

# MÔ PHỎNG SỐ QUÁ TRÌNH ĐÀN HỒI CỦA CÁC TẤM MỎNG HỢP KIM ĐỒNG SAU QUÁ TRÌNH DẬP TẠO HÌNH

Hà Xuân Giáp<sup>1</sup>, Nguyễn Thị Thắm<sup>1</sup>, Lê Việt Anh<sup>1</sup>

## TÓM TẮT

Nghiên cứu này mô phỏng độ đàn hồi và độ xoắn của các cấu trúc dãi hình chữ U dựa trên cơ sở dữ liệu thực nghiệm. Các tấm đồng (Cu, CuBe<sub>2</sub> hoặc CuFe<sub>2</sub>P) với độ dày 0,1 mm được sử dụng để tạo các phôi hình chữ nhật. Sau khi các phôi hình chữ nhật được dập sâu, cấu trúc hình chữ U được tạo ra thể hiện phần mở (đàn hồi 2D) và xoắn (đàn hồi 3D). Các đặc trưng hình học về biến dạng là khác nhau đáng kể đối với ba loại hợp kim. Mô phỏng số của quá trình dập sâu được sử dụng để tìm hiểu nguồn gốc của sự khác biệt đó. Đặc tính cơ học của vật liệu được nghiên cứu qua thử nghiệm kéo và độ phỏng thủy lực, nhằm mục đích so sánh và rút ra quy luật biến cứng trong phạm vi biến dạng đại diện cho quá trình. Mô phỏng phần tử hữu hạn được thực hiện bằng cách sử dụng tiêu chí von Mises kết hợp với độ cứng đẳng hướng để so sánh các giá trị của tải trọng và đàn hồi giữa dự đoán và thử nghiệm.

**Từ khóa:** Hợp kim đồng, tấm kim loại mỏng, dập sâu, đàn hồi, xoắn.

**DOI:** <https://doi.org/10.70117/hdujs.2.2024.734>

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hợp kim đồng thường được sử dụng trong ngành công nghiệp điện, điện tử vì các đặc tính cơ và điện vượt trội của chúng. Ví dụ: khung đỡ chip và các dây dẫn điện kết nối chi tiết với môi trường làm việc [1]. Chúng được sử dụng ở dạng vật liệu tấm có độ dày từ 1 mm đến 0,1 mm, tùy thuộc vào ứng dụng và cường độ dòng điện. Trong các thiết bị, các chi tiết làm từ hợp kim đồng thường được tạo ra thông qua các bước cắt và tạo hình liên tiếp, chủ yếu là uốn cong trên bán kính nhỏ [2]. Do đó, một trong những vấn đề chính là kiểm soát và bù lại độ đàn hồi (mức độ thay đổi hình dạng, kích thước của chi tiết sau khi đàn hồi). Đàn hồi có thể được phân chia thành đàn hồi phẳng (2D), tương ứng với sự thay đổi trong hình dạng của mặt cắt, tức là thay đổi góc và độ cong thành bên và đàn hồi xoắn (3D) với các chi tiết kiểu rãnh sau quá trình dập tạo hình. Xoắn được xác định bằng góc nghiêng của hai đầu chi tiết quanh một trục song song với kích thước lớn nhất của nó [3]. Mặc dù đã có một số nghiên cứu về đặc tính đàn hồi uốn và sự thay đổi góc, nhưng vẫn còn thiếu sự nghiên cứu về đàn hồi xoắn [4] [5]. Sự xoắn cũng phát sinh từ sự lệch trục của phôi hình chữ nhật với khuôn tạo hình, trong khi chỉ xảy ra hiện tượng đàn hồi 2D đối với các phôi được căn chỉnh đồng trục [6-8].

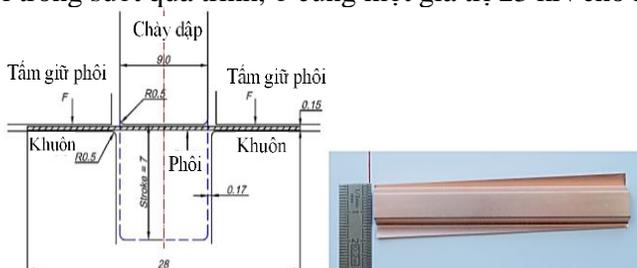
Thực tế, việc dự đoán hình dạng cuối cùng của chi tiết rất cần thiết để đảm bảo chất lượng và độ bền của các kết nối khi chi tiết được hàn hoặc kẹp trên bề mặt nền. Hiện tại, các nhà khoa học đã xác định rằng sử dụng mô phỏng có thể giảm bước thiết kế, miễn là hành vi cơ học được sử dụng làm đầu vào trong các mô hình số là đáng tin cậy [9]. Thêm vào đó, thành phần cũng như các tham số của quá trình dập có ảnh hưởng rất lớn đến việc kiểm soát các tham số đầu vào của mô hình số. Dự đoán độ đàn hồi đã được nghiên cứu

<sup>1</sup>Khoa Kỹ thuật và Công nghệ, Trường Đại học Hồng Đức; Email: [haxuangiap@hdu.edu.vn](mailto:haxuangiap@hdu.edu.vn)

rộng rãi cho các chi tiết trong ngành công nghiệp ô tô, tập trung vào thép và hợp kim nhôm, nhưng ít được nghiên cứu đối với hợp kim đồng [10][11]. Do đó, mục đích của bài báo này là sử dụng mô phỏng số để đưa ra dự đoán và giải thích đặc tính đàn hồi 2D và 3D sau khi dập tạo hình các chi tiết hình chữ U với 3 hợp kim đồng khác nhau, cụ thể là đồng gần nguyên chất (Cu 99,9%), đồng-beryllium (CuBe<sub>2</sub>) và hợp kim đồng-sắt (CuFe<sub>2</sub>P).

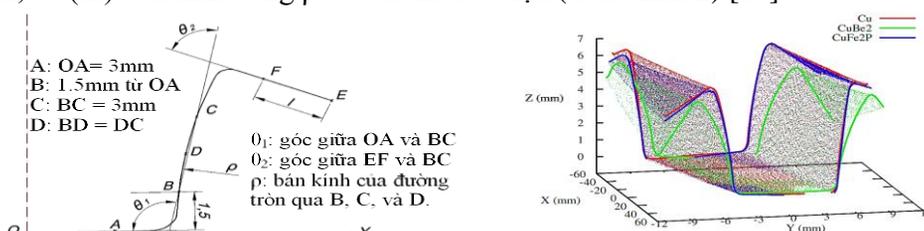
## 2. MẪU VÀ THỬ NGHIỆM

Để tạo thành các mẫu hình chữ U cho mỗi vật liệu hợp kim đồng, bốn tấm hình chữ nhật được chuẩn bị có kích thước 100 mm × 28 mm, với kích thước lớn nhất song song với hướng cán của tấm hợp kim. Sơ đồ dập sâu được thể hiện trong Hình 1. Mỗi tấm chữ nhật được dập đến độ sâu 7 mm và được căn chỉnh lệch một cách có chủ ý 2° đối với khuôn nhằm tăng cường hiện tượng xoắn. Sự lệch tâm này giúp tạo thành một chi tiết không đối xứng theo hướng song song với chiều dài chi tiết, và mỗi đầu của phôi có một mặt bích ngắn và một mặt dài, trong khi phần chính giữa vẫn đối xứng. Vì phôi không đối xứng nên hai miếng chêm giống hệt nhau được chèn vào giữa phôi và khuôn để làm trơn lực giữ và tăng cường độ ổn định. Mỗi miếng chêm có kích thước 100 mm × 24 mm với cùng một loại vật liệu và độ dày giống phôi. Lực giữ tác dụng lên phôi và trên hai miếng chêm; nó được giữ không đổi trong suốt quá trình, ở cùng một giá trị 23 kN cho mỗi vật liệu.



**Hình 1.** Sơ đồ dập (trái) và mẫu sau khi đàn hồi (phải) trong trường hợp căn chỉnh lệch trục [12]

Hình dạng cuối cùng của các mẫu dập được cố định và đo bằng máy quét laser 3D; nhờ đó dữ liệu về điểm, từ việc trích xuất tọa độ nút trên ba phần được chọn dọc theo chiều dài của mẫu, được tạo ra. Độ đàn hồi 2D của từng phần trên mẫu được phân tích. Về cơ bản, nó được xác định bởi ba yếu tố: (i) góc  $\theta_1$  giữa đáy và thành, (ii) góc  $\theta_2$  giữa thành và mặt bích, và (iii) bán kính cong  $\rho$  của thành tiết diện (xem Hình 2) [13].



**Hình 2.** Mô tả các tham số đàn hồi (trái) và so sánh hình dạng biến dạng của mẫu làm từ ba vật liệu hợp kim đồng (phải) [11]

Ngoài ra, các mẫu thử có kích thước nhỏ hơn, 36 mm × 45 mm, cũng được nghiên cứu nhưng các phôi được tạo hình mà không có sự lệch trục với khuôn, chỉ để khảo sát độ mở của phần đàn hồi 2D. Trong trường hợp căn chỉnh này, ứng suất tương ứng trên giá đỡ

phôi là khoảng 2 MPa. Hình ảnh của các chi tiết bị biến dạng được hiển thị trong Hình 3. Trong trường hợp này, phôi được đặt đối xứng, đảm bảo sự cân bằng của lực giữ nên không cần miếng chêm.



(a) Đồng nguyên chất

(b) CuBe<sub>2</sub>

**Hình 3. Hình ảnh hình dạng chi tiết bị biến dạng sau khi đập và đàn hồi của 2 mẫu kim đồng cân chỉnh đồng trục. Tỷ lệ: chiều dài của chi tiết là 36 mm**

### 3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

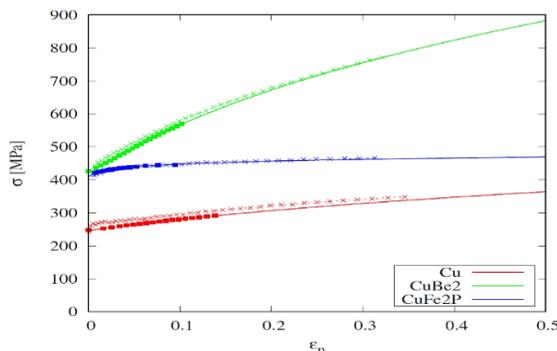
#### 3.1. Tính chất cơ học của vật liệu

Các thử nghiệm kéo cũng như các thử nghiệm độ phòng thủy lực đã được thực hiện để khảo sát hành vi biến cứng trong phạm vi biến dạng lớn. Các bước thực hiện chi tiết được thể hiện trong các tài liệu [12] và [14]. Các đặc tính cơ học được thể hiện trong bảng 1, và đường cong độ biến cứng trong hình 4 cho thấy sự tiến triển của ứng suất tương đương (Cauchy) như là một hàm số của biến dạng dẻo tương đương.

**Bảng 1. Tính chất cơ học được đo bằng độ căng của 3 hợp kim đồng [14]**

Vật liệu	Mô đun Young $E$ (GPa)	Cường độ ứng suất $R_p$ 0.2% (MPa)	Ứng suất kéo cực đại $R_m$ (MPa)	Hệ số dị hướng chuẩn $r^-$	Biến thiên dị hướng phẳng $\Delta r$
Cu 9.9%	104	186	253	0.69	0.08
CuFe <sub>2</sub> P	114	335	419	0.60	0.15
CuBe <sub>2</sub>	126	385	518	0.92	0.28

Có thể thấy rằng không chỉ ứng suất ban đầu đối với vật liệu mà cả quá trình biến cứng sau đó cũng khác nhau. Thực tế, hợp kim đồng thường được xử lý cơ nhiệt sau khi cán để đạt được các tính chất cơ học quy định. Hợp kim CuFe<sub>2</sub>P có độ cứng biến dạng khá thấp, trong khi đó Cu nguyên chất cao hơn và CuBe<sub>2</sub> cao hơn nhiều [14].

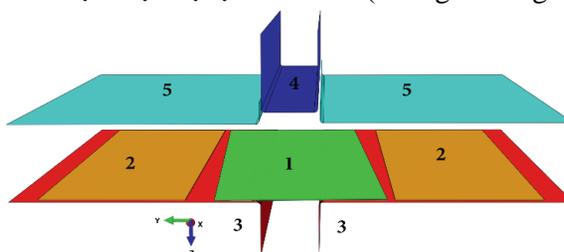


**Hình 4. Đường cong biến cứng (Ứng suất Cauchy  $\sigma$  và biến dạng dẻo tương đương  $\epsilon_p$ ) đối với ba hợp kim đồng: Thử kéo (hình vuông); kiểm tra độ phòng (chéo kèm dấu gạch ngang); dữ liệu ngoại suy (đường liền nét) [2]**

### 3.2. Mô hình số

*Trường hợp căn chỉnh phôi lệch trục:* Do phôi được chú ý căn chỉnh lệch  $2^\circ$  so với các khuôn nhằm tăng cường hiện tượng xoắn nên quá trình dập sâu không có trục đối xứng. Quá trình tạo hình phôi được mô phỏng bằng mô hình 3D với phần mềm phần tử hữu hạn Abaqus. Tất cả các chi tiết và vị trí của chúng trong mô hình số được thể hiện trong Hình 5. Các khuôn được định nghĩa là các vật thể cứng của quá trình phân tích, và phôi cũng như các miếng chêm là các chi tiết có thể biến dạng ba chiều. Hai điểm của phôi được hạn chế trong quá trình tháo dụng cụ sau khi dập: một nút ở giữa bề mặt đáy được ghim và nút đối diện với nó trên chiều dày phôi được cố định dọc theo 2 hướng (X và Y).

Tương tự như thực nghiệm, lực giữ phôi tác dụng được đặt bằng 23 kN và được giữ không đổi từ lúc bắt đầu cho đến hết hành trình dập bằng 7 mm. Quá trình dập được mô phỏng trong điều kiện gần như tĩnh để tránh dao động đối với chuyển vị của chày. Để tạo lưới (mesh) cho tấm phôi và các miếng chêm, phần tử hình hộp chữ nhật tuyến tính 8 nút có tích hợp phương pháp nội suy rút gọn (C3D8R) được sử dụng. Sau khi được chia lưới, phôi được xoay quanh trục thẳng đứng  $2^\circ$  để đạt được độ lệch ban đầu (hướng X trong mô hình 3D ở Hình 5).



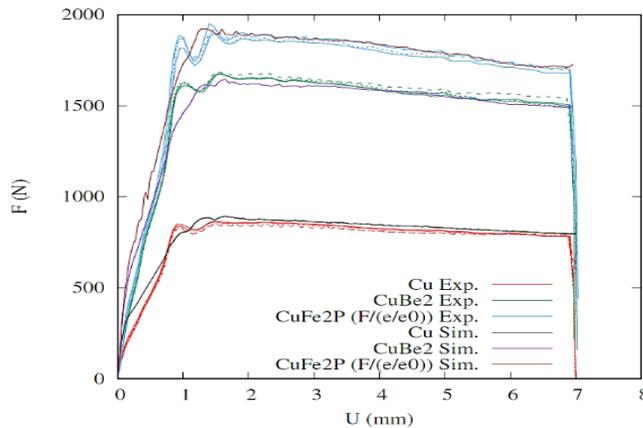
**Hình 5. Sơ đồ phôi (1), miếng chêm (2), khuôn (3), chày (4) và chặn phôi (5) trong mô hình số cho trường hợp căn chỉnh lệch trục [12]**

*Trường hợp căn chỉnh tấm phôi đồng trục:* Phần mềm Abaqus cũng được sử dụng nhưng mô hình dập đơn giản hơn. Các khuôn được mô phỏng như là các vật thể cứng; từ các điều kiện đối xứng, chỉ cần xem xét mô hình 2D ở biến dạng phẳng khi xét đến chiều dài phôi 36 mm. Chi tiết được chia lưới với độ dày 3 lớp, sử dụng phần tử hình chữ nhật 4 nút có tích hợp nội suy rút gọn (S4R).

## 4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU VÀ THẢO LUẬN

### 4.1. Tải trọng dự đoán

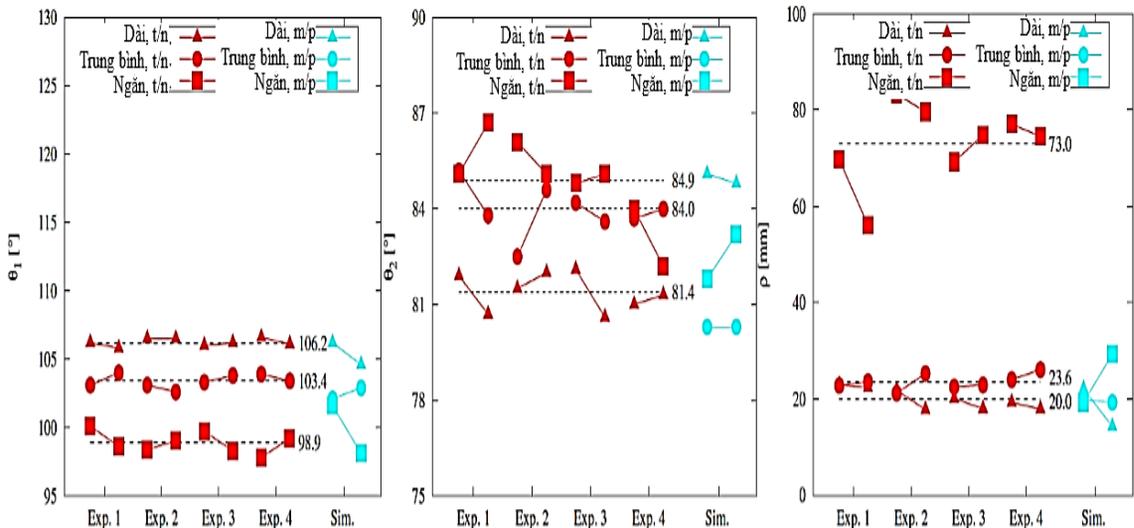
Hình 6 cho thấy sự so sánh giữa các mức tải trọng được chuẩn hóa theo độ dày ban đầu. Vật liệu  $\text{CuFe}_2\text{P}$  có độ dày lớn hơn một chút so với hai vật liệu còn lại. Kết quả khẳng định ảnh hưởng mạnh của vật liệu hợp kim đồng: ứng suất chảy khi kéo càng cao thì tải trọng tạo hình càng cao. Tuy nhiên,  $\text{CuFe}_2\text{P}$  thể hiện tải trọng cao nhất mặc dù  $\text{CuBe}_2$  có tốc độ biến cứng cao nhất và đạt mức ứng suất cao nhất khi kéo đối với biến dạng dẻo tương đương khoảng 0,16 (hình 4), tương ứng với biến dạng tối đa thu được ở cuối quá trình dập. Có thể thấy rằng mô hình 3D dự đoán tốt sự tiến triển của tải trọng, thể hiện mức giảm ổn định sau giá trị đỉnh ban đầu.



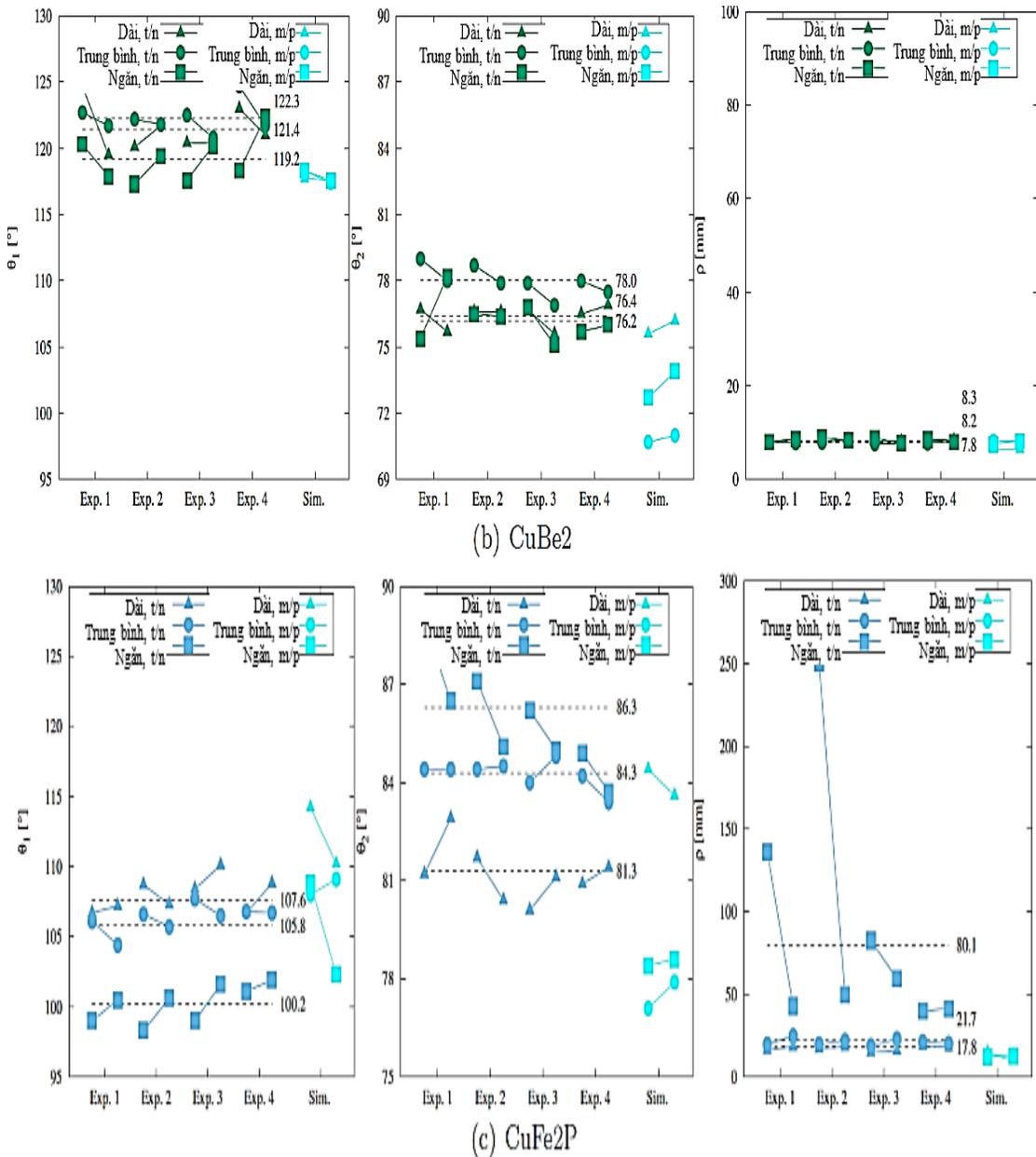
**Hình 6. So sánh tải trọng tạo hình F như một hàm số của hành trình dập U đối với ba vật liệu trong trường hợp căn chỉnh phôi lệch trục (bốn mẫu và một mô hình mô phỏng cho mỗi vật liệu)**

**4.2. Thông số đàn hồi 2D**

Hình dạng của ba phần, tức là phần giữa và 2 phần đầu đối với trường hợp 3D và chỉ phần giữa trong trường hợp 2D, được phân tích bằng cách tính các góc  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  và bán kính cong của tường  $\rho$ . Hình 7 cho thấy sự so sánh giữa các giá trị thực nghiệm và số học của ba vật liệu và trường hợp căn chỉnh phôi lệch trục; cùng một thang đo được sử dụng cho ba vật liệu để tạo thuận lợi cho việc so sánh. Các giá trị được trình bày cho 4 thử nghiệm, để làm nổi bật độ lặp lại, và kết quả từ mô phỏng số nằm ở phía bên phải của mỗi biểu đồ. Hai mặt đầu mỗi chi tiết mẫu có mặt bích dài và mặt ngắn do không đối xứng nhưng không cùng phía, trong khi mặt cắt ở giữa đối xứng.



(a) Cu

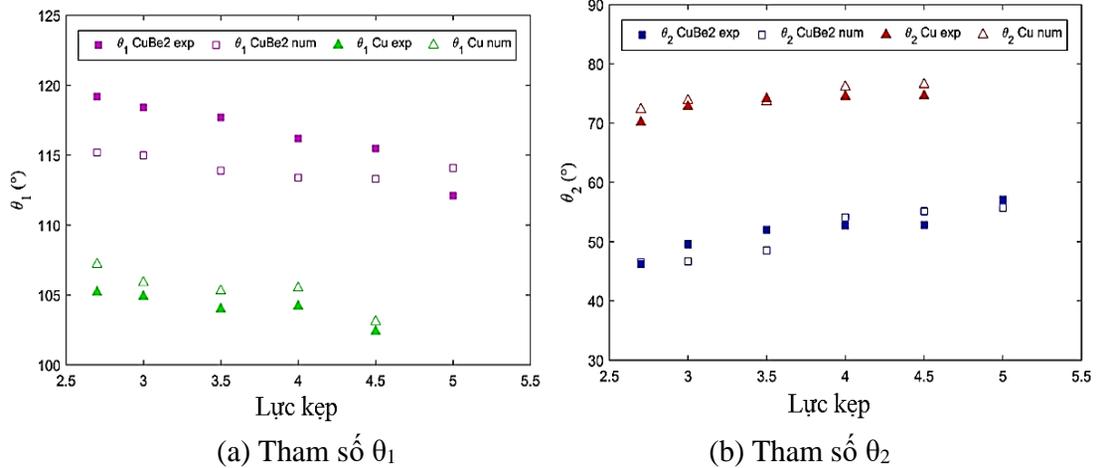


**Hình 7. Dự đoán các tham số hình học mô tả hình dạng mặt cắt sau đàn hồi cho trường hợp căn chỉnh phối lệch trục. (Đường gạch ngang: mức trung bình. t/n: thực nghiệm, m/p: mô phỏng)**

Nhìn chung, đồng nguyên chất và CuFe<sub>2</sub>P có xu hướng đàn hồi tương tự nhau với các góc  $\theta_1$  và  $\theta_2$  lần lượt có giá trị 100-105° và 85°. Với đồng nguyên chất, mô phỏng dự đoán góc  $\theta_1$  khá tốt nhưng cao một chút với góc  $\theta_2$ . Các tham số góc của CuFe<sub>2</sub>P được đánh giá tương đối cao với  $\theta_1$  và tương đối thấp với  $\theta_2$ . Đối với CuBe<sub>2</sub>, giá trị thử nghiệm trung bình của  $\theta_1$  và  $\theta_2$  lần lượt là 120° và 76°; ở đây sự thay đổi của góc  $\theta_1$  như một hàm của chiều dài mặt bích không được dự đoán chính xác, với giá trị mô phỏng gần như không đổi; kết quả tương tự cũng được ghi nhận đối với góc  $\theta_2$  khi giá trị này bị dự đoán thấp hơn thực tế.

Liên quan đến bán kính cong của tường  $\rho$ , độ lớn được dự đoán tốt cho ba vật liệu, mặc dù mức tăng lớn được ghi nhận đối với đồng nguyên chất và  $\text{CuFe}_2\text{P}$  đối với mặt bích ngắn (70 mm đối với đồng nguyên chất và lên đến 80 mm đối với  $\text{CuFe}_2\text{P}$ ) không được dự đoán. Tuy nhiên, các thành khá thẳng thu được của vật liệu này dẫn đến giá trị  $\rho$  cao, rất nhạy cảm với các thông số quy trình và dẫn đến độ phân tán khá lớn. Độ mở của mặt cắt đối với  $\text{CuBe}_2$  lớn so với mặt cắt của hai vật liệu còn lại, được biểu thị bằng một giá trị nhỏ của độ cong của thành. Cụ thể,  $\rho$  là khoảng 8 mm và không phụ thuộc vào kích thước mặt bích, điều này được dự đoán tốt trong mô phỏng.

Nhìn chung, các dự đoán bằng số phản ánh chính xác rằng đồng nguyên chất và  $\text{CuFe}_2\text{P}$  có mức độ đàn hồi 2D thấp hơn so với  $\text{CuBe}_2$ .

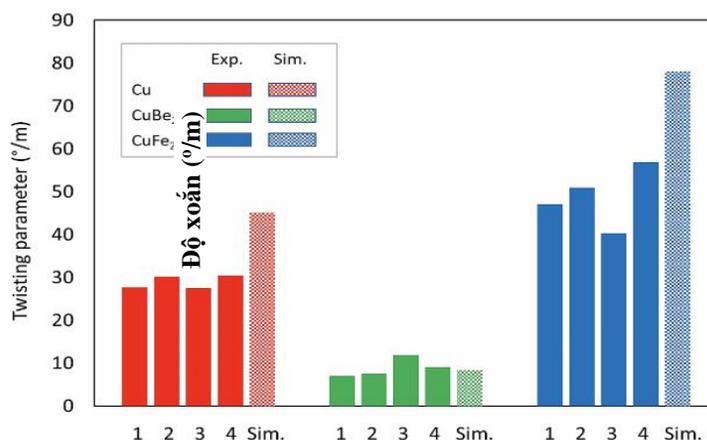


**Hình 8. Dự đoán các tham số hình học mô tả hình dạng mặt cắt sau đàn hồi cho trường hợp căn chỉnh phối đồng trục**

Hình 8 trình bày sự so sánh các giá trị thực nghiệm và dự đoán cho các tham số  $\theta_1$  và  $\theta_2$ , cho trường hợp căn chỉnh phối đồng trục. Có thể thấy rằng độ lớn của giá trị góc thứ nhất  $\theta_1$  khá gần với giá trị thu được cho trường hợp căn chỉnh phối lệch, lần lượt là  $105^\circ$  và  $115\text{-}120^\circ$  đối với đồng nguyên chất và  $\text{CuBe}_2$ ; trong khi giá trị  $\theta_2$  thấp hơn đáng kể, lần lượt là  $70^\circ$  và  $50^\circ$  đối với đồng nguyên chất và  $\text{CuBe}_2$ , được so sánh với  $85^\circ$  và  $75^\circ$  tương ứng đối với trường hợp căn chỉnh phối lệch. Sự khác biệt này có thể do hình dạng tấm phối (chiều dài mặt bích của trường hợp đồng trục dài hơn so với trường hợp lệch tâm) hoặc cũng có thể do hiện tượng xoắn xảy ra trong trường hợp lệch tâm.

### 4.3. Xoắn

Mặc dù đồng nguyên chất và  $\text{CuFe}_2\text{P}$  có độ đàn hồi 2D khá thấp, độ đàn hồi 3D của hai vật liệu này cao hơn so với  $\text{CuBe}_2$ . Độ lớn như vậy được đặc trưng bởi một tham số xoắn, được định nghĩa là tỷ lệ giữa góc giữa đường đáy của hai đầu cuối phối với khoảng cách giữa chúng. Hình 9 so sánh tham số độ xoắn dự đoán với các giá trị thực nghiệm, đối với trường hợp căn chỉnh phối lệch trục, thu được từ bốn thử nghiệm tương tự được cung cấp trong phần 2. Độ lặp lại tốt, được phân tích qua 4 thử nghiệm cho từng vật liệu, dẫn đến giá trị trung bình đáng tin cậy lần lượt là  $28^\circ\text{m}^{-1}$ ,  $8^\circ\text{m}^{-1}$  và  $45^\circ\text{m}^{-1}$  đối với đồng nguyên chất,  $\text{CuBe}_2$  và  $\text{CuFe}_2\text{P}$ . Đối với đồng nguyên chất và  $\text{CuFe}_2\text{P}$ , có thể thấy độ xoắn (3D) càng cao thì độ mở (2D) càng thấp. Góc xoắn được dự đoán bằng mô phỏng phù hợp với các mẫu  $\text{CuBe}_2$  nhưng khá cao đối với các mẫu đồng nguyên chất và  $\text{CuFe}_2\text{P}$ .



**Hình 9. Các thông số xoắn của ba loại vật liệu. Đối với mỗi vật liệu, 4 giá trị đầu tiên tượng trưng cho các thí nghiệm và giá trị cuối cùng tượng trưng cho mô phỏng số**

Tuy nhiên, xu hướng độ đàn hồi 2D thấp có liên quan đến độ xoắn cao được thể hiện rõ ràng. Xu hướng này có thể liên quan đến tốc độ biến cứng của vật liệu. Thật vậy, như trong Hình 4, CuBe<sub>2</sub> thể hiện tốc độ biến cứng lớn so với hai vật liệu còn lại. Điều đó được thể hiện khi các mẫu CuBe<sub>2</sub> có giá trị trung bình lớn nhất là  $\theta_1$  và giá trị trung bình nhỏ nhất là  $\theta_2$ ,  $\rho$  và tham số xoắn. Mỗi tương quan này đòi hỏi sự nghiên cứu sâu hơn.

## 5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này trình bày sự so sánh các kết quả thực nghiệm và mô phỏng số liên quan đến độ đàn hồi 2D và 3D của 3 loại hợp kim đồng. Quá trình dập các chi tiết hình chữ U đã được thể hiện với các tấm phôi hình chữ nhật được căn chỉnh thẳng hoặc lệch một chút trên các khuôn tạo hình. Tải trọng chày dập và hình dạng cuối cùng của các mẫu sau khi đàn hồi đã được phân tích. Trong bước đầu tiên, đặc tính cơ học của vật liệu được biểu diễn đơn giản bằng độ cứng đẳng hướng liên quan đến tiêu chí chảy von Mises. Kết quả cho thấy rằng mô hình số dự đoán tương đối chính xác mức độ đàn hồi 2D thấp của đồng nguyên chất và CuFe<sub>2</sub>P, độ mở tiết diện lớn của CuBe<sub>2</sub>, và độ xoắn khá lớn của đồng nguyên chất cũng như CuFe<sub>2</sub>P so với CuBe<sub>2</sub>. Các xu hướng này có thể liên quan đến tốc độ biến cứng của vật liệu. Tuy nhiên, việc chỉ áp dụng lý thuyết hiện tượng học về tính dẻo cũng có nhược điểm của nó. Mặc dù mô phỏng đưa ra dự đoán khá chính xác về tải trọng chày dập so với hành trình, nhưng nó không cung cấp cái nhìn sâu sắc và rõ ràng về quá trình đàn hồi và xoắn. Các tác giả hy vọng sẽ cải thiện các dự đoán bằng một mô hình tiên tiến hơn với lý thuyết về độ dẻo như được sử dụng trong nghiên cứu [15].

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Mao, Q., Liu, Y., & Zhao, Y. (2024), *A review on copper alloys with high strength and high electrical conductivity*, Journal of Alloys and Compounds, 174456.
- [2] G. X. Ha, M. G. Oliveira, A. Andrade-Campos, P. Y. Manach, and S. Thuillier (2021), *Prediction of coupled 2D and 3D effects in springback of copper alloys after deep drawing*, Int. J. Mater. Form., 14(5), 1171-1187.

- [3] Dezelak, M., Stepisnik, A., Pahole, I., & Ficko, M. (2014), *Evaluation of twist springback prediction after an AHSS forming process*, International Journal of Simulation Modelling, 13(2), 171-182.
- [4] Li, M., Wang, R., Pang, Q., Niu, C., Liu, X., & Hu, Z. (2024), *Influence of local features on twist springback of high-strength steel long channels*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 238(9), 1338-1350.
- [5] Tejyan, S., Kumar, N., Ravi, R. K., Singh, V., & Gangil, B. (2024), *Analysis of spring back effect for AA6061 alloy sheet using finite element analysis*, Materials Today: Proceedings.
- [6] C. H. Pham, S. Thuillier, and P. Y. Manach (2014), *Twisting analysis of ultra-thin metallic sheets*, J. Mater. Process. Technol., 214(4), 844-855.
- [7] C. H. Pham, S. Thuillier, and P.-Y. Manach (2015), *2D Springback and Twisting of Ultra-Thin Stainless Steel U-Shaped Parts*, Steel Res. Int., 86(8), 861-868.
- [8] A. Ishiwatari, H. Kano, J. Hiramoto, and T. Inazumi (2012), *Improvement on CAE Model for Accurate Torsional Springback Prediction in High Strength Steel Part Forming*, Key Engineering Materials, 504, 437-442.
- [9] H. B. Mullan (2004), *Improved prediction of springback on final formed components*, J. Mater. Process. Technol., vol.153-154, 464-471.
- [10] C. Gomes, O. Onipede, and M. Lovell (2005), *Investigation of springback in high strength anisotropic steels*, J. Mater. Process. Technol., 159(1), 91-98.
- [11] V. Esat, H. Darendeliler, and M. I. Gokler (2002), *Finite element analysis of springback in bending of aluminium sheets*, Mater. Des., 23(2), 223-229.
- [12] S. Thuillier, C. H. Pham, and P. Y. Manach (2018), *2D springback and twisting after drawing of copper alloy sheets*, J. Phys. Conf. Ser., vol. 1063, 012124.
- [13] C. H. Pham, S. Thuillier, and P. Y. Manach (2013), *Twisting of sheet metals*, AIP Conf. Proc., 1567(1), 422-427.
- [14] F. Adzima, T. BALAN, P.-Y. Manach, N. Bonnet, and L. Tabourot (2017), *Crystal plasticity and phenomenological approaches for the simulation of deformation behavior in thin copper alloy sheets*, Int. J. Plast., vol. 94, 171-191.
- [15] Cruzado, A., Ariza, M. P., Needleman, A., Ortiz, M., & Benzerga, A. A. (2024), *A discrete dislocation analysis of size-dependent plasticity in torsion*, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 105709.

## NUMERICAL SIMULATION OF THE SPRINGBACK OF COPPER ALLOY THIN SHEETS AFTER THE FORMING PROCESS

Ha Xuan Giap, Nguyen Thi Tham, Le Viet Anh

### ABSTRACT

*This study aims to simulate springback (elastic rebound) and twisting of long U-shaped specimens based on experimental data. Copper sheets (Cu, CuBe2 or CuFe2P) with a thickness of 0.1 mm are used to fabricate initial rectangle sheets. After the rectangle*

*sheets are created, U-shaped structures are created by deepdrawing process, which bear opening (2D springback) and twisting (3D springback). The specific deformation geometries are significantly different for the three alloys. This study is in purpose of understanding the origin of the difference by numerical deepdrawing simulation. The mechanical properties of the materials are studied through tension and hydraulic strengthening tests, with the aim of comparing and deriving hardening rules within the variation range representative of the process. The finite element simulation is performed using the Mises criterion combined with isotropic hardening to compare the values of load and springback between prediction and test.*

**Keywords:** *Copper alloy, sheet metal, deepdrawing, springback, twisting.*

\* Ngày nộp bài: 22/5/2024; Ngày gửi phản biện: 25/5/2024; Ngày duyệt đăng: 15/11/2024

\* Bài báo là kết quả nghiên cứu từ đề tài NCKH cấp cơ sở (mã số ĐT-2023-18) của Trường Đại học Hồng Đức.