

THIẾT KẾ, CHẾ TẠO BỘ ĐỒ GÁ THÍ NGHIỆM DẬP MẪU NHỎ VÀ THỬ NGHIỆM CHO MẪU THÉP KHÔNG GỈ

DESIGN AND MANUFACTURING OF JIG FOR SMALL PUNCH TESTING AND ITS APPLICATION FOR STAINLESS STEEL

Phạm Thị Hằng*, Nghiêm Văn Vinh

Trường Đại học Thủy Lợi¹

*Tác giả liên hệ: pthang@tlu.edu.vn

(Nhận bài: 24/5/2022; Chấp nhận đăng: 25/8/2022)

Tóm tắt - Thí nghiệm dập mẫu nhỏ sử dụng mẫu có kích thước rất nhỏ đã được chứng minh là một phương pháp thí nghiệm đáng tin cậy. Kết quả thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ có mối quan hệ với độ bền của vật liệu thu được từ thí nghiệm kéo và có thể dùng để nghiên cứu tính chất phá hủy của vật liệu. Mặc dù, thí nghiệm này được sử dụng phổ biến trên thế giới, chưa có nghiên cứu nào thực hiện ở Việt Nam. Trong khi đó, thí nghiệm có thể thực hiện trên thiết bị thử kéo nén. Trong nghiên cứu này, bộ đồ gá dùng cho thí nghiệm dập mẫu nhỏ được thiết kế và chế tạo. Bộ đồ gá chế tạo có thể sử dụng được trên thiết bị kéo nén để thí nghiệm về tính chất cơ học của vật liệu dưới biến dạng dập mẫu nhỏ. Các kết quả thu được từ thí nghiệm cho thép không gỉ 304 và 201 hoàn toàn đáng tin cậy và sử dụng làm tiền đề cho các nghiên cứu tiếp theo.

Từ khóa - Cơ học vật liệu; cơ học phá hủy; thép không gỉ; thí nghiệm dập mẫu nhỏ; thiết bị kéo nén.

1. Đặt vấn đề

Thông thường, các đặc trưng cơ học của vật liệu được xác định bằng thí nghiệm kéo, nén, uốn ba điểm, thí nghiệm Charpy... là các phương pháp truyền thống, phổ biến. Từ những năm 1980, các nhà khoa học Mỹ và Nhật Bản đã bắt đầu tiên hành phương pháp thí nghiệm mới ngoài các phương pháp truyền thống đó, gọi là thí nghiệm dập mẫu nhỏ cho những vật liệu phóng xạ [1]. Thí nghiệm dập mẫu nhỏ sử dụng chày, bộ khuôn và mẫu thí nghiệm có kích thước rất nhỏ [2]. Mẫu dùng trong thí nghiệm chỉ có đường kính trong khoảng 3÷10 mm và độ dày từ 0,1÷0,7 mm, trong đó phổ biến sử dụng mẫu thí nghiệm có đường kính 10 mm và chiều dày 0,5 mm. Lực tác dụng xuống bề mặt mẫu thí nghiệm thông qua đầu chày làm cho mẫu bị uốn cong xuống. Do đó, thí nghiệm dập mẫu nhỏ được coi là một dạng đặc biệt của biến dạng uốn. Ưu điểm lớn nhất của thí nghiệm dập mẫu nhỏ là phương pháp thí nghiệm rất đơn giản, đáng tin cậy, thực hiện trên mẫu nhỏ nên chi phí rất thấp so với những phương pháp thí nghiệm cơ học truyền thống khác [3, 4].

Ngoài ra, nhiều nghiên cứu đã chứng minh, kết quả thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ có mối quan hệ với độ bền của vật liệu thu được từ thí nghiệm kéo đúng tâm truyền thống [5-7]. Trong nghiên cứu của Ming và cộng sự [5], ứng suất tới hạn và lực lớn nhất đã được đo đạc từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ và chứng minh có quan hệ với ứng suất tới hạn và độ bền thu được từ biến dạng kéo truyền thống. Đặc biệt, mẫu thí nghiệm sau khi dập mẫu nhỏ có thể bị phá hủy nên thí nghiệm này còn được dùng để nghiên

Abstract - It is proven that the small punch test using relatively small specimen is a reliable testing method to investigate the mechanical properties of materials. The results obtained from small punch test can be related with the results from tensile test and it can be used to study the fracture properties of materials. Although, this testing method is widely applied in the world, no studies have been carried out in Vietnam. Meanwhile, this test can be carried out on the tensile test machine. In this study, a jig for the small punch test is designed and manufactured. The small punch test using manufactured jig is setup on the tensile test device. The results obtained from the experiment for type-304 and 201 stainless steel can be reliable and they can be used as a premise for further studies.

Key words - Mechanical properties; fracture mechanical properties; stainless steel; small punch test; tensile testing machine.

cứu độ dai phá hủy thông qua việc tính toán thông số độ biến dạng phá hủy tương đương [8].

Thí nghiệm dập mẫu nhỏ không những được áp dụng trong trường hợp tải trọng tĩnh để nghiên cứu tính chất cơ học tĩnh của vật liệu mà còn được phát triển trên các mô hình thí nghiệm tải trọng động. Shindo và cộng sự [9] đã nghiên cứu tính chất phá hủy của vật liệu dưới biến dạng dập mẫu nhỏ bằng phương pháp phân tử hữu hạn. Abendroth và Kuna [10] nghiên cứu biến dạng và tính chất phá hủy của một số vật liệu dẻo trong đó có thép không gỉ bằng mô phỏng phân tử hữu hạn cho thí nghiệm dập mẫu nhỏ. Ling và cộng sự [2] đã xem xét sự phá hủy trong mẫu thép không gỉ 304 bằng thí nghiệm dập mẫu nhỏ trong thực nghiệm và mô phỏng. Trong khi đó, ảnh hưởng của hệ số ma sát, chiều dày vật liệu và tốc độ dịch chuyển của chày và kích thước của khuôn trong biến dạng dập mẫu nhỏ cho thép không gỉ SUS304 được nghiên cứu bởi Yang và cộng sự [11]. Vừa qua, Garcia và cộng sự [12] đã thực hiện nghiên cứu mô phỏng máy tính biến dạng dập mẫu nhỏ để đánh giá tính chất cơ học của một số loại vật liệu kim loại và cho thấy độ dai phá hủy của thép không gỉ có thể được đánh giá từ độ biến dạng phá hủy thu được từ biến dạng dập mẫu nhỏ. Trong nghiên cứu của Phạm Thị Hằng và cộng sự [13], các tác giả đã mô phỏng bằng phương pháp phân tử hữu hạn cho thí nghiệm dập mẫu nhỏ để đánh giá tính chất phá hủy của thép không gỉ. Mô hình thí nghiệm dập mẫu nhỏ ở tốc độ biến dạng rất cao được thiết lập và phát triển bởi Cao và cộng sự [14].

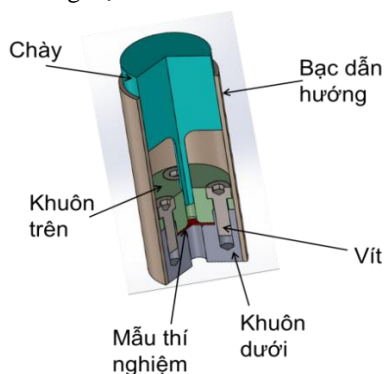
¹ Thuyloi University (Pham Thi Hang, Nghiem Van Vinh)

Mặc dù gần đây, thí nghiệm dập mẫu nhỏ được sử dụng khá phổ biến như một phương pháp thí nghiệm cơ học vật liệu, chưa có nghiên cứu nào về loại thí nghiệm này ở Việt Nam. Trong khi đó, thí nghiệm dập mẫu nhỏ hoàn toàn có thể thực hiện trên thiết bị thử kéo nén vật liệu thông thường. Chính vì vậy, để phát triển nghiên cứu về cơ học vật liệu, cơ học phá hủy, cần thiết phải thiết kế và chế tạo đồ gá chuyên dụng dùng trong thí nghiệm dập mẫu nhỏ trên máy kéo nén. Trong nghiên cứu này, bộ đồ gá chuyên dụng dùng cho thí nghiệm dập mẫu nhỏ được thiết kế và chế tạo, sau đó lắp đặt thử nghiệm trên máy kéo nén. Độ tin cậy của mô hình thí nghiệm được kiểm nghiệm qua kết quả thí nghiệm dập mẫu nhỏ cho thép không gỉ 304 và so sánh với kết quả đã được công bố trong bài báo xuất bản. Sau đó, mô hình thử nghiệm cho thép không gỉ 201 ở tốc độ biến dạng rất thấp.

2. Mô hình thí nghiệm và phương pháp đánh giá

2.1. Mô hình thí nghiệm dập mẫu nhỏ

Hình 1 thể hiện sơ đồ mô hình thí nghiệm dập mẫu nhỏ. Mô hình thí nghiệm bao gồm có khuôn trên và khuôn dưới được định vị và bắt chặt với nhau bằng các vít. Một mẫu thử nhỏ dạng đĩa được đặt ở chính giữa khuôn dưới. Trong quá trình thí nghiệm, mẫu thử chịu lực tác dụng thông qua chày. Đầu chày có thể dịch chuyển dễ dàng trong lỗ của khuôn trên và tác động lực vào tâm của mẫu thí nghiệm. Kích thước lỗ của khuôn trên được thiết kế để đảm bảo chày dịch chuyển được dễ dàng. Kích thước lỗ của khuôn dưới cần đảm bảo điều kiện lớn hơn tổng kích thước của chày và hai lần kích thước chiều dày của mẫu thử. Như vậy, đồ gá của thí nghiệm dập mẫu nhỏ bao gồm các chi tiết chính là khuôn dưới, khuôn trên, chày và bạc dẫn hướng để đảm bảo bộ khuôn làm việc ổn định trong quá trình thí nghiệm.



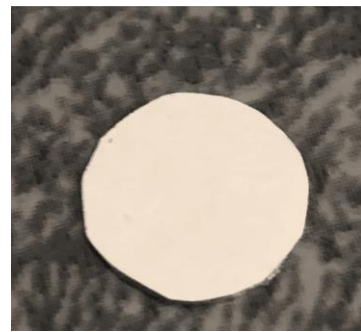
Hình 1. Mô hình thí nghiệm dập mẫu nhỏ

2.2. Mẫu thí nghiệm dập mẫu nhỏ

Chọn mẫu thí nghiệm như Hình 2 có hình dạng đĩa, đường kính 10 mm và chiều dày 0,5 mm. Có hai loại vật liệu được thử nghiệm. Với mẫu thép không gỉ họ austenite mác 304, mẫu thí nghiệm được nung ở 1050°C sau đó tôi trong nước để có điều kiện thí nghiệm giống với nghiên cứu của Phạm và cộng sự [15]. Ngoài ra, mẫu thí nghiệm bằng thép không gỉ 201 được thử nghiệm trên mô hình thí nghiệm. Thép không gỉ 201 có tổ chức tế vi được thể hiện trên Hình 3. Đây là loại thép không gỉ họ austenite nên có thể thấy rõ tổ chức pha austenite trong hình ảnh tổ chức tế vi.

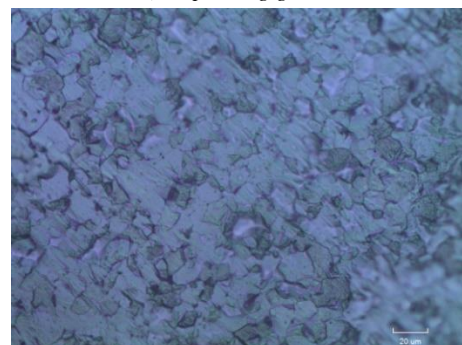


a)



b)

Hình 2. Mẫu thí nghiệm a) thép không gỉ 304 sau nhiệt luyện và b) thép không gỉ 201



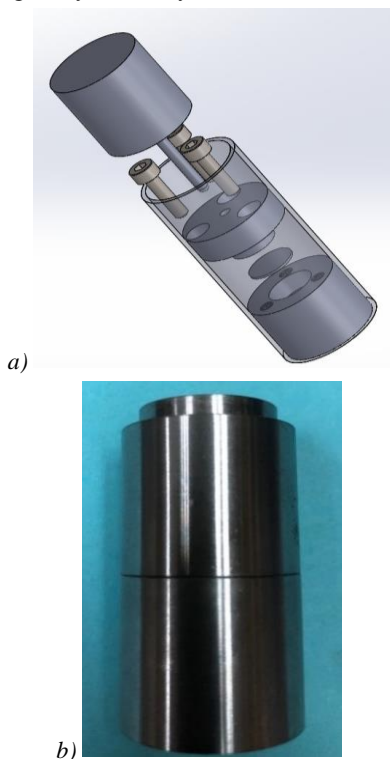
Hình 3. Tổ chức tế vi của thép không gỉ 201

2.3. Thiết lập thí nghiệm trên máy kéo nén

Kích thước đường kính đầu chày lựa chọn là 2,4 mm và chọn phương án bo tròn đầu với bán kính 1,2 mm. Lỗ của khuôn dưới được thiết kế là 4 mm. Bộ khuôn dùng trong thí nghiệm dập mẫu nhỏ được thể hiện trên Hình 4.

Yêu cầu kỹ thuật đối với đồ gá thí nghiệm dập mẫu nhỏ bao gồm mẫu thí nghiệm cần được kẹp chặt giữa khuôn trên và khuôn dưới để đảm bảo mẫu không dịch chuyển trong quá trình đầu chày tác dụng lực xuống bề mặt mẫu thí nghiệm. Ngoài ra, đầu chày đủ bền, không bị biến dạng, cong khi tác dụng lực. Đồng thời, độ cứng bề mặt chày và khuôn cần thiết phải cao hơn vật liệu mẫu thí nghiệm để đảm bảo đồ gá không bị biến dạng trong quá trình thí nghiệm. Chày có thể chuyển động tịnh tiến dễ dàng trong lỗ của khuôn trên, khuôn dưới nhưng vẫn đảm bảo đồng tâm giữa chi tiết chày và lỗ của khuôn. Do đó, cần yêu cầu kỹ thuật về độ nhám bề mặt đầu chày và vị trí tương quan giữa bề mặt đầu tác dụng lực và đường tâm của chày. Đầu tác dụng lực của chày phải đảm bảo độ vuông góc với đường tâm chày để đảm bảo lực tác dụng đúng tâm của

chày. Bạc dẫn hướng được lắp ghép với bộ khuôn trên, khuôn dưới và chày nên cần phải chọn lắp ghép lỏng. Để đạt được các yêu cầu về cơ tính, vật liệu chế tạo đồ gá là thép hợp kim 9XC tương đương 90CrSi, là loại thép hợp kim thấp thường được dùng để chế tạo dụng cụ cắt, khuôn dập. Bộ đồ gá thí nghiệm được tôi ở nhiệt độ 870°C và ram thấp. Các yêu cầu về độ chính xác của thông số hình học được kiểm tra sau khi chế tạo. Kết quả đồ gá chế tạo được thể hiện trên Hình 4b và thử nghiệm cho thấy, đồ gá hoàn toàn đáp ứng các yêu cầu kỹ thuật đề ra.

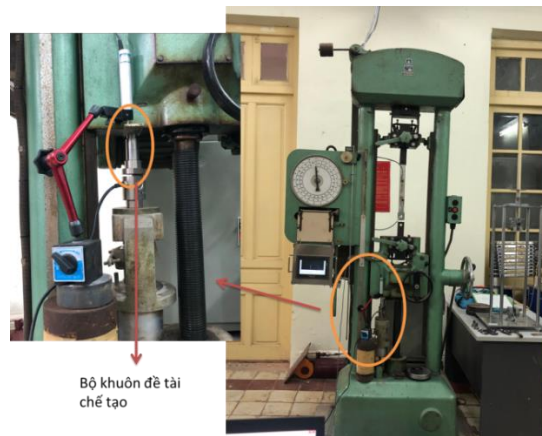


Hình 4. a) Kết quả thiết kế và b) chế tạo bộ đồ gá dùng trong thí nghiệm dập mẫu nhỏ

Mẫu thí nghiệm được gá vào bộ khuôn đã chế tạo theo quy trình như Hình 5. Mẫu thí nghiệm mỏng, dạng đĩa chế tạo theo kích thước quy định được đặt trong lỗ của khuôn dưới. Sau đó, khuôn trên và khuôn dưới được bắt chặt với nhau nhờ có 3 vít. Đầu chày nhỏ được lắp ghép vào trong lỗ của khuôn trên, sau đó lắp bạc dẫn hướng vào phía ngoài khuôn và chày.



Hình 5. Sơ đồ gá đặt mẫu thí nghiệm và lắp đặt khuôn dập mẫu nhỏ



Hình 6. Sơ đồ gá đặt trên máy kéo nén

Sơ đồ gá đặt trên máy kéo nén được thể hiện trên Hình 6. Đầu đo lực được đặt ở phía dưới bộ khuôn thí nghiệm. Để đo được chuyển vị của đầu chày, một thanh ngang được sử dụng. Trong đó, một đầu thanh ngang tiếp xúc với đầu chày, đầu còn lại tiếp xúc với đầu đo chuyển vị. Đầu đo chuyển vị được gá trên đồ gá vạn năng như trong Hình 6. Như vậy, kết quả ở đầu đo chuyển vị là chuyển vị của đầu chày. Do lực từ cảm biến lực load cell và giá trị chuyển vị của thiết bị kéo nén 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 nên để tăng độ chính xác của kết quả thí nghiệm cần dùng đầu đo chuyển vị và cảm biến lực ngoài. Kết quả lực tác dụng và chuyển vị theo thời gian được xử lý qua bộ xử lý số liệu Multi Recorder TMR-211.

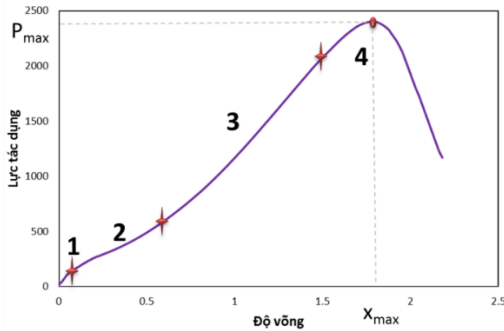
2.4. Đánh giá kết quả thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ

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 7 thể hiện đường cong mối quan hệ giữa lực tác dụng - độ võng điển hình thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ trong bài báo đã công bố của tác giả [8]. Lực tác dụng và độ võng đo được từ các thiết bị đo trong quá trình thí nghiệm. Từ Hình 7 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.

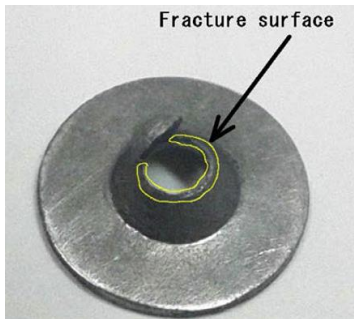
Theo Garcia và cộng sự [12], đường cong này được chia thành 4 vùng tương ứng với 4 giai đoạn biến dạng của vật liệu. Vùng 1 là vùng vật liệu chịu biến dạng uốn đàn hồi. Vùng 2 là vùng chuyển tiếp từ vùng biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo. Tiếp theo, khi tăng lực tác dụng, vật liệu sẽ trải qua giai đoạn 3 là giai đoạn biến dạng dẻo. Đây là giai đoạn dài nhất trong quá trình vật liệu bị biến dạng khi thí nghiệm dập mẫu nhỏ. Sau đó, vật liệu sẽ trải qua vùng 4, lực tác dụng sẽ đạt giá trị cực đại và vết nứt sẽ bắt đầu xuất hiện và dẫn tới phá hủy mẫu thí nghiệm. Giá trị lực cực đại P_{max} và độ võng tại điểm cực đại x_{max} là hai thông số quan trọng nhất thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ. Nhiều nghiên cứu đã chỉ ra, giá trị độ võng tại điểm cực đại có thể sử dụng để tính toán độ biến dạng phá hủy tương đương của vật liệu.

Hình 8 thể hiện hình ảnh mẫu thử sau khi thí nghiệm. Ban đầu, mẫu thử có dạng đĩa, chiều dày rất nhỏ. Sau khi thí nghiệm, phần đầu chày tác dụng xuống bề mặt mẫu thử làm

mẫu bị biến dạng vùng tiếp xúc với đầu chày và xung quanh đó, phần được kẹp giữa hai khuôn trên và khuôn dưới không bị biến dạng. Kết quả là, sau thí nghiệm sẽ thu được mẫu biến dạng như hình chiếc mũ. Trong nhiều trường hợp, mẫu thí nghiệm bị xuất hiện vết nứt dẫn tới phá hủy.



Hình 7. Quan hệ lực tác dụng-độ võng thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ [8]

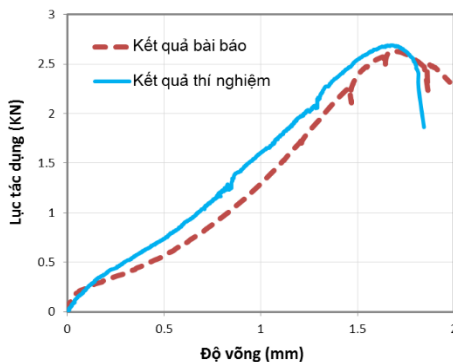


Hình 8. Hình ảnh mẫu thử sau khi thí nghiệm dập mẫu nhỏ [8]

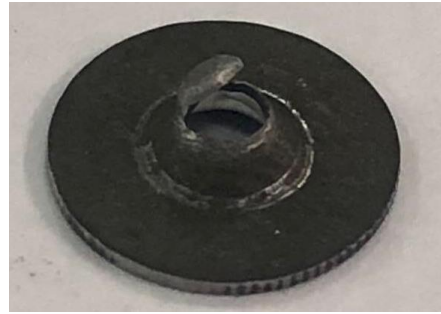
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kiểm nghiệm độ tin cậy của mô hình thí nghiệm

Thí nghiệm dập mẫu nhỏ được thực hiện cho thép không gỉ 304 sau khi tôi. Kết quả thí nghiệm được so sánh với kết quả bài báo đã được công bố của tác giả [15] ở tốc độ biến dạng là 0,0033 mm/s trên Hình 9. Có thể thấy, dạng đường cong lực tác dụng – độ võng thu được từ mô hình thí nghiệm có dạng gần với đường cong điển hình của thí nghiệm dập mẫu nhỏ như Hình 7. Ở cùng điều kiện tốc độ biến dạng, giá trị lực cực đại và độ võng tại điểm cực đại cũng rất tương đồng với giá trị trong các bài báo công bố. Ngoài ra, Hình 10 cho thấy, mẫu thí nghiệm bị phá hủy với biên dạng gần giống như Hình 8 của nghiên cứu trước đó. Như vậy, kết quả thu được từ mô hình thí nghiệm là đáng tin cậy.



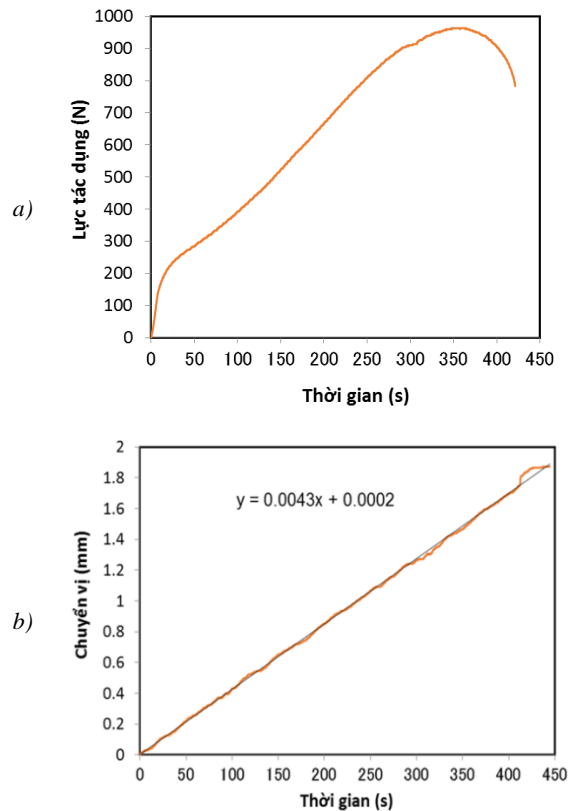
Hình 9. Kết quả thí nghiệm thép không gỉ 304



Hình 10. Hình ảnh mẫu thép không gỉ 304 sau thí nghiệm

3.2. Kết quả thí nghiệm dập mẫu nhỏ trên máy kéo nén cho thép không gỉ SUS201

Kết quả thí nghiệm thu được cho thép không gỉ 201 được thể hiện trên Hình 11 gồm có a) lực tác dụng theo thời gian và b) chuyển vị theo thời gian. Từ kết quả thu được cho thấy, chuyển vị biến thiên tuyến tính theo thời gian, điều này có nghĩa là tốc độ chuyển vị gần như không đổi và được tính khoảng 0,0043 mm/s.

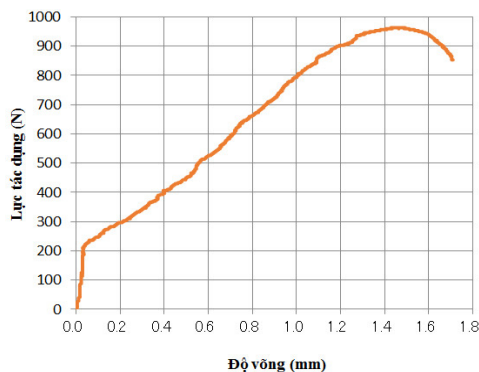


Hình 11. Kết quả thí nghiệm thép không gỉ 201

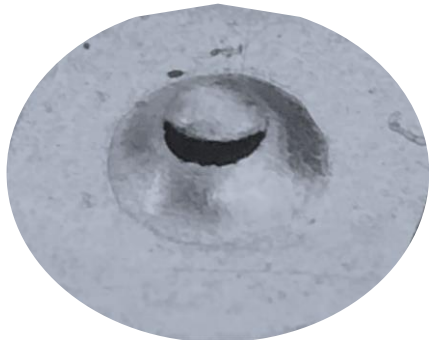
Trong quá trình tác dụng lực, sự dịch chuyển của chày làm cho mẫu thí nghiệm bị biến dạng võng xuống. Do có các vít kẹp chặt mẫu thí nghiệm giữa khuôn trên và khuôn dưới nên chuyển vị của đầu chày được coi là độ võng của mẫu thí nghiệm. Từ các kết quả lực tác dụng và chuyển vị với sự biến đổi theo cùng biến thời gian trên Hình 11 thiết lập được quan hệ giữa lực tác dụng - độ võng và trình bày trên Hình 12. Kết quả cho thấy, dạng đường cong lực tác dụng-độ võng thu được từ thí nghiệm có dạng gần với dạng đường cong điển hình của thí nghiệm dập mẫu nhỏ như Hình 7.

Hình ảnh mẫu sau khi thí nghiệm được thể hiện trên Hình 13. Kết quả cho thấy mẫu bị biến dạng trong khoảng tác dụng

của chày, mẫu bị lõm xuống và xuất hiện vết nứt, phá hủy ở vùng giữa biên của mẫu. Kết quả này rất tương đồng với kết quả điển hình thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ. Từ những kết quả thu được có thể kết luận các kết quả thu được là hoàn toàn đáng tin cậy và mô hình thí nghiệm dập mẫu nhỏ đã thiết kế và chế tạo được thử nghiệm thành công.



Hình 12. Quan hệ “lực tác dụng – độ võng” thu được từ thí nghiệm



Hình 13. Hình ảnh mẫu sau khi thí nghiệm

4. Kết luận

Qua kết quả thực hiện nghiên cứu có thể đưa ra một số kết luận sau:

Đã thiết kế và chế tạo bộ khuôn dùng cho thí nghiệm dập mẫu hoàn chỉnh đạt các yêu cầu kỹ thuật đề ra.

Bộ đồ gá chế tạo hoàn toàn có thể sử dụng được trên thiết bị kéo nén thông thường để khảo sát, nghiên cứu tính chất cơ học của vật liệu dưới biến dạng dập mẫu nhỏ. Các kết quả thu được từ thí nghiệm dập mẫu nhỏ cho thép không gỉ 201 hoàn toàn đáng tin cậy và sử dụng làm tiền đề cho các nghiên cứu tiếp theo.

Đây là mô hình thí nghiệm phổ biến trên thế giới nhưng lần đầu tiên được ứng dụng triển khai ở Việt Nam, là cơ sở để thực hiện các nghiên cứu tiếp theo về thí nghiệm biến dạng dập mẫu nhỏ cho vật liệu kim loại.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Mao X., Shoji T., Takahashi H., “Characterization of fracture behavior in small punch test by combined recrystallization-etch method and rigid plastic analysis”, *Journal of Testing and Evaluation*, vol.15, 1987, pp. 30-37.
- [2] Ling X., Zheng Y., You Y., Chen Y., “Creep damage in small punch creeps specimens of type 304 stainless steel”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol.84, 2002, pp. 304-309.
- [3] Fleury E., H J.S., “Small punch tests to estimate the mechanical properties of steels for steam power plant: I. Mechanical strength”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol.75, 1998, pp. 699-706.
- [4] Rodríguez-Martínez J. A., Rusinek A., Pesci R., Zaera R., “Experimental and numerical analysis of the martensitic transformation in AISI304 steel sheets subjected to perforation by conical and hemispherical projectiles”, *International Journal of Solids and Structures*, vol. 2, 2013, pp. 339-351.
- [5] Ming, S., Kaishu G., Wen Q., Jerzy A.S., The J-integral C., “Size effect criteria on the small punch test for AISI 316L austenitic stainless steel”, *Materials Science & Engineering A*, vol. 606, 2014, pp. 346-353.
- [6] Hähner P., Soyarslan C., Cakan B.G., Bargmann S., “Determining tensile yield stresses from Small Punch tests: A numerical-based scheme”, *Materials & Design*, vol. 182, 2019, pp. 107974.
- [7] Lucon E., Benzing J.T., Derimow N., Hrabec N., “Small punch testing to estimate the tensile and fracture properties of additively manufactured Ti-6Al-4V”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30, 2021, pp. 1-37.
- [8] Pham H.T. and 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*, vol. 144, 2018, pp. 249-261.
- [9] Shindo Y., Horiguchi K., Sugo T., and Mano Y., “Finite element analysis and small punch testing for determining the cryogenic fracture toughness of austenitic stainless welds”, *Journal of Testing & Evaluation*, vol.28, 2000, pp.431-437.
- [10] Abendroth M., and Kuna M., “Determination of deformation and failure properties of ductile materials by means of the small punch test and neural networks”, *Computational Materials Science*, vol.28, pp. 2003, 633-644.
- [11] Yang S., Zhou J., Ling X., and Yang Z., “Effect of geometric factors and processing parameters on plastic damage of SUS304 stainless steel by small punch test”, *Material and Design*, vol.41, 2012, pp. 447-452.
- [12] García T.E., Rodríguez C., Belzunce F.J., and Suárez C., “Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol.582, 2014, pp. 708-717.
- [13] Phạm Thị Hằng, Yoshida Shiguma, Iwamoto Takeshi, “Mô hình hóa và mô phỏng thí nghiệm biến dạng dập mẫu nhỏ”, *Tạp chí cơ khí Việt Nam*, vol.8, 2021, pp. 41-44.
- [14] Cao B., Yoshida S., Iwamoto T., Pham H.T., “Development of impact small punch test for investigating energy absorption”, *International Journal of Mechanical Sciences*, vol.208, 2021, pp. 106675.
- [15] Pham H.T. and Iwamoto T., “A computational investigation on small punch test for evaluating fracture toughness of TRIP steel at higher deformation rate”, *Key Engineering Materials*, vol. 725, 2017, pp. 66-71.