

NGHIÊN CỨU SỰ BIẾN ĐỔI CỦA ĐƯỜNG TRUNG HÒA KHI CHẤN VẬT LIỆU TẤM CÓ BÀO RÃNH V

EXPERIMENT ON THE TRANSFORMATION OF NEUTRAL AXIS IN BENDING OF SHEET METAL USING V-GROOVING

Nguyễn Văn Thái Hà, Trần Anh Sơn*

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh

Email: nvtha.sdh231@hcmut.edu.vn;

(*)tason@hcmut.edu.vn

TÓM TẮT

Đàn hồi ngược trong kim loại tấm là hiện tượng biến dạng đàn hồi phổ biến trong ngành cơ khí chế tạo. Trong sản xuất, các thông số về bán kính chày, bề dày sản phẩm và thời gian giữ chày của thiết bị gia công gây tác động lớn tới góc đàn hồi ngược. Mục tiêu của bài báo là phân tích sự biến đổi của đường trung hòa khi chấn vật liệu tấm, có bào rãnh V trên vật liệu là thép không gỉ SUS304. Thí nghiệm được thực hiện theo thiết kế Taguchi L9 với các tham số khác nhau về bề dày, thời gian giữ chày và chiều sâu rãnh bào để đánh giá các thông số ảnh hưởng tới đàn hồi ngược ở góc uốn của chi tiết tấm. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy ảnh hưởng chiều sâu rãnh bào của vật liệu ảnh hưởng tới các thông số quá trình gia công uốn kim loại tấm.

Từ khóa: Đàn hồi ngược; Kim loại tấm; Nguyên công dập uốn; Taguchi.

ABSTRACT

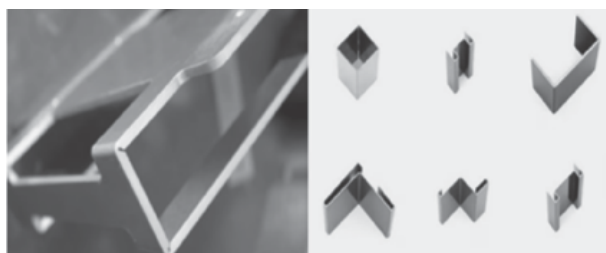
Springback in sheet metal is a common plastic deformation phenomenon in the mechanical engineering industry. In manufacturing, the radius of the punch tool, time of holding punch and thickness have a great impact on the springback angle. The objective of the research is to analyze the variation of the neutral line when bending sheet material, with V-groove on SUS304 stainless steel material. The experiment was carried out according to the Taguchi L9 design with different parameters of thickness, punch holding time, grooving depth will evaluate the impact to the parameters of bending angle. The research results also show that the effect of grooving depth of the material affects the parameters of the sheet metal bending process.

Keywords: Springback; Sheet metal; Bending; Taguchi.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công nghệ gia công áp lực là được phát hiện từ thời Hy Lạp và phổ biến trong sản xuất hiện nay [1]. Nhờ nhiều ưu điểm nổi bật về trọng lượng nhẹ, độ bền do cơ tính vật liệu, tiết kiệm vật liệu khi gia công [2]. Trong cách mạng 4.0, công nghệ phát triển rộng rãi ở nhiều loại sản phẩm như ô tô, máy bay và đặc biệt là nội thất với sự phát triển hạ tầng đô thị mới, việc tạo ra nhiều kết cấu mới đẹp đẽ là nhu cầu rất lớn [3].



Hình 1. Sản phẩm kim loại tấm phổ biến

Đàn hồi ngược là sai số phổ biến trong gia công uốn kim loại tấm. Khi vật liệu bị uốn, bề mặt ngoài tiếp xúc với cối bị kéo giãn do ứng suất kéo, bề mặt trong chịu tác dụng của chày bị nén do ứng suất nén. Khi chày ngưng tác dụng, vùng đàn hồi tại vị trí uốn sẽ đưa vật liệu trở lại trạng thái ban đầu với độ đàn hồi phụ thuộc vào sự cân bằng giữa biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo của vật liệu [4]. Để đảm bảo sự chính xác sản phẩm, giảm sai số khi chày, chất lượng sản phẩm sau khi chày đạt độ thẩm mỹ cao, đã có một số các nghiên cứu về cách khắc phục đàn hồi ngược, trình bày từ việc kiểm soát thông qua bề dày tấm [5], thời gian giữ chày [6], bào rãnh [7], rung động [8], bán kính uốn nhỏ nhất [9] và mô phỏng phần tử hữu hạn [10].

Taguchi là phương pháp thực nghiệm thống kê phổ biến trong quy trình sản xuất hàng loạt [11]. Phương pháp đã cải thiện được hiệu

suất làm việc, năng suất [12] và giảm thiểu chi phí [13], thông qua sử dụng ít thí nghiệm nhưng ra kết quả tốt dựa trên kết quả thông số nhiễu (S/N), nếu giá trị đáp ứng yi cần đạt “Đánh giá ảnh hưởng của các nhân tố - Nominal is best” giảm thiểu đi sai số không mong muốn tới sản phẩm [14, 15]:

$$\eta = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right)$$

Trong thiết kế sản phẩm kim loại tấm, Taguchi tối ưu thông số về đàn hồi ngược hướng âm và dương thông qua thực nghiệm thực tế và mô phỏng trên các nền vật liệu cán và uốn [16-20]. Bài báo sẽ khái quát đặc điểm của độ đàn hồi ngược thông qua đánh giá ảnh hưởng thay đổi của đường trung hòa khi bào lớp rãnh V theo bề dày vật liệu. Tiến hành mô phỏng và thực nghiệm các loại bề dày, thời gian giữ chày và chiều sâu rãnh bào khác nhau ngay đường trung hòa với góc uốn và bán kính chày cố định.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

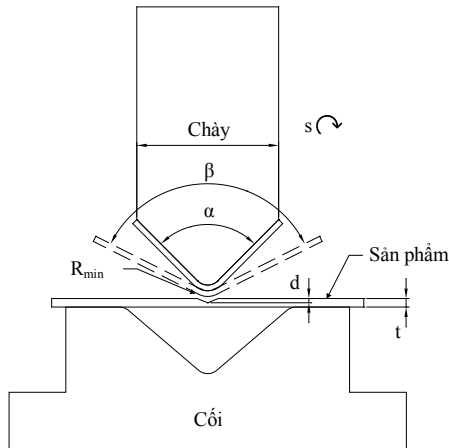
2.1. Đối tượng thực nghiệm

Trong bài báo, tác giả thực nghiệm mẫu thử kim loại tấm diện tích 100×100 mm có tham số điều khiển là bề dày trong thiết kế nội thất [3], lớp bào rãnh vật liệu theo tỉ lệ giới hạn uốn cong 50% bề dày [3], thời gian giữ chày [6] theo bảng 1. Nghiên cứu thực hiện với thông số công nghệ cố định là góc uốn 90° thường thấy ở sản phẩm nội thất ở hình 1, đo kết quả là góc uốn đàn hồi và bán kính uốn sau khi chày. Trong đó:

- $t(x_1)$: Bề dày kim loại tấm (mm);
- $s(x_2)$: Thời gian giữ (s);
- $d(x_3)$: Chiều sâu bị bào (mm);
- $\beta(y_1)$: Góc uốn đàn hồi (°).

Bảng 1. Thông số điều khiển

Tự nhiên	Mã hóa	Level 1	Level 2	Level 3
s	x_1	2	4	6
t	x_2	1	1.5	2
d	x_3	0.3	0.5	0.75



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý

2.2. Vật liệu thực nghiệm

Tính chất vật liệu thép tấm SUS304 thể hiện ở bảng 2 và bảng 3.

Bảng 2. Bảng thành phần SUS304

C %	Si %	Mn %	P %
0.08 max	1 max.	2 max.	0.045 max.
S %	Cr %	Ni %	Fe %
0.03 max.	18 – 20	8 – 10.5	66.345 – 74

Bảng 3. Tính chất cơ học vật liệu

Giới hạn dẻo (Mpa)	440 – 1527.2
Giới hạn đàn hồi (Mpa)	205 – 1229.2
Độ giãn dài (%)	5 min.
Độ cứng (HB)	187 max.
Năng lượng tác động (Joule)	34.3 – 215.6

2.3. Thiết bị thực nghiệm

Thí nghiệm được thực hiện tại Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh theo hình 4.



Hình 3. Máy chấn

2.4. Phương pháp thực nghiệm

Sử dụng phương pháp Taguchi nghiên cứu ảnh hưởng của 3 thông số (x_1 , x_2 , x_3) với 3 mức biến đổi. Ở mỗi thí nghiệm, đo lường thông số đầu ra (y_1) và tính tỷ số tín hiệu trên nhiễu (S/N) ở bảng 5. Tổng bậc tự do (DoF) cần thiết là 7 DoF và để hiểu rõ mối quan hệ giữa t , s , và d , ma trận trực giao $L_9 (3^4)$ được chọn. Ma trận trực giao có dư 2 DoF để ước tính sai số ngẫu nhiên, làm cho kết quả kiểm định thống kê phương sai (ANOVA) trở nên tin cậy đầy ý nghĩa. Do thí nghiệm được thực hiện với thông số cố định là góc uốn 90° nên sử dụng tỷ lệ S/N “Nominal is best” (Càng gần giá trị danh định càng tốt), tức giá trị đích mong muốn cụ thể là góc uốn cố định 90° để đánh giá các đặc tính ảnh hưởng trong các vấn đề gia công kỹ thuật và giảm độ lệch chuẩn. Phương trình được mô tả dưới đây:

$$\eta = 10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right)$$



3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Kết quả thực nghiệm

Bảng 4. Ma trận trực giao L9

N	s	t	d	β_1	β_2	β_3	β_{th}	S/N
1	2	1.0	0.30	90.4	90.9	89.9	90.0	36.31
2	2	1.5	0.50	89.3	90.5	90.8	89.6	33.35
3	2	2.0	0.75	90.7	91.7	91.9	90.8	44.90
4	4	1.0	0.50	91.0	90.6	90.5	90.4	34.70
5	4	1.5	0.75	90.0	90.3	89.6	90.3	37.94
6	4	2.0	0.30	91.3	90.8	91.3	90.4	40.45
7	6	1.0	0.75	91.2	90.4	90.9	90.4	38.16
8	6	1.5	0.30	91.0	91.2	91.5	90.6	34.86
9	6	2.0	0.50	91.5	91.6	91.3	90.4	34.78

Bảng 5. Bảng kết quả tỉ lệ S/N

Level	s	t	d
1	38.19	36.39	37.21
2	37.7	35.38	34.28
3	35.93	40.04	40.33
Delta	2.25	4.66	6.05
Rank	3	2	1

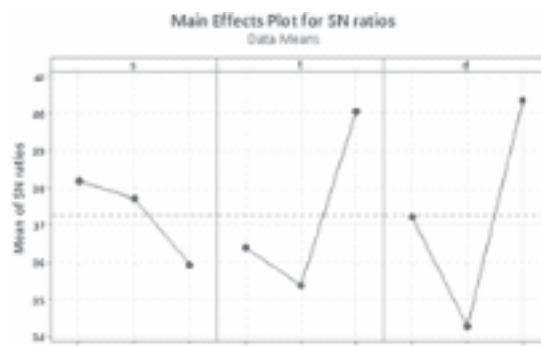
Bảng 6. Bảng kết quả giá trị trung bình

Level	s	t	d
1	90.11	90.24	90.31
2	90.36	90.16	90.13
3	90.44	90.51	90.47
Delta	0.33	0.35	0.34
Rank	3	1	2

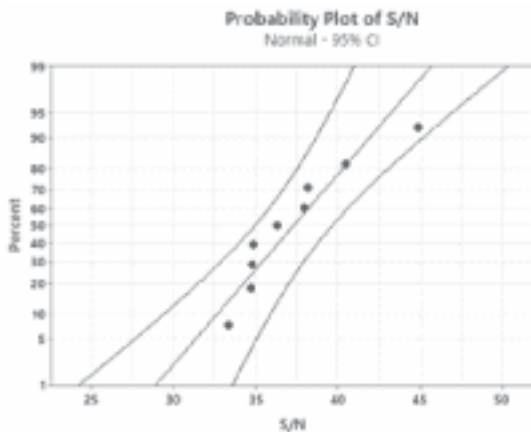
3.2 Phân tích sự tương quan

Kết quả phân tích bảng 4 cho thấy dữ liệu thực nghiệm có độ tin cậy cao, cho thấy sự ảnh hưởng rõ rệt của các thông số đầu vào

(s, t, d). Theo biểu đồ đánh giá các nhân tố đáp ứng theo tỉ số tín hiệu/nhiều ở bảng 5, bảng 6 và hình 5, chiều sâu rãnh bào d thể hiện mức độ tác động mạnh nhất với $\Delta d = 6.05$, tiếp theo là bề dày chi tiết t có độ lệch $\Delta t = 4.66$ và thời gian giữ chày s có độ lệch ít nhất $\Delta s = 2.25$. Biểu đồ giá trị tương quan hình 6 cho thấy các điểm dư thừa phân bố bám sát đường chuẩn tuyến tính, xác nhận mô hình thực nghiệm có độ tin cậy cao, tuân thủ phân phối chuẩn. Điều đó cho thấy, chiều sâu rãnh bào d có ảnh hưởng tới độ đàn hồi ngược của sản phẩm, khi chiều dày kim loại tẩm thay đổi.



Hình 4. Biểu đồ giá trị tỉ số S/N



Hình 5. Biểu đồ giá trị tương quan

3.3. Phân tích phương sai (ANOVA)

Kết quả phân tích phương sai (ANOVA)

Bảng 7. Bảng kết quả ANOVA

Thông số	DoF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	ρ %
s	2	8.42	8.42	4.21	1.71	0.32	8.1%
t	2	36.11	36.11	18.05	7.35	0.07	34.6%
d	2	54.99	54.99	27.50	11.19	0.03	52.7%
Sai số ngẫu nhiên	2	4.91	4.91	2.46			4.7%
Tổng	8	104.43					100%

4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, quy hoạch thực nghiệm được tiến hành theo Taguchi L9. Ba tham số điều khiển với ba chế độ công nghệ được thực hiện để nghiên cứu về độ đàn hồi ngược trong quá trình chấn V có rãnh bào ở vật liệu SUS304. Dựa trên kết quả thực nghiệm và phân tích thống kê theo phương pháp Taguchi cho đặc tính chất lượng “Nominal is best” (Càng gần giá trị danh định càng tốt), dữ liệu có độ tin cậy cao với hệ số xác định $R^2 = 95.29\%$ và $R^2(\text{adj}) = 81.18\%$, được kiểm chứng qua biểu đồ xác suất chuẩn với các điểm phân dư phân bố tuyến tính và không có ngoại lai. Tỷ lệ

bảng 7 khẳng định rằng chiều sâu rãnh bào d là thông số có ảnh hưởng lớn nhất và đạt ý nghĩa thống kê với $P = 0.03$ ($P < 0.05$) với sự đóng góp là 52.7%. Trong khi đó, bề dày kim loại tấm t thể hiện một mức độ ảnh hưởng cận biên với $P = 0.07$ và đóng góp 34.6%, còn thời gian giữ chày s có $P = 0.32$ đóng góp 8.06% không có ý nghĩa thống kê trong khảo sát. Sai số ngẫu nhiên chỉ chiếm 4.7%, cho thấy mô hình cực kỳ chính xác và hầu như không bỏ sót yếu tố gây nhiễu quan trọng nào, và giải thích được khoảng 95.3% các biến động quan sát được. Do đó, việc tối ưu hóa chiều sâu rãnh bào d là điều hoàn toàn khả thi để kiểm soát chất lượng đầu ra.

sai số dư chỉ chiếm 4.7%, khẳng định các yếu tố đầu vào được lựa chọn đã giải thích được phần lớn sự biến thiên của tỉ số tín hiệu trên nhiễu (S/N) trong mô hình. Kết quả phân tích phương sai (ANOVA) chỉ ra rằng yếu tố chiều sâu rãnh bào d đóng vai trò quyết định đến độ ổn định của góc đàn hồi ngược. Để tối ưu hóa đặc tính chất lượng mục tiêu và giảm thiểu sự biến thiên quanh giá trị định danh, đề xuất bộ thông số tối ưu là chiều sâu rãnh bào là 0.3 mm tức là vị trí đường trung hòa sẽ dịch chuyển 0.3 mm so với vị trí chiều dày ban đầu đối với bề dày kim loại tấm là 1 mm. Việc tập trung kiểm soát chặt chẽ các thông số có mức độ đóng góp lớn chiều sâu rãnh bào và bề dày chi tiết kim

loại tấm sẽ đánh giá được tính ổn định trong sản xuất và giảm thiểu tỷ lệ phế phẩm một cách hiệu quả.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Bách Khoa Thành phố Hồ Chí Minh. ❖

Ngày nhận bài: 12/3/2026

Ngày phản biện: 27/3/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Như Huynh, Nguyễn Mậu Đăng, Phạm Hà Dương, “*Công nghệ tạo hình kim loại tấm*”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, 2006.
- [2]. T. A. A. E. Tekkaya, “*Sheet Metal Forming: Processes and Applications*”. ASM International, 2012.
- [3]. Z. Huda, “*Mechanics of Sheet Metal Forming*” in *Metal Forming Processes: Fundamentals, Analysis, Calculations*, Z. Huda Ed. Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 165-189.
- [4]. P. Chandrasekaran and K. Manonmani, “*A review on springback effect in sheet metal forming process*” in *Int Conf Syst Sci Control Commun Eng Technol*, 2015, vol. 2015, pp. 43-49.
- [5]. Z. Tekiner, “*An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies*”. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 145, no. 1, pp. 109-117, 2004/01/01/ 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2003.07.005>.
- [6]. A. A. Khleif, L. H. Kashkool, and O. H. Hassoon, “*Experimental Investigation of Hold Time Effect on Springback in V-Bending Sheet Metal Forming Process*”. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 881, no. 1, p. 012071, 2020/07/01 2020, doi: [10.1088/1757-899X/881/1/012071](https://doi.org/10.1088/1757-899X/881/1/012071).
- [7]. Q.-N. Banh, V.-K. Le, A.-C. Le, A.-S. Tran, and M.-T. Ho, “*Influences of Groove Geometries on Bend Radius and Springback in V-Bending*”. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 57, no. 6, pp. 776-790, 10/28 2025, doi: [10.5614/j.eng.technol.sci.2025.57.6.4](https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2025.57.6.4).
- [8]. Z. Ma et al., “*Application of combined process of holding pressure and ultrasonic vibration to control the springback behavior of pure titanium foils*”. *Materials Today Communications*, vol. 37, p. 107193, 2023.
- [9]. M. S. Buang, S. A. Abdullah, and J. Saedon, “*Effect of die and punch radius on springback of stainless steel sheet metal in the air v-die bending process*”. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, vol. 8, pp. 1322-1331, 2015.
- [10]. T. Uemori, T. Okada, and F. Yoshida, “*Simulation of Springback in V-bending Process by Elasto-Plastic Finite Element Method with Consideration of Bauschinger Effect*”. *Metals and Materials*, vol. 4, no. 3, pp. 311-314, 1998/05/01 1998, doi: [10.1007/BF03187783](https://doi.org/10.1007/BF03187783).
- [11]. J. Antony, D. Perry, C. Wang, and M. Kumar, “*An application of Taguchi method of experimental design for new product design and development process*”. *Assembly Automation*, vol. 26, no. 1, pp. 18-24, 2006, doi: [10.1108/01445150610645611](https://doi.org/10.1108/01445150610645611).
- [12]. D. C. Montgomery, “*Experimental Design for Product and Process Design and Development*”. *Journal of the Royal Statistical Society. Series D (The Statistician)*, vol. 48, no. 2, pp. 159-177, 1999. [Online]. Available: <http://www.jstor.org/stable/2681183>.
- [13]. J. Antony, “*Simultaneous Optimisation of Multiple Quality Characteristics in Manufacturing Processes Using Taguchi's Quality Loss Function*”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 17, no. 2, pp. 134-138, 2001/01/01 2001, doi: [10.1007/s001700170201](https://doi.org/10.1007/s001700170201).
- [14]. D. R. S. Shyam Kumar Karna, “*An Overview on Taguchi Method*”. *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*, vol. 1, pp. 11-18, 2012.
- [15]. A. Mitra, “*The Taguchi method*”. *WIREs Computational Statistics*, vol. 3, no. 5, pp. 472-480, 2011, doi: <https://doi.org/10.1002/wics.169>.
- [16]. C.-C. Kuo and B.-T. Lin, “*Optimization of springback for AZ31 magnesium alloy sheets in the L-bending process based on the Taguchi method*”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 161-173, 2012/01/01 2012, doi: [10.1007/s00170-011-3373-8](https://doi.org/10.1007/s00170-011-3373-8).
- [17]. A. Hasçalık and U. Çaydaş, “*Optimization of turning parameters for surface roughness and tool life based on the Taguchi method*”. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 38, no. 9, pp. 896-903, 2008/09/01 2008, doi: [10.1007/s00170-007-1147-0](https://doi.org/10.1007/s00170-007-1147-0).
- [18]. S. Thipprakmas and W. Phanitwong, “*Process parameter design of spring-back and spring-go in V-bending process using Taguchi technique*”. *Materials & Design*, vol. 32, no. 8, pp. 4430-4436, 2011/09/01/ 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.069>.
- [19]. S. Dechjarern and M. Kamonrattanasut, “*Sheet Metals Forming Die Design Using Finite Element Analysis and the Taguchi Method*”. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 621, pp. 195-201, 2014, doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.621.195](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.621.195).
- [20]. D.-C. Chen and C.-F. Chen, “*Use of Taguchi method to develop a robust design for the shape rolling of porous sectioned sheet*”. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, no. 1, pp. 104-108, 2006/07/03/ 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.106>.