

NGHIÊN CỨU SỰ DỊCH CHUYỂN KIM LOẠI KHI HÀN GMAW DƯỚI ẢNH HƯỞNG CỦA KHÍ BẢO VỆ

STUDY ON METAL TRANSFER IN GMAW UNDER THE INFLUENCE OF SHIELDING GAS

Trịnh Quang Ngọc^{1,*}, Bùi Văn Hạnh¹, Phạm Văn Hòa², Shinichi Tashiro³, Manabu Tanaka³

¹Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

²Phòng Công nghệ ứng dụng, Khí công nghiệp Messer tại Việt Nam

³Viện Nghiên cứu Công nghệ Hàn và Ghép nối, Đại học Osaka, Nhật Bản

*Email: ngoc.trinhquang@hust.edu.vn

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của khí bảo vệ đến sự dịch chuyển kim loại trong quá trình hàn hồ quang với điện cực nóng chảy (GMAW) sử dụng dây hàn đặc thông thường. Quá trình hàn được tiến hành với ba loại khí bảo vệ là khí Ar tinh khiết, khí trộn Ar + 20% CO₂ và 100% CO₂ tại ba mức dòng điện hàn gồm 220, 250, và 280 A. Khi sử dụng khí bảo vệ Ar tinh khiết, dạng dịch chuyển dần từ dạng giọt nhỏ sang dạng dịch chuyển phun tia khi dòng điện hàn tăng dần. Trong khi đó, khi hàm lượng CO₂ trong khí bảo vệ tăng lên mức 20%, dạng dịch chuyển kim loại thay đổi từ dạng giọt lớn sang dạng giọt nhỏ khi dòng hàn tăng từ 220 A tới 280 A. Đối với khí bảo vệ 100% CO₂, dạng dịch chuyển kim loại là giọt lớn ở cả ba mức dòng điện được sử dụng. Các quan sát thực nghiệm giúp làm rõ sự khác biệt cơ bản về cơ chế dịch chuyển kim loại dưới ảnh hưởng của khí bảo vệ trong quá trình hàn.

Từ khóa: Dây hàn đặc; Khí bảo vệ; Dịch chuyển giọt kim loại; Hàn hồ quang.

ABSTRACT

This paper investigates the effect of shielding gas on metal transfer behavior in gas metal arc welding (GMAW) using a conventional solid wire electrode. Welding experiments were carried out with three shielding gases, including pure Ar, an Ar + 20% CO₂ mixture, and 100% CO₂, at three welding currents of 220, 250, and 280 A. Under pure Ar shielding, the transfer mode gradually changed from projected droplet transfer to streaming transfer as the welding current increased. When the CO₂ content in the shielding gas increased to 20%, the metal transfer mode evolved from globular transfer to projected droplet transfer as the current increased from 220 A to 280 A. In contrast, under 100% CO₂ shielding, globular transfer was observed at all three current levels. These experimental observations clarify the fundamental differences in the mechanisms governing metal transfer as influenced by the shielding gas during GMAW.

Keywords: Solid wire; Shielding gas; Metal transfer; Arc welding.

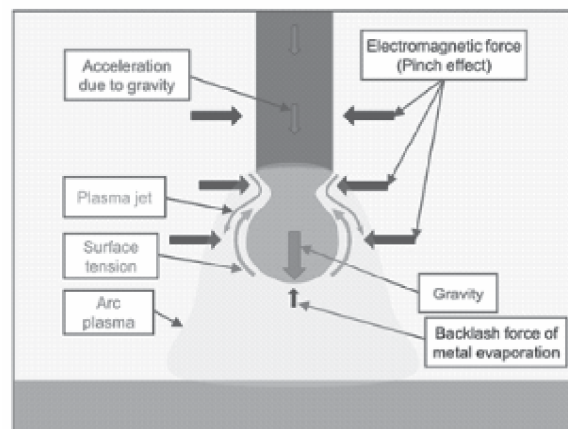
1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Công nghệ hàn hồ quang bằng điện cực nóng chảy trong môi trường khí bảo vệ (Gas Metal Arc Welding – GMAW) là một quá trình hàn phổ biến, có ứng dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp như công nghiệp sản xuất ô tô, đóng tàu, hay xây dựng kết cấu thép nhờ ưu điểm về năng suất và chất lượng mối hàn cao. Khi hàn GMAW, một trong những yếu tố quyết định chất lượng mối hàn, hiệu quả, năng suất của quá trình hàn là cơ chế dịch chuyển kim loại nóng chảy từ điện cực dây hàn xuống vùng hàn, chịu ảnh hưởng lớn bởi các thông số chế độ hàn [1].

Khi sử dụng dây hàn đặc, dạng dịch chuyển tự nhiên của giọt kim loại có thể được phân làm hai nhóm chính: dịch chuyển có tiếp xúc (Contact transfer group) và dịch chuyển bay tự do (Free-flight transfer group) [2]. Trong đó, các dạng dịch chuyển thường gặp bao gồm: ngắn mạch (Short-circuit), dạng giọt lớn (Globular transfer) và dạng phun (Spray transfer). Cơ chế hình thành nên các dạng dịch chuyển này là do sự tương tác của các lực tác động lên giọt kim loại lỏng hình thành tại đầu dây hàn gây nên. Khi xem xét sự dịch chuyển kim loại một cách tự nhiên, không có sự can thiệp từ các lực hỗ trợ bên ngoài, các lực tác động lên giọt kim loại có thể chia làm hai nhóm: nhóm các lực hỗ trợ sự ngắt giọt, bao gồm: lực điện từ (Electromagnetic force), trọng lực (Gravity), lực kéo của khí bảo vệ (Plasma jet); và nhóm các lực ngăn trở sự ngắt giọt, bao gồm: sức căng bề mặt của kim loại lỏng (Surface tension) và phản lực hồ quang bên dưới giọt kim loại (Backlash force), như được thể hiện trên Hình 1.

Trong quá trình hàn GMAW, cường độ của các lực tác động lên giọt kim loại sẽ quyết định dạng dịch chuyển của giọt kim loại đó,

và mức độ tác động của chúng chịu ảnh hưởng của các điều kiện hàn như: cường độ dòng điện, điện áp hồ quang, loại khí bảo vệ, thành phần của điện cực, và đường kính điện cực [3, 4]. Trong đó, cường độ dòng điện và loại khí bảo vệ được xem là hai thông số thiết yếu ảnh hưởng tới sự dịch chuyển kim loại, thông qua sự thay đổi cơ chế ảnh hưởng của lực điện từ và đặc tính của hồ quang tác động lên giọt kim loại lỏng [5, 6]. Để cải thiện quá trình dịch chuyển kim loại, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào nâng cao ảnh hưởng của lực điện từ thông qua sử dụng dòng hàn xung, hoặc sử dụng thêm sự hỗ trợ từ các ngoại lực như: dịch chuyển ngắn mạch có kiểm soát điển hình như công nghệ Cold Metal Transfer (CMT), Surface Tension Transfer (STT), hoặc có sự hỗ trợ của ánh sáng laser, dao động siêu âm [7-9]. Các nghiên cứu này cho thấy sự dịch chuyển kim loại trong hàn GMAW là rất quan trọng và cần được kiểm soát hiệu quả. Tuy nhiên, vấn đề này chưa được quan tâm nghiên cứu tại Việt Nam.



Hình 1. Các lực tác động tới giọt kim loại lỏng [10]

Mục tiêu của nghiên cứu này là nghiên cứu định lượng và trực quan về ảnh hưởng của các môi trường khí bảo vệ khác nhau tới dạng dịch chuyển kim loại trong quá trình hàn hồ quang GMAW. Phạm vi nghiên cứu tập trung vào loại dây hàn đặc khi hàn ở ba mức dòng

điện là 220, 250 và 280 A, ở ba môi trường khí bảo vệ khác nhau gồm khí Ar tinh khiết, khí trộn Ar + 20% CO₂ và 100% CO₂. Nghiên cứu nhằm củng cố và cung cấp dữ liệu khoa học phục vụ lựa chọn chế độ hàn và khí bảo vệ phù hợp cho quá trình hàn tại Việt Nam.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Điều kiện chung của quá trình hàn

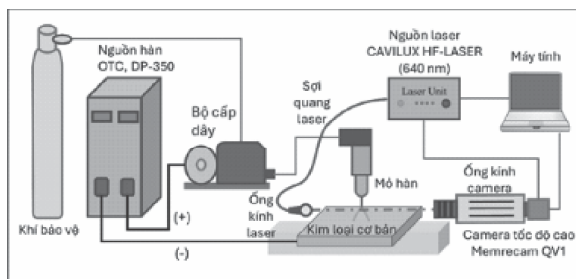
Quá trình hàn được thực hiện theo phương pháp hàn đắp mỗi hàn trên phôi thép tấm SS400 có kích thước 300 × 50 × 9 mm. Dây hàn đặc được sử dụng để nghiên cứu là dây hàn theo tiêu chuẩn JIS Z3312 YGW11, tương đương với dây hàn AWS ER70S-G, đường kính dây hàn là 1,2 mm. Thành phần hóa học của các dây hàn được trình bày trong một nghiên cứu trước đây [11].

Quá trình hàn sử dụng nguồn hàn DP-350 (OTC Daihen), dây hàn nối điện cực nghịch DCEP với dòng điện hàn được thay đổi theo ba mức: 220, 250 và 280 A. Ba môi trường khí bảo vệ được đánh giá bao gồm Ar tinh khiết, Ar + 20% CO₂ và 100% CO₂, với lưu lượng khí được điều chỉnh ổn định ở 20 L/min. Điện áp hàn được điều chỉnh phù hợp trong khoảng từ 25-34 V để giữ ổn định chiều dài hồ quang khoảng 4-6 mm. Trong quá trình hàn, mỏ hàn được giữ cố định với khoảng cách từ đầu ống tiếp điện trên mỏ hàn đến vật hàn được duy trì là 20 mm. Phôi hàn được di chuyển với vận tốc hàn cố định 5 mm/s.

2.2. Quan sát dạng dịch chuyển kim loại

Để quan sát dạng dịch chuyển kim loại, nghiên cứu sử dụng kỹ thuật quan sát đồ bóng (shadowgraph) kết hợp hệ thống camera tốc độ cao (Memrecam Q1v, Nac Image Technology, Nhật Bản). Một nguồn sáng laser cường độ cao

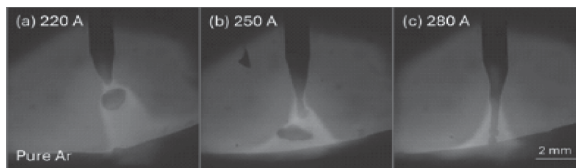
ở bước sóng 640 nm được sử dụng để hỗ trợ camera quan sát bóng của giọt kim loại. Camera được lắp đặt các bộ lọc trung tính (ND8) để giảm bớt ánh sáng mạnh từ hồ quang, thu nhận hình ảnh tại tốc độ ghi hình 4000 khung hình trên giây (frame per second - fps) và thời gian phơi sáng là 20 μs. Sơ đồ lắp đặt thí nghiệm được miêu tả trong Hình 2.



Hình 2. Minh họa sơ đồ lắp đặt thiết bị thí nghiệm

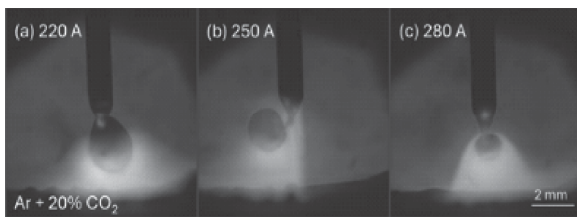
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Hình 3 trình bày hình ảnh đặc trưng của dạng dịch chuyển kim loại khi hàn ở ba mức dòng điện 220 A, 250 A và 280 A với khí bảo vệ là Ar tinh khiết. Khi hàn với loại khí bảo vệ này, chế độ dịch chuyển của giọt kim loại ở dạng phun giọt nhỏ (Hình 3a). Khi cường độ dòng điện tăng lên, phần kim loại lỏng ở đầu dây hàn bị kéo dài ra dưới ảnh hưởng của phân bố lực điện từ trong môi trường plasma của khí argon. Do đó, dạng dịch chuyển thay đổi dần từ dạng phun giọt nhỏ sang dạng dịch chuyển phun tia ở mức dòng điện 280 A (Hình 3c). Mức dòng điện 250 A thường được coi là mức dòng điện tới hạn giữa hai dạng dịch chuyển đối với môi trường khí bảo vệ này [12].



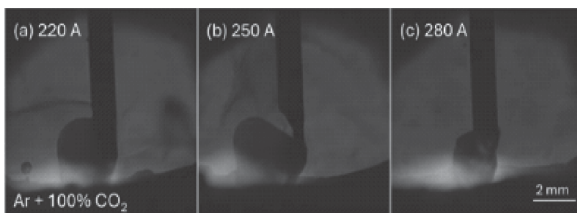
Hình 3. Hình ảnh dạng dịch chuyển khi hàn với khí Ar tinh khiết

Hình 4 thể hiện hình ảnh đặc trưng của dạng dịch chuyển kim loại khi hàn ở ba mức dòng điện với khí bảo vệ là khí trộn giữa 80% Ar và 20% CO₂. Dạng dịch chuyển tại mức dòng điện 220 A là dạng dịch chuyển giọt lớn (globular), với đường kính giọt kim loại lớn hơn đường kính của dây hàn (Hình 4a). Dạng dịch chuyển giọt lớn duy trì ở mức dòng điện 250 A như trên Hình 4b và chuyển sang dạng dịch chuyển giọt nhỏ ở mức dòng điện 280 A (Hình 4c).



Hình 4. Hình ảnh dạng dịch chuyển kim loại khi hàn với khí Ar + 20% CO₂

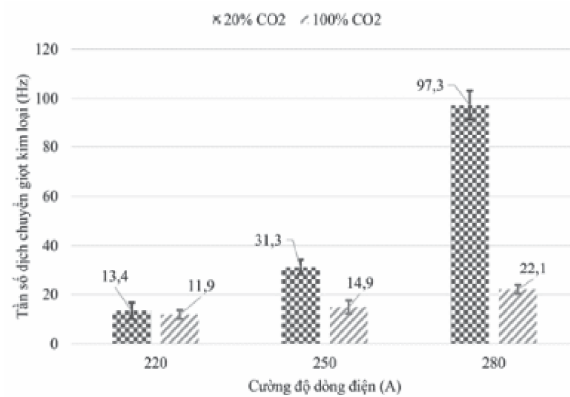
Hình 5 thể hiện hình ảnh đặc trưng của dạng dịch chuyển kim loại thu được khi hàn ở ba mức dòng điện với khí bảo vệ là 100% CO₂. Đối với môi trường khí bảo vệ này, cả ba mức dòng điện đều cho thấy dạng dịch chuyển là giọt lớn, với đường kính giọt có kích thước lớn và áp lực hồ quang bên dưới giọt kim loại tăng đáng kể so với loại khí bảo vệ là khí trộn. Trong quá trình dịch chuyển, một số thời điểm xảy ra quá trình ngắn mạch khi các giọt kim loại tiếp xúc với bề mặt vùng hàn. Khi đó, sức căng bề mặt của kim loại lỏng sẽ kéo giọt kim loại dịch chuyển vào vùng hàn.



Hình 5. Hình ảnh dạng dịch chuyển kim loại khi hàn với khí 100% CO₂

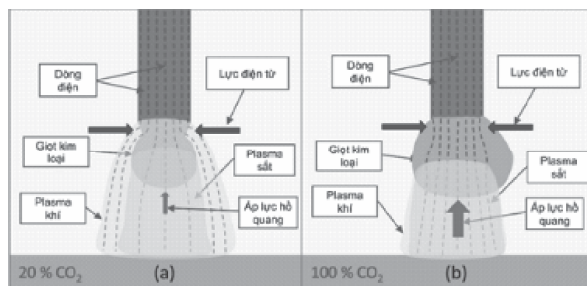
Hình 6 so sánh tần số dịch chuyển giọt kim loại khi dùng khí bảo vệ 20% CO₂ và 100% CO₂. Tần số dịch chuyển được đo đạc và phân tích dựa trên dữ liệu quan sát bởi camera tốc độ cao. Đối với khí bảo vệ argon tinh khiết, do dạng dịch chuyển có sự thay đổi sang dạng phun tia nên tác giả không so sánh tần số dịch chuyển kim loại với hai môi trường còn lại. Kết quả tần số dịch chuyển cho thấy khi hàn ở mức dòng hàn thấp 220 A, không có sự khác biệt nhiều về tần số khi hàn trong hai môi trường 20% và 100% CO₂. Khi dòng hàn tăng lên 250 A, tần số dịch chuyển tăng lên 31,3 Hz ở môi trường 20% CO₂, gấp 1,5 lần tần số trong môi trường 100% CO₂ (14,9 Hz). Tần số ở 20% CO₂ tăng mạnh ở mức dòng hàn 280 A lên tới 97,3 Hz, gấp khoảng 4,4 lần so với 22,1 Hz ở môi trường 100% CO₂. Điều này cho thấy khí bảo vệ ảnh hưởng mạnh tới tần số dịch chuyển.

Trong quá trình hàn GMAW, khi chế độ dịch chuyển không đổi, tần số dịch chuyển lớn thể hiện rằng hồ quang hàn ổn định. Do đó, dạng dịch chuyển phun giọt nhỏ với tần số cao được cho là dạng dịch chuyển tối ưu. Ở môi trường khí trộn 20% CO₂, tần số tăng nhanh khi dòng hàn tăng do ảnh hưởng nung nóng của nhiệt điện trở theo định luật Jun-Lenxơ có hiệu quả mạnh ở mức độ dòng điện hàn cao [13].



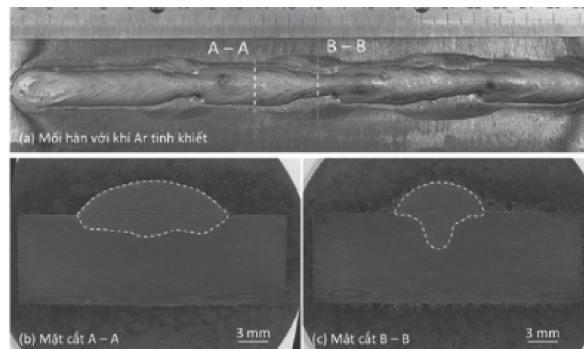
Hình 6. Tần số dịch chuyển giọt kim loại khi hàn với khí bảo vệ 20% và 100% CO₂

Hình 7 giải thích cơ chế khác nhau khi sử dụng khí bảo vệ có chứa hàm lượng CO_2 ở 20% và 100%. Khi có sự xuất hiện của CO_2 trong môi trường khí bảo vệ, nhiệt dung riêng của khí sẽ tăng lên so với việc sử dụng khí bảo vệ môi trường argon tinh khiết. Điều này dẫn tới nhiệt của hồ quang hàn sẽ giảm xuống và hồ quang bị co lại, tập trung ở bên dưới của giọt kim loại. Lúc này, áp lực hồ quang từ bên dưới giọt kim loại tăng mạnh, ngăn cản sự ngắt giọt kim loại khỏi đầu dây hàn [14]. Ở môi trường 20% CO_2 , ảnh hưởng của lực điện từ tới quá trình ngắt giọt kim loại là hiệu quả do lúc này áp lực hồ quang không lớn như minh họa trên Hình 7a. Khi hàn ở môi trường 100% CO_2 , áp lực hồ quang tăng mạnh chiếm ưu thế, giảm hiệu quả ngắt giọt của lực điện từ (Hình 7b).



Hình 7. Cơ chế hình thành giọt kim loại khi hàn với 20% (a) và 100% (b) CO_2

Ảnh chụp ngoại dạng và bề mặt cắt ngang biên dạng của mối hàn khi hàn trong môi trường khí bảo vệ argon tinh khiết ở dòng hàn 280 A được thể hiện trên Hình 8. Với khí bảo vệ argon tinh khiết, hồ quang hàn không ổn định và có sự thay đổi giữa chế độ dịch chuyển giọt lớn sang phun tia như quan sát trên Hình 3c. Tại vị trí mặt cắt A-A, mối hàn rộng và chiều sâu ngấu nhỏ gây ra bởi dạng dịch chuyển giọt lớn (Hình 8b). Trong khi đó, tại vị trí mặt cắt B-B, mối hàn có bề rộng hẹp và chiều sâu ngấu lớn ở tâm đường hàn, là kết quả của dạng dịch chuyển phun tia (Hình 8c).



Hình 8. Ngoại dạng mối hàn (a) và mặt cắt biên dạng mối hàn (b, c) khi hàn khí Ar tinh khiết ở dòng 280 A [10]

Kết quả nghiên cứu cho thấy đối với dây hàn đặc, trong ba loại khí đã khảo sát thì khí trộn Ar + 20% CO_2 là thích hợp để sử dụng khi hàn. Quá trình hàn cho hồ quang ổn định, dạng dịch chuyển giọt nhỏ và tần số cao ở mức dòng hàn 280 A.

4. KẾT LUẬN

Bài báo này nghiên cứu ảnh hưởng của khí bảo vệ tới sự dịch chuyển giọt kim loại trong quá trình hàn hồ quang GMAW. Kết quả nghiên cứu có thể được tóm tắt như sau:

- Khí bảo vệ quyết định rõ rệt dạng dịch chuyển kim loại của dây hàn đặc trong GMAW: với Ar tinh khiết, khi tăng dòng từ 220 tới 280 A dạng dịch chuyển chuyển dần từ giọt nhỏ sang phun tia; với Ar + 20% CO_2 , dạng dịch chuyển chuyển từ giọt lớn (220-250 A) sang giọt nhỏ (280 A); còn với 100% CO_2 , dịch chuyển duy trì ở dạng giọt lớn ở cả ba mức dòng điện và có thể xuất hiện ngắn mạch cục bộ.

- Khi tăng hàm lượng CO_2 trong thành phần khí bảo vệ sẽ dẫn tới tăng áp lực hồ quang, khiến quá trình ngắt giọt kém hiệu quả và tần số dịch chuyển giảm; do đó khi hàn trong môi trường khí Ar + 20% CO_2 cho tần số dịch

chuyển cao hơn đáng kể so với 100% CO₂, đặc biệt ở 280 A ($\approx 97,3$ Hz so với $\approx 22,1$ Hz).

- Trong phạm vi khảo sát, khí trộn Ar + 20% CO₂ là lựa chọn phù hợp nhất vì cho hồ quang ổn định và có xu hướng đạt dịch chuyển giọt nhỏ với tần số cao ở dòng hàn lớn. ❖

Ngày nhận bài: **05/01/2026**

Ngày phản biện: **19/01/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. J.F. Lancaster, “*The physics of fusion welding Part 2: Mass transfer and heat flow*”. IEE Proceedings B: Electric Power Applications 134 (6) (1987) 297-316.
- [2]. A. Scotti, V. Ponomarev, and W. Lucas, “*A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMA welding*”. J Mater Process Technol 212 (6) (2012) 1406-1413.
- [3]. S. Tashiro et al., “*Elucidation of droplet detachment mechanism in metal-cored arc welding*”. J Manuf Process 124 (2024) 1583-1605.
- [4]. D.K. Le et al., “*Elucidation of alkali element's role in optimizing metal transfer behavior in rutile-type flux-cored arc welding*”. J Manuf Process 139 (2025) 105-125.
- [5]. J. Hu and H.L. Tsai, “*Metal transfer and arc plasma in gas metal arc welding*”. J Heat Transfer 129 (8) (2007) 1025-1035.
- [6]. M. Ushio et al., “*Effects of shielding gas on metal transfer*”. Welding International 9 (6) (1995) 462-466.
- [7]. Y. Huang and Y.M. Zhang, “*Laser-Enhanced GMAW*”. Weld J 89 (9) (2010) 181S-188S.
- [8]. Y. Fan et al., “*Ultrasonic Wave Assisted GMAW*”. Weld J 91 (3) (2012) 91S-99S.
- [9]. S. Selvi, A. Vishvakshenan, and E. Rajasekar, “*Cold metal transfer (CMT) technology - An overview*”. Defence Technology 14 (1) (2018) 28-44.
- [10]. Q.N. Trinh, “*Research on Arc and Metal Transfer Phenomenon in Metal Flux-cored Arc Welding*”. Doctoral Dissertation, The University of Osaka, 2023.
- [11]. N.Q. Trinh et al., “*Eligible CO₂ content in Ar-CO₂ mixture shielding gas for improving metal transfer in metal-cored arc welding*”. Int J Heat Mass Transf 231 (2024).
- [12]. C.S. Wu, D.G. Zou, and J.Q. Gao, “*Determining the critical transition current for metal transfer in gas metal arc welding (GMAW)*”. Front Mater Sci China 2 (4) (2008) 397-401.
- [13]. H. Shimizu et al., “*Joule heating of solid wires in MAG welding*”. Welding International 19 (10) (2005) 761-772.
- [14]. J. Haidar and J.J. Lowke, “*Effect of CO₂ shielding gas on metal droplet formation in arc welding*”. IEEE Transactions on Plasma Science 25 (5) (1997) 931-936.