NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM ẢNH HƯỞNG CỦA CHIỀU DÀY MẪU THỬ TRONG THÍ NGHIỆM DẬP MẪU NHỎ CHO THÉP KHÔNG GỈ SUS304

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE EFFECT OF THICKNESS OF SPECIMEN IN SMALL PUNCH TEST FOR SUS304 STAINLESS STEEL

Phạm Thị Hằng[1,*], Lê Quang Khải[1]

DOI: http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.268

TÓM TẮT

Phương pháp thí nghiệm dập mẫu nhỏ được đánh giá là phương pháp thí nghiệm cơ học vật liệu đáng tin cậy, được áp dụng rộng rãi cho các vật liệu kim loại. Trong nghiên cứu này, thí nghiệm dập mẫu nhỏ được thực hiện trên máy thử kéo truyền thống cho các mẫu thử có chiều dày khác nhau làm từ vật liệu thép không gỉ họ austenite SUS304. Chỉ tiêu giới hạn chảy của vật liệu được tính toán từ đường cong quan hệ lực tác dụng - độ võng khi thực hiện thí nghiệm. Từ kết quả tính toán cho thấy, giới hạn chảy tính theo thí nghiệm dập mẫu nhỏ phụ thuộc nhiều vào kích thước mẫu thí nghiệm. Khi chiều dày mẫu thí nghiệm là 0,5mm cho kết quả rất gần với kết quả giới hạn chảy từ thí nghiệm kéo. Trong khi đó, kết quả cho mẫu chiều dày khác có sự sai khác lớn do ảnh hưởng của tỉ lệ giữa kích thước mẫu thí nghiệm và kích thước của đồ gá.

Từ khóa: *Cơ tính vật liệu, giới hạn chảy, thép không gỉ, thí nghiệm dập mẫu nhỏ.*

ABSTRACT

The small punch test is considered as a reliable testing method for evaluation of mechanical properties of metal materials. In this study, small punch tests were performed by a conventional tensile testing machine for specimens with different thicknesses made from SUS304 austenitic stainless steel. The yield strength criteria of the material are calculated from the applied force - deflection relationship. From the calculation results, it shows that the yield strength calculated by the small punch test depends considerably on the size of the specimen. When the thickness of specimen is 0.5 mm, the results are very close to the yield strength calculated from the tensile test. Meanwhile, the results for specimens of other thicknesses have large differences due to the influence of the ratio between the size of the specimen and the size of the jig.

***Keywords*:** *Mechanics of materials, yield strength, stainless steel, small punch test.*

[1]Trường Đại học Thủy Lợi

[*]Email: pthang@tlu.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/3/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 09/8/2024

Ngày chấp nhận đăng: 27/8/2024

1. GIỚI THIỆU

Thông thường, các chỉ tiêu độ bền của vật liệu bao gồm giới hạn chảy, giới bền được đánh giá từ các thí nghiệm truyền thống như kéo đúng tâm hoặc uốn ba điểm trên thiết bị thử kéo. Từ những năm 1980, các nhà khoa học Mỹ và Nhật đã phát triển mô hình thí nghiệm cơ học vật liệu mới là thí nghiệm dập mẫu nhỏ dùng trong vật liệu phóng xạ [1]. Phương pháp thí nghiệm dập mẫu nhỏ nhanh chóng trở thành phương pháp thí nghiệm cơ học vật liệu đáng tin cậy, không chỉ dùng cho vật liệu phóng xạ mà được áp dụng rộng rãi cho các vật liệu kim loại [2, 3]. Phương pháp thí nghiệm này có nhiều ưu điểm so với các phương pháp thí nghiệm cơ học vật liệu truyền thống, nổi bật là chi phí thí nghiệm ít do sử dụng mẫu thì nghiệm nhỏ, không chỉ đánh giá độ bền mà còn có thể sử dụng là phương pháp thí nghiệm đánh giá độ dai phá hủy của vật liệu [4]. Thí nghiệm dập mẫu nhỏ trong điều kiện tải trọng tĩnh hoàn toàn có thể thực hiện được trên máy thử kéo - nén truyền thống chỉ với việc thiết kế một bộ đồ gá mới. Nhờ các ưu điểm đó, phương pháp thí

nghiệm dập mẫu nhỏ đã trở nên phổ biến trên thế giới trong những năm qua và nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà khoa học.

Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra, kết quả đường cong lực tác dụng - độ võng thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ có thể sử dụng để tính toán các chỉ tiêu độ bền của vật liệu. Đặc biệt, mối quan hệ giữa giới hạn chảy của vật liệu và lực tới hạn từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ được rất nhiều nghiên cứu khác quan tâm [5-8]. Garcia và cộng sự [5] đã chứng minh giới hạn chảy thu được từ thí nghiệm kéo đúng tâm có quan hệ với giá trị lực tới hạn tương đương thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ. Aishwary và cộng sự [6] đã sử dụng kết quả mô phỏng phần tử hữu hạn cho thí nghiệm dập mẫu nhỏ để tính toán giới hạn bền của vật liệu. Nghiên cứu của Moreno [7] cho thấy mối quan hệ giữa các chỉ tiêu độ bền và kết quả của thí nghiệm dập mẫu nhỏ hoàn toàn phụ thuộc vào vật liệu. Vừa qua, Lancaster và cộng sự [8] đã đánh giá tính chất cơ học của vật liệu Ti-6Al-4V bằng thí nghiệm dập mẫu nhỏ từ các kết quả thực nghiệm và mô phỏng phần tử hữu hạn. Trong nghiên cứu này, không chỉ các chỉ tiêu độ bền mà chỉ tiêu độ dãn dài tương đối cũng được tính toán dựa vào thí nghiệm dập mẫu nhỏ. Từ các công trình nghiên cứu cho thấy thí nghiệm dập mẫu nhỏ đã trở thành một phương pháp thí nghiệm cơ học đáng tin cậy và có nhiều ưu điểm.

Mặc dù được sử dụng phổ biến trên thế giới, đến nay vẫn chưa có tiêu chuẩn nào được đề xuất cho kích thước mẫu thử dùng trong thí nghiệm dập mẫu nhỏ [9]. Thông thường, trong thí nghiệm dập mẫu nhỏ, mẫu thử dạng đĩa có kích thước chiều dày 0,3 ÷ 7mm và đường kính 10mm [2]. Phổ biến nhất là sử dụng mẫu có kích thước chiều dày 5mm và đường kính 10mm [4]. Tuy nhiên, khi nghiên cứu tính chất phá hủy của vật liệu sử dụng mẫu có vết nứt, chiều dày rất nhỏ chỉ 0,5mm rất khó khăn trong việc tạo vết nứt. Việc tăng chiều dày mẫu thử lớn hơn 0,5mm sẽ thuận lợi hơn cho việc tạo vết nứt phá hủy mỏi cho mẫu thí nghiệm, phục vụ nghiên cứu tính chất phá hủy của vật liệu trên mẫu thử với vết nứt sẵn có. Ngoài ra, nhiều trường hợp các chi tiết sử dụng trong thực tế có chiều dày nhỏ hơn 0,5mm, việc ứng dụng phương pháp thí nghiệm dập mẫu nhỏ cho các trường hợp này là cần thiết. Do đó, nghiên cứu sử dụng mẫu có chiều dày khác nhau trong thí nghiệm dập mẫu nhỏ cần được thực hiện và đánh giá ảnh hưởng của kích thước mẫu thí nghiệm đến quan hệ độ bền của vật liệu và lực tác dụng thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ. Moreno và cộng sự [7] đã nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày mẫu thử trong thí nghiệm dập mẫu nhỏ với các trường hợp chiều dày 0,4mm; 0,5mm và 0,6mm cho thép P91. Li và cộng sự [10] đã xem xét mối quan hệ giữa thí nghiệm dập mẫu nhỏ và độ bền của vật liệu từ thí nghiệm kéo khi chiều dày mẫu thử thay đổi từ 0,4 ÷ 0,65mm cho vật liệu Inconel 625.

Trong nghiên cứu này, thí nghiệm dập mẫu nhỏ được thực hiện trên máy thử kéo truyền thống với một thiết lập mới cho các mẫu thử có chiều dày khác nhau cho thép không gỉ họ austenite SUS304. Kết quả thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ sẽ được sử dụng để tính toán chỉ tiêu giới hạn chảy của vật liệu. Ảnh hưởng của chiều dày mẫu thí nghiệm đến mối quan hệ giữa độ bền của thép không gỉ SUS304 và kết quả lực, độ võng từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ được xem xét.

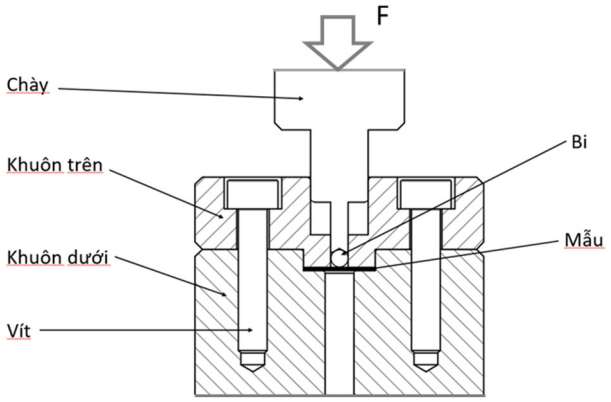
2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu thí nghiệm

Vật liệu sử dụng trong thí nghiệm dập mẫu nhỏ là thép không gỉ họ austenite SUS304. Thép không gỉ 304 được nhiệt luyện ở 1050°C trong khoảng 30 phút và tôi trong nước. Độ cứng của thép được đo trên thiết bị đo độ cứng Rockwell AR-20 thang HRA 3 lần ở 3 vị trí khác nhau của mẫu thử và lấy trung bình. Kết quả độ cứng thu được trước và sau khi tôi là 69HRA và 70HRA, tương ứng.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Mô hình thí nghiệm

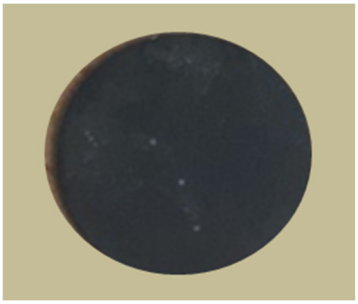


Hình 1. Mô hình thí nghiệm dập mẫu nhỏ

Mô hình thí nghiệm dập mẫu nhỏ được thể hiện trên hình 1. Đồ gá thí nghiệm dập mẫu nhỏ bao gồm khuôn trên, khuôn dưới, chày, bi thép và dẫn hướng. Để thuận lợi hơn cho quá trình chế tạo, đầu chày được làm bằng và bi thép đường kính 2,4mm được sử dụng như chi tiết tác dụng lực tiếp xúc trực tiếp lên mẫu thí nghiệm. Đường kính lỗ của khuôn dưới là 4mm. Mẫu thí nghiệm được đặt chính giữa của khuôn dưới, sau đó khuôn trên và khuôn dưới bắt chặt vít với nhau. Khuôn trên, khuôn dưới và chày sau khi lắp đặt được đặt trong bạc dẫn hướng để

đảm bảo cho chày dịch chuyển theo phương thẳng đứng khi có lực tác dụng ở đầu chày. Dưới tác dụng của lực F, mẫu bị biến dạng với dạng điển hình là hình chiếc mũ, tiết diện bị thắt ở vùng giữa mẫu và sau đó bị phá hủy.

Trong nghiên cứu này, mẫu thí nghiệm có đường kính 10mm và các chiều dày khác nhau 0,4mm; 0,5mm và 0,7mm được sử dụng. Hình 2 thể hiện hình ảnh mẫu thí nghiệm dập nhỏ cho trường hợp mẫu có chiều dày 0,5mm.



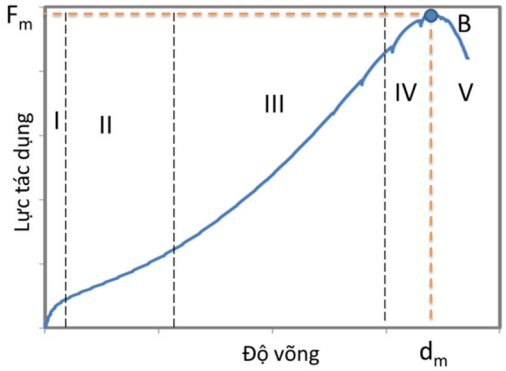
Hình 2. Hình ảnh mẫu thí nghiệm sau khi nhiệt luyện

Hình 3. Sơ đồ thí nghiệm trên máy thử kéo

Hình 3 thể hiện sơ đồ thí nghiệm thực hiện trên máy thử kéo với bộ đồ gá chuyên dụng cho thí nghiệm dập mẫu nhỏ như hình 1. Chuyển vị của thiết bị kéo - nén và lực đo từ load cell của thiết bị biến đổi rất lớn. Trong khi đó, thí nghiệm dập mẫu nhỏ chỉ sử dụng khoảng giá trị lực tác dụng và chuyển vị rất nhỏ. Do đó, để tăng độ chính xác của kết quả thí nghiệm cần dùng đầu đo chuyển vị và load cell ngoài. Đầu đo lực được đặt ở phía trên bộ khuôn thí nghiệm dập mẫu nhỏ. Một đồng hồ đo chuyển vị model DTH-A-30 với sai số ±0,002mm của hãng KYOWA, Nhật Bản được gá trên đồ gá vạn năng. Một đầu thanh ngang được sử dụng tiếp xúc với đầu chày, đầu còn lại tiếp xúc với đầu đo chuyển vị. Kết quả lực tác dụng và chuyển vị theo thời gian được xử lý qua bộ xử lý số liệu Multi Recorder TMR-211.

2.2.2. Đánh giá chỉ tiêu độ bền vật liệu từ kết quả thí nghiệm dập mẫu nhỏ

Kết quả thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ được đánh giá dựa trên mối quan hệ giữa lực tác dụng - độ võng và phân tích hình ảnh mẫu thí nghiệm. Hình 4 thể hiện đường cong mối quan hệ giữa lực tác dụng - độ võng điển hình thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ. Lực tác dụng và độ võng đo được từ các thiết bị đo trong quá trình thí nghiệm. Từ hình 4 có thể thấy, dạng đường cong lực tác dụng-độ võng thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ rất khác biệt khi thu được từ thí nghiệm truyền thống như kéo đúng tâm, uốn ba điểm. Theo Abendroth và cộng sự [11], đường cong này được chia thành 5 vùng tương ứng với các giai đoạn biến dạng của vật liệu. Vùng I là vùng biến dạng uốn đàn hồi của vật liệu. Tiếp theo là vùng II chuyển tiếp giữa biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo. Khi tăng lực tác dụng, vật liệu sẽ trải qua giai đoạn III dài nhất trong quá trình vật liệu bị biến dạng khi thí nghiệm dập mẫu nhỏ, gọi đó là vùng biến dạng dẻo và biến cứng. Vùng IV là vùng biến dạng kém ổn định và vết nứt đầu tiên sẽ xuất hiện trong giai đoạn này. Sau khi vết nứt đầu tiên xuất hiện và lực đạt giá trị cực đại, vật liệu sang vùng V là vùng vết nứt được phát triển và phá hủy vật liệu sẽ xảy ra. Tại vùng V, lực tác dụng sẽ giảm sau khi đạt giá trị cực đại. Giá trị lực cực đại F_{max} và độ võng tại điểm cực đại d_m là hai thông số quan trọng thu được từ thí nghiệm dập nhỏ có thể sử dụng để tính toán chỉ tiêu độ bền và độ biến dạng phá hủy tương đương của vật liệu.

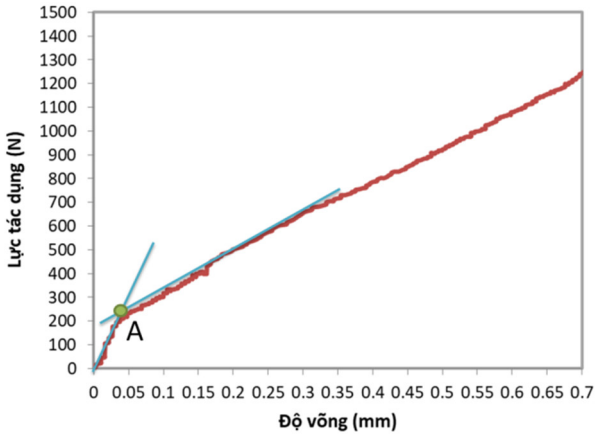


Hình 4. Quan hệ lực tác dụng - độ võng thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ

Theo Mao và cộng sự [12], giá trị lực tới hạn F_y là giá trị lực tại điểm chuyển tiếp giữa giai đoạn biến dạng đàn hồi và giai đoạn chuyển tiếp đàn hồi-dẻo thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ được sử dụng để tính toán giới hạn chảy của vật liệu theo công thức sau:

$$\sigma_y = \alpha \frac{F_y}{t_o^2} + \beta \quad (1)$$

Trong đó, α và β là các hệ số thể hiện sự không phụ thuộc kích thước mẫu thí nghiệm, F_y là giá trị lực tới hạn thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ, t_o là chiều dày ban đầu của mẫu thử. Theo Garcia và cộng sự [5], từ kết quả giới hạn chảy của vật liệu σ_y thu được từ thí nghiệm kéo và tỉ số F_y/t_o^2 thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ có thể thiết lập đường trend-line tuyến tính bậc nhất cho mối quan hệ σ_y và F_y/t_o^2. Từ đó, xác định được các giá trị α và β. Mặt khác, rất khó xác định chính xác điểm chuyển tiếp giữa giai đoạn biến dạng đàn hồi và giai đoạn chuyển tiếp đàn hồi - dẻo. Do đó, theo Mao và cộng sự [12], F_y được xác định là giá trị lực tại giao điểm của đường đàn hồi tuyến tính kéo dài và tiếp tuyến của đường cong vùng chuyển tiếp II. Cách xác định F_y được thể hiện trên hình 5.

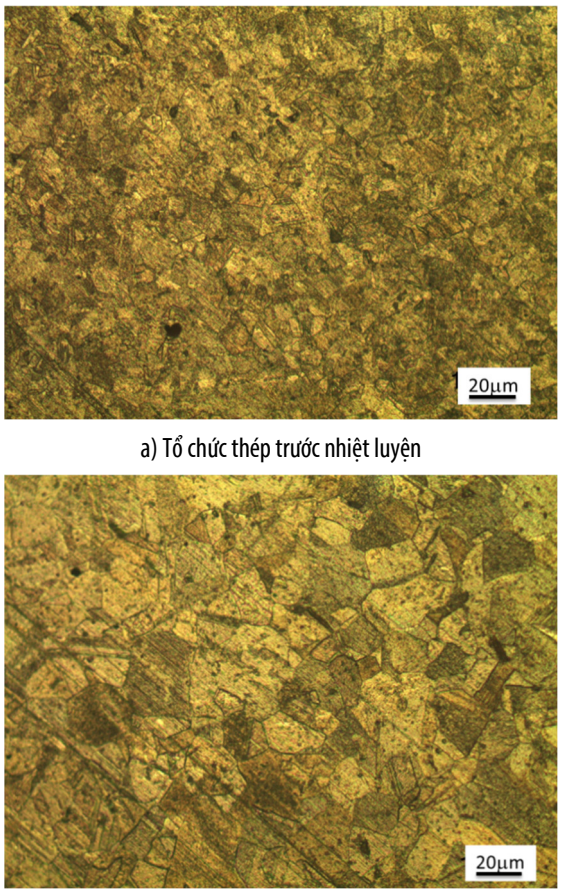


Hình 5. Phương pháp xác định giá trị lực tới hạn

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Tổ chức tế vi của thép trước và sau khi nhiệt luyện được thể hiện trên hình 6. Trước nhiệt luyện tổ chức của thép là pha austenite. Sau khi nhiệt luyện, pha austenite có dạng đa cạnh và gần như không có pha mới tạo thành. Theo Pham và cộng sự [13], thép không gỉ 304 có tổ chức hầu hết là pha austenite sau khi nhiệt luyện. Pha austenite này kém ổn định và có thể chuyển biến thành pha mactenxit do cơ chế chuyển biến pha do biến dạng dẻo vật liệu. Do đó, tính chất cơ học của thép không gỉ 304 được cải thiện qua quá trình biến dạng dẻo của vật liệu.

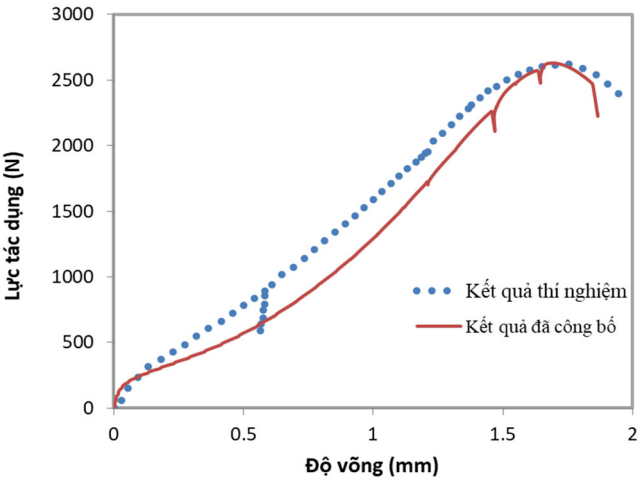
Trước hết, để đánh giá độ tin cậy của các kết quả thu được từ mô hình thí nghiệm dập mẫu nhỏ được thiết lập, kết quả đường cong lực tác dụng - độ võng cho trường hợp mẫu có chiều dày 0,5mm được so sánh với kết quả đã được công bố với cùng vật liệu và tốc độ biến dạng. Hình 7 thể hiện kết quả thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ và so sánh với kết quả đã công bố. Kết quả thu được từ thí nghiệm được thiết lập trên máy thử kéo cho thấy đường cong quan hệ lực tác dụng - độ võng có dạng đường cong điển hình thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ. Kết quả so sánh rất tương đồng với kết quả đã công bố trong bài báo trước đó [13]. Như vậy, thí nghiệm dập mẫu nhỏ được thiết lập hoàn toàn đủ độ tin cậy và có thể dùng để đánh giá tính chất cơ học vật liệu.



a) Tổ chức thép trước nhiệt luyện

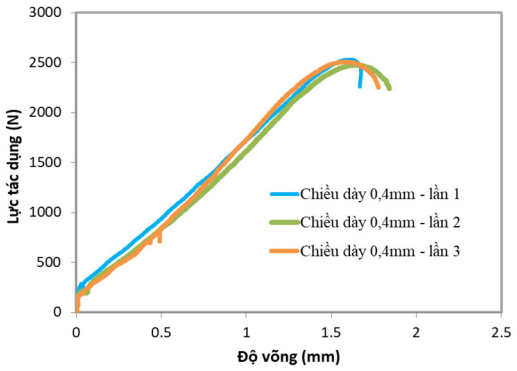
b) Tổ chức thép sau nhiệt luyện

Hình 6. Tổ chức tế vi thép trước và sau nhiệt luyện

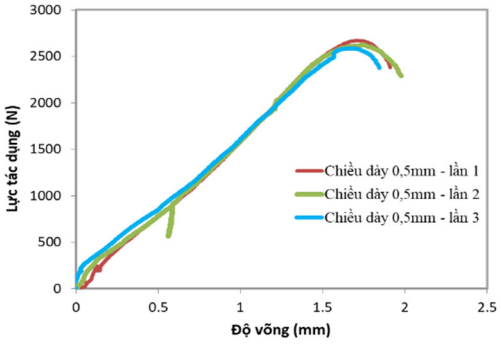


Hình 7. Đường cong lực tác dụng - độ võng so sánh với bài báo [13]

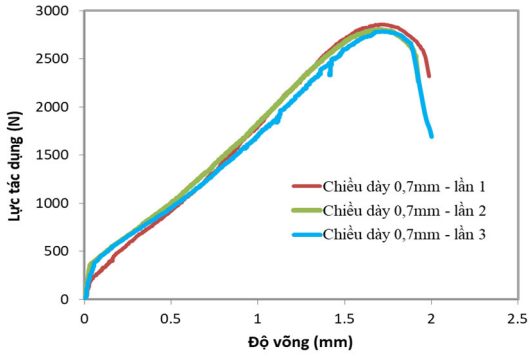
Kết quả đường cong lực tác dụng - độ võng cho các mẫu thí nghiệm có chiều dày khác nhau được thể hiện trên hình 8. Để đảm bảo độ tin cậy của kết quả thí nghiệm, với mỗi chiều dày thí nghiệm được tiến hành lặp lại ít nhất 3 lần để thu được kết quả trùng lặp. Trong các thí nghiệm với mỗi chiều dày, bộ đồ gá có kích thước như nhau, chỉ thay đổi chiều dày của mẫu thí nghiệm. Các kết quả thu được ở cho mỗi trường hợp chiều dày ở các lần thí nghiệm cho kết quả lặp lại. Do đó, độ tin cậy của kết quả thí nghiệm được đảm bảo. Ngoài ra, các chiều dày khác nhau đều có dạng đường cong điển hình của thí nghiệm dập mẫu nhỏ với 5 giai đoạn biến dạng như phân tích trên.



a) Chiều dày 0,4mm



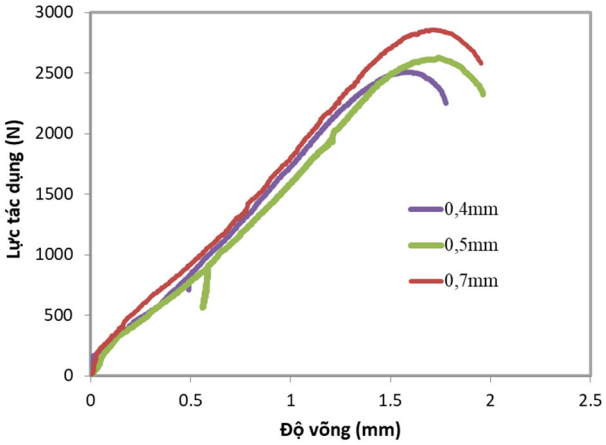
b) Chiều dày 0,5mm



c) Chiều dày 0,7mm

Hình 8. Đường cong lực tác dụng - độ võng cho các trường hợp chiều dày mẫu thí nghiệm khảo sát

Từ kết quả đường cong lực tác dụng - độ võng thu được cho các trường hợp chiều dày mẫu thí nghiệm khảo sát, tiến hành so sánh kết quả ở các chiều dày thể hiện trên hình 9. Từ hình 9 có thể thấy chiều dày mẫu thí nghiệm càng tăng, giá trị lực cực đại F_m và độ võng tại điểm lực cực đại d_m càng tăng.



Hình 9. Đường cong lực tác dụng - độ võng cho các mẫu thí nghiệm có chiều dày khác nhau

Từ kết quả thu được từ đường cong lực tác dụng - độ võng, các giá trị lực tới hạn F_y tính được trong bảng 1.

Bảng 1. Giá trị lực tới hạn ở các chiều dày khác nhau

t_o (mm)	F_y (N)
0,4	108
0,5	111
0,7	158

Từ kết quả thu được trong bảng 1, chỉ tiêu giới hạn chảy được tính toán. Theo Garcia và cộng sự [5], hệ số trong công thức (1) được chọn là 0,442 cho α và 0 cho β. Kết quả giới hạn chảy được tính theo thí nghiệm dập mẫu nhỏ được thể hiện trong bảng 2.

Bảng 2. Kết quả so sánh giới hạn chảy thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ và thí nghiệm kéo

t_o (mm)	σ_y (MPa) (tính theo thí nghiệm dập mẫu nhỏ)	σ_y (MPa) (tính theo thí nghiệm kéo [14])	Sai khác σ_y (MPa) từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ so với từ thí nghiệm kéo
0,4	298,35	205	45,5%
0,5	196,25	205	4,2%
0,7	142,52	205	35,5%

Từ kết quả bảng 2 cho thấy, giới hạn chảy tính theo thí nghiệm dập mẫu nhỏ phụ thuộc nhiều vào kích thước mẫu thí nghiệm. Trường hợp chiều dày mẫu thí nghiệm là 0,5mm cho kết quả rất gần với kết quả giới hạn chảy từ

thí nghiệm kéo đã được công bố. Trong khi đó, kết quả cho mẫu dày 0,4mm và 0,7mm có sự sai khác lớn. Đáng chú ý, trong nghiên cứu này, kích thước của khuôn trên, khuôn dưới và đường kính bi thép, chày là như nhau và thiết kế trên cơ sở căn cứ vào các kích thước của bộ đồ gá thường dùng cho mẫu có kích thước 0,5mm. Như vậy, kết quả từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ ảnh hưởng rất lớn vào tỉ lệ giữa kích thước mẫu thí nghiệm và kích thước của đồ gá. Với mẫu thí nghiệm dày 0,4mm và 0,7mm, cần thiết phải thiết kế bộ đồ gá mới với kích thước tương quan hợp lý cho hai loại mẫu chiều dày này.

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, thí nghiệm dập mẫu nhỏ được thực hiện trên máy thử kéo truyền thống cho các mẫu thử có chiều dày khác nhau làm từ vật liệu thép không gỉ họ austenite SUS304. Kết quả thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ rất tương đồng với kết quả công bố trước đó cho thấy độ tin cậy của hệ thống thí nghiệm được thiết lập. Chỉ tiêu giới hạn chảy của vật liệu được tính toán từ đường cong quan hệ lực tác dụng - độ võng. Từ kết quả tính toán cho thấy giới hạn chảy tính theo thí nghiệm dập mẫu nhỏ phụ thuộc nhiều vào kích thước mẫu thí nghiệm. Trường hợp chiều dày mẫu thí nghiệm là 0,5mm cho kết quả rất gần với kết quả giới hạn chảy từ thí nghiệm kéo đã được công bố. Trong khi đó, kết quả cho mẫu dày 0,4mm và 0,7mm có sự sai khác lớn do kết quả từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ ảnh hưởng rất lớn vào tỉ lệ giữa kích thước mẫu thí nghiệm và kích thước của đồ gá. Với mẫu thí nghiệm dày 0,4mm và 0,7mm, cần thiết phải thiết kế bộ đồ gá mới với kích thước tương quan hợp lý cho hai loại mẫu chiều dày này.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Manahan M. P., Argon A. S., Harling O. K., "The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties," *Journal of Nuclear Materials*, 104, 1545-1550, 1981.

[2]. Cuesta I. I., Alegre J. M., Lorenzo M., "Influence of strain state in mechanical behaviour of aluminium alloys using the small punch test," *Materials & Design*, 54, 291-294, 2014.

[3]. Alegre J. M, Cuesta I. I., Barbachano H. L., "Determination of the fracture properties of metallic materials using pre-cracked small punch tests," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 38(1), 104-112, 2015.

[4]. Doan Y. T, Pham H. T, Le Q. K, Nguyen T. H. N, Nghiem V. V., "Experimental evaluation of fracture properties of aluminum alloy 1050-H14 by small punch test," *Strength, Fracture and Complexity*, 16 (1), 61-72, 2023.

[5]. García T. E., Rodríguez C., Belzunce F. J., Suárez C., "Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test," *Journal of Alloys and Compounds,* 582, 708-717, 2014.

[6]. Aishwary V. P., Karthik V., Abdul R. S, Ashish K., Divakar R., "Estimation of UTS from small punch test using an improved method," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 200, 104818, 2022.

[7]. Moreno M. F., "Effects of thickness specimen on the evaluation of relationship between tensile properties and small punch testing parameters in metallic materials," *Materials and Design*, 157, 512-522, 2018.

[8]. Lancaster R. J., Jeffs S. P., Haigh B. J., Barnard N. C., "Derivation of material properties using small punch and shear punch test methods," *Materials & Design*, 215, 110473, 2022.

[9]. Wang Z. X, Shi H. J., Lu J., Shi P., Ma C. F., "Small punch testing for assessing the fracture properties of the reactor vessel steel with different thicknesses," *Nuclear Engineering and Design*, 238, 3186-3193, 2018.

[10]. Li C., Shi S., Zhang J., Yang S., Li Q., "Investigation on the tensile properties of Inconel 625 using small punch test," *Metals*, 14(4), 411, 2024.

[11]. Abendroth M., Kuna M., "Determination of deformation and failure properties of ductile materials by means of the small punch test and neural networks," *Computational Materials Science,* 28, 633-644, 2003.

[12]. Mao X., Takahashi H., "Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk small punch tests," *Journal of Nuclear Materials*, 150, 42-52, 1987.

[13]. Pham H. T., Iwamoto T., "An evaluation of fracture properties of type-304 austenitic stainless steel at high deformation rate using the small punch test," *International Journal of Mechanical Sciences*, 144, 249-261, 2018.

[14]. Mitsuhiro O., Hironobu F., Hiroaki O, Tetsuro S., "Strain-induced martensite formation in austenitic stainless steel," *Journal of Materials Science*, 48, 6157-6166, 2013.

AUTHORS INFORMATION

Pham Thi Hang, Le Quang Khai

Thuyloi University, Vietnam