. Kết quả đo lực tạo hình uốn được trình bày trong Bảng 4. Giá trị lực sai khác  $\Delta P\%$  giữa thực nghiệm và mô phỏng được tính toán theo công thức (2) và sai lệch góc uốn  $\Delta\alpha$  được tính theo công thức (3):

$$\Delta P\% = \left| \frac{P_{MP} - P_{TN}}{P_{TN}} \right| \cdot 100\% \quad (2)$$

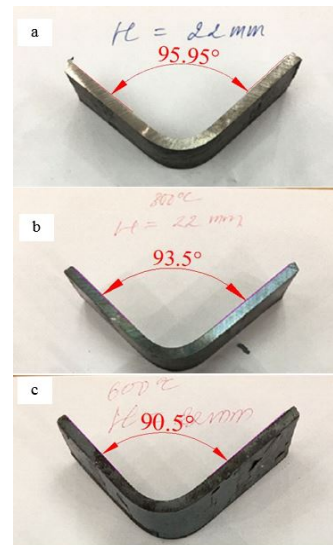
$$\Delta\alpha = \alpha_{MP} - \alpha_{TN} \quad (3)$$

Từ Bảng 4 cho thấy giá trị sai lệch lực tạo hình khi uốn  $\Delta P$  (%) giữa thực nghiệm và mô phỏng có giá trị lớn nhất là 1,33%. Góc uốn của chi tiết thực nghiệm và mô phỏng chỉ sai lệch lớn nhất là 0,87°. Do đó hoàn toàn có thể khẳng định việc sử dụng phương pháp mô phỏng số để dự đoán lực tạo hình khi uốn cho các mẫu thử tương tự là chấp nhận được.

### 3.2 Quy hoạch theo mảng trực giao Taguchi.

Mục đích của nghiên cứu này là điều chỉnh các thông số đầu vào để kiểm soát thông số đầu ra theo mong muốn. Do đó, phương pháp Taguchi đã được lựa chọn sử dụng nhằm tối thiểu các thí nghiệm cần thiết để nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số lựa chọn tác động đến đặc tính đầu ra và nhanh chóng

điều chỉnh các thông số đầu vào tiến tới việc tối ưu nhanh nhất giá trị đầu ra.



Hình 9. Chi tiết sau khi tạo hình uốn ở các điều kiện nhiệt độ khác nhau: a) nhiệt độ phòng, b) 300 °C và c) 600 °C.

Nghiên cứu này khảo sát ảnh hưởng của các tham số: nhiệt độ nung phôi (A), bán kính chày (B) và hành trình chày (C) đến lực tạo hình khi uốn có gia nhiệt. Bộ ba thông số được lựa chọn với ba mức giá trị khác nhau được cho trong Bảng 5. Tỷ lệ nhiễu S/N được lựa chọn theo điều kiện nhỏ hơn thì tốt hơn theo phương trình (4).

$$S / N = -10 \log_{10}(MSD)^2 \quad (4)$$

$$MSD = \frac{(y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2)}{n} \quad (5)$$

trong đó MSD (phương trình (5)) là độ lệch bình phương so với giá trị đích của đặc tính đầu ra đo được;  $y_1, y_2, \dots, y_n$  và  $n$  là kết quả đo và số thí nghiệm tương ứng.



Hình 10. Vật mẫu sau khi thực nghiệm theo phương pháp mảng trực giao Taguchi

Sau khi thiết lập các điều kiện cũng như chuẩn bị các mẫu thực nghiệm và thiết bị tương ứng, nghiên cứu đã tiến hành thực nghiệm cho 9 mẫu thử (Hình 10). Kết quả đo đạc cho 9 mẫu thí nghiệm theo Taguchi (L9) được cho trong Bảng 6. Tiến triển gia lực phụ thuộc vào hành trình chày tại nhiệt độ cao cho một mẫu thí nghiệm cụ thể được minh họa trên Hình 11. Ảnh hưởng của các tham số: nhiệt độ (A),

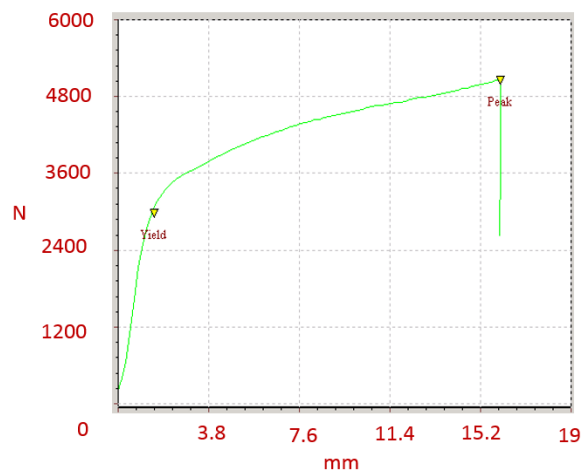
bán kính chày ( $B$ ) và hành trình chày ( $C$ ) đến lực uốn được tính toán và phân tích phương sai (ANOVA) như trong Bảng 7.

Bảng 5. Các thông số công nghệ dùng cho thực nghiệm

Thông số	Các mức		
	1	2	3
Nhiệt độ (°C) (A)	Nhiệt độ phòng	300	600
Bán kính chày (mm) (B)	10	15	20
Hành trình chày (mm) (C)	10	16	22

Bảng 6. Kết quả đo và tỷ số S/N theo L9

STT	A	B	C	$P_{TN}$ (N)	$S/N_{TN}$
1	32	10	10	6592	-76,38
2	32	15	16	7140	-77,074
3	32	20	22	8440	-78,527
4	300	10	16	5004	-73,986
5	300	15	22	5740	-75,178
6	300	20	10	5894	-75,408
7	600	10	22	1804	-65,125
8	600	15	10	1890	-65,529
9	600	20	16	2424	-67,691



Hình 11. Kết quả lực uốn tạo hình chi tiết hình chữ V thực nghiệm với nhiệt độ ( $A$ ) = 300 °C, bán kính chày ( $B$ ) = 10 mm và hành trình chày ( $C$ ) = 16 mm.

Nghiên cứu này tiến hành xử lý số liệu thực nghiệm bằng phần mềm MINITAB17. Với 3 thông số

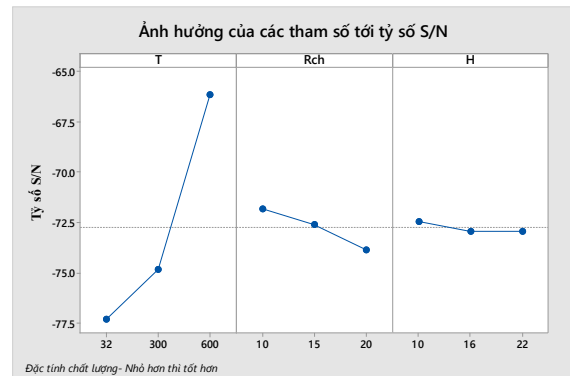
và 3 mức, phần mềm này cho phép lựa chọn quy hoạch Taguchi L9 với 9 thí nghiệm (Bảng 6) như là một quy hoạch chuẩn.

Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) được tính toán (Bảng 7 và Hình 12) đã phản ánh rõ nhiệt độ nung phôi ( $A$ ) ảnh hưởng nhiều nhất đến kết quả lực uốn  $P$  với 94,703% sau đó đến bán kính chày ( $B$ ) với 4,06% ảnh hưởng; thông số hành trình dịch chuyển của chày ( $B$ ) ảnh hưởng không đáng kể đến kết quả lực tạo hình uốn chỉ với 1,098%.

Bảng 7. Phân tích ANOVA cho ảnh hưởng của các tham số (Thực nghiệm)

Tham số	Giá trị S/N trung bình ở các mức			Tổng bình phương	phân bố
	1	2	3		
A	-77,33	-74,86	-66,11*	44336275	94,703
B	-71,83*	-72,59	-73,88	1900579	4,06
C	-72,44*	-72,92	-72,94	514176	1,098
Err				65203	0,139
Tổng				46816232	100

Dựa vào kết quả phân tích trên có thể lựa chọn bộ thông số hợp lý ứng với cấp độ của các thông số có tỉ số nhiều S/N là lớn nhất tương ứng với nhiệt độ 600 °C, bán kính chày  $R = 10$  mm và hành trình chày  $H = 10$  mm.



Hình 12. Ảnh hưởng của các thông số đến tỷ số nhiều S/N

### 3.3 Xây dựng mô hình lực tạo hình khi uốn thép tấm SS400 trong môi trường gia nhiệt bằng cảm ứng điện từ

Phân tích hồi qui được sử dụng để mô hình hóa và phân tích của một hoặc một số biến có mối qua hệ phụ thuộc với các biến độc lập. Trong nghiên cứu này, biến phụ thuộc là lực uốn tạo hình ( $P_{TC}$ ) và các biến độc lập sử dụng là: Nhiệt độ nung phôi ( $T$ ), bán kính chày uốn ( $R_{ch}$ ) và lượng dịch chuyển của chày uốn theo phương thẳng đứng ( $H$ ) như phương trình (6).

$$P_{TC} = f_{(T, R_{ch}, H)} \quad (6)$$

Phương trình (6) dùng cho dự đoán mối quan hệ phụ thuộc giữa lực uốn  $P_{TC}$  và các tham số đầu vào. Phương trình dự đoán được sử dụng trong nghiên cứu này là một hàm đa thức bậc 2. Phương trình dự đoán cho hàm đa thức bậc hai của lực tạo hình  $P_{TC}$  công thức (7) được xây dựng nhờ công cụ *Fitting Regression* của phần mềm Minitab 17 thu được như phương trình (7).

$$P_{TC} = 7616 - 2,192.T - 124,1.R_{ch} - 94,12.H - 0,02314.T.R - 0,09595.T.H - 0,008461.T^2 + 7,574.R^2 + 5,185.H^2 \quad (7)$$

Độ chính xác của mô hình tính toán lực uốn tạo hình khi uốn chi tiết hình chữ V có gia nhiệt được đánh giá bằng sai số khi so sánh với dữ liệu thí nghiệm như Bảng 8. Trong đó sai số lực tạo hình  $\Delta P$  được xác định từ phương trình (8) so với dữ liệu thực nghiệm thu được từ 9 thí nghiệm theo phương pháp mảng trực giao Taguchi.

$$\Delta P = \left( \frac{P_{TC} - P_T}{P_T} \right) \times 100\% \quad (8)$$

Bảng 8. Sai lệch giữa mô hình lực uốn tạo hình và thực nghiệm khi uốn có gia nhiệt

TN số	T (°C)	R <sub>ch</sub> (mm)	H (mm)	P <sub>T</sub> (N)	P <sub>TC</sub> (N)	ΔP (%)
1	32	10	10	6592	6592,783	0,012
2	32	15	16	7140	7141,048	0,015
3	32	20	22	8440	8441,334	0,016
4	300	10	16	5004	5004,77	0,015
5	300	15	22	5740	5741,06	0,018
6	300	20	10	5894	5895,12	0,019
7	600	10	22	1804	1804,76	0,042
8	600	15	10	1890	1890,83	0,043
9	600	20	16	2424	2425,08	0,044

Kết quả từ Bảng cho thấy sai lệch giữa mô hình toán xác định lực uốn tạo hình và lực uốn thực nghiệm cho 9 thí nghiệm là khá nhỏ và gần như không đáng kể. Giá trị sai số lớn nhất chỉ là 0,044% tại thí nghiệm số 9. Điều này cho thấy mô hình xây dựng xác định lực uốn tạo hình khi uốn chi tiết hình chữ V gia nhiệt có độ tin cậy cao.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu đã tiến hành xây dựng một hệ thống thử kéo có gia nhiệt và thực nghiệm kéo mẫu thép tấm SS400 tại các điều kiện nhiệt độ khác nhau. Đã đưa ra được biểu đồ so sánh ứng suất-biến dạng tại điều kiện nhiệt độ khác nhau cho thấy khi nhiệt độ ở 600 °C thì giới hạn chảy dẻo của mẫu thử kéo giảm khoảng 4 lần so với nhiệt độ phòng. Phương pháp mảng trực giao Taguchi với các thông số công nghệ:

hiệu độ, bán kính chày, hành trình dịch chuyển của chày thay đổi đã được tiến hành để đánh giá ảnh hưởng của các tham số đầu vào đến lực tạo hình khi uốn chữ V. Kết quả thực nghiệm và phân tích số liệu (ANOVA) đã chỉ ra rằng điều kiện gia công: nhiệt độ 600 °C, bán kính chày là 10 mm và hành trình chày là 10 mm sẽ cho giá trị lực tạo hình uốn là nhỏ nhất.

Mô hình toán mô tả quan hệ giữa thông số đầu ra là lực uốn tạo hình với các thông số đầu vào gồm: nhiệt độ nung phôi, bán kính chày, hành trình chày đã được xây dựng theo phương pháp hồi qui dựa trên các kết quả thực nghiệm theo phương pháp mảng trực giao Taguchi. So sánh kết quả tính theo mô hình toán và các thực nghiệm cho thấy sự sai lệch về lực uốn không tới 0,1%, điều này khẳng định mô hình toán đã xây dựng là đảm bảo độ tin cậy. Từ kết quả của nghiên cứu, phương pháp này có thể dự đoán chính xác lực tạo hình của một chi tiết bất kỳ trong giới hạn các thông số công nghệ đầu vào.

#### Lời cảm ơn

Nhóm tác giả cảm ơn sự hỗ trợ của Xưởng cơ khí Trường Đại học Hải Phòng và Công Ty TNHH Kỹ thuật Phúc Nghi.

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 107.02-2019.300

#### Tài liệu tham khảo

- [1] Z. Marciniak and J. Duncan, *Mechanics of Sheet Metal Forming*, Edward Arnold, London, 1992, pp. 32–133.
- [2] D.T. Nguyen, D.K. Dinh, H.M.T. Nguyen, T.L. Banh and Y.S.Kim, Formability improvement and blank shape definition for deep drawing of cylindrical cup with complex curve profile from SPCC sheets using FEM, *Journal of Central South University*, vol. 21, No. 1, pp. 27–34, 2014
- [3] N. Duc-Toan, K. Young-Suk, J. Dong-Won, Coupled thermomechanical finite element analysis to improve press formability for camera shape using AZ31B magnesium alloy sheet. *Metals and Materials International*, vol. 18, No. 4, pp. 583–595, 2012
- [4] N. Duc-Toan, Y. Seung-Han, J. Dong-Won, B. Tien-Long, and K. Young-Suk, 'A study on material modeling to predict spring-back in V-bending of AZ31 magnesium alloy sheet at various temperatures', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 62, no. 5–8, pp. 551–562, 2012.
- [5] G. Taguchi, *On-line quality control during production*, Japan Standard Association, Tokyo, 1981.
- [6] E. Voce, The relationship between stress and strain for homogeneous deformation, *J. Inst. Met.* Vol. 74 pp. 537-562, 1948.