

Nghiên cứu chế tạo máy hàn hồ quang tay ảo

Study and Fabrication of Virtual Shielded Metal Arc Welding Machine

Nguyen Tien Duong

Hanoi University of Science and Technology

Đến Tòa soạn: 24-5-2015; chấp nhận đăng: 28-9-2018

Tóm tắt

Máy hàn hồ quang tay ảo cho phép người học thực hiện các thao tác như khi hàn trên máy hàn hồ quang tay thật. Máy hàn hồ quang tay ảo gồm có phần kết cấu máy và phần mềm mô phỏng. Phần kết cấu máy với cơ cấu quay và nâng hạ màn hình tự động cho phép người học thực hành được các tư thế hàn khác nhau với loại mối hàn giáp mối và mối hàn góc. Phần mềm mô phỏng cho phép người học thực hành hàn lựa chọn các thông số của quá trình hàn, đồng thời nó cũng đánh giá các thao tác của người học thực hành hàn ảo thông qua các kỹ năng mối hồ quang, mối lại hồ quang, duy trì chiều dài hồ quang, vận tốc hàn, dạng chuyển động của mỏ hàn và góc nghiêng của que hàn.

Từ khóa: Hàn hồ quang tay, hàn ảo, thiết bị hàn mô phỏng, thực hành hàn

Abstract

The virtual shielded metal arc welding machine permits welding learner to perform the operations as in welding on the real shielded metal arc welding machine. This machine consists of machine structure and simulation software. The machine structure with the automatic screen turning, raising and lowering mechanism, allows the welding learner to be practiced the different positions with butt weld and fillet weld. The simulation software permits welding practice learner to select welding parameters, and it evaluates also the operations of learner via the skills of welding arc ignition, welding arc re-ignition, the maintenance of arc length, welding speed, weave pattern of holder and electrode angle.

Keywords: Shielded metal arc welding, virtual welding, simulation welding equipment, welding practice

1. Mở đầu

Chi phí cho đào tạo thực hành hàn hồ quang tay rất cao [1], bao gồm chi phí cho máy móc, trang thiết bị (buồng hàn, máy hàn, máy hút khói hàn, trang thiết bị bảo hộ,...), nguyên vật liệu (phôi hàn, que hàn,...) và chi phí cho nhiên liệu (điện),... Ngoài ra khi thực hành trên máy hàn hồ quang tay thật thì hồ quang hàn và khí hàn rất độc hại với người học và người dạy, gây ô nhiễm môi trường.

Để đáp ứng nhu cầu đào tạo nguồn nhân lực hàn, đặc biệt là thợ hàn ngày càng lớn và góp phần giảm chi phí đào tạo, tiết kiệm năng lượng, giảm thiểu ô nhiễm, độc hại nên một số nước công nghiệp phát triển như Anh, Mỹ, Đức, Pháp, Nhật, Canada,... đã đầu tư nghiên cứu và chế tạo thành công máy hàn hồ quang ảo [2, 3]. Ở Việt Nam, hiện chưa có cơ sở nào chế tạo được máy hàn hồ quang tay ảo mà chúng ta mới nhập khẩu các máy hàn ảo về trang bị cho các trường phục vụ cho việc đào tạo thực hành hàn. Chi phí cho việc nhập khẩu thiết bị, chuyển giao công nghệ, sửa chữa và bảo dưỡng rất tốn kém.

Để góp phần giảm chi phí đào tạo thực hành, tiết kiệm được năng lượng, nguyên vật liệu và ngoại tệ cho đất nước, thì việc nghiên cứu thiết kế và chế tạo máy hàn hồ quang tay ảo ở trong nước là nhu cầu cấp bách. Việc tự chế tạo được máy hàn hồ quang tay ảo còn cho phép chúng ta làm chủ được công nghệ, chủ động trong việc chuyển giao công nghệ, bảo hành, bảo trì và sửa chữa mà không phụ thuộc vào nước ngoài. Đồng thời nó còn góp phần xanh hóa đào tạo nghề hàn.

2. Đánh giá quá trình hàn hồ quang tay ảo

Bộ thông số hàn hồ quang tay thật gồm các các thông số chế độ hàn (đường kính que hàn, cường độ dòng điện hàn, điện áp hàn, tốc độ hàn và số lớp hàn) và các thông số kỹ thuật hàn (các chuyển động của mỏ hàn, các góc nghiêng của que hàn, kỹ thuật mối, mối lại hồ quang và thao tác kết thúc hồ quang). Với mục tiêu để người học thực hành hàn rèn luyện các thao tác hàn nên trong hệ thống thiết bị hàn hồ quang tay ảo ta chỉ đánh giá các thông số liên quan đến kỹ năng của người học hàn hồ quang tay gồm: Chiều dài hồ quang, mối và mối lại hồ quang, kết thúc hồ quang, các chuyển động của mỏ hàn, góc nghiêng của que hàn.

* Địa chỉ liên hệ: Tel: (+84) 914362850

Email: duong.nguyentien@hust.edu.vn

2.1 Chiều dài hồ quang

Trong quá trình hàn, để đảm bảo hồ quang ổn định, người thợ hàn luôn phải duy trì chiều dài hồ quang trong khoảng $1,5 \div 5$ mm [4-5]. Ta lựa chọn phạm vi cho phép đối với chiều dài hồ quang như sau: $0 < l_{hq} \leq 5$ mm. Nếu chiều dài hồ quang $l_{hq} = 0$ hoặc khi $l_{hq} > 5$ mm thì hồ quang sẽ bị tắt, khi đó sẽ tính là lỗi duy trì hồ quang và phải môi lại hồ quang.

2.2 Môi và môi lại hồ quang

Khi bắt đầu hàn thì phải môi hồ quang. Khi đang hàn mà hồ quang bị tắt thì phải môi lại hồ quang. Môi hoặc môi lại hồ quang được thực hiện bằng cách cho que hàn chạm vào vật hàn sau đó nhấc lên. Hồ quang được môi hoặc môi lại tại rãnh hàn, cách đầu đường hàn hoặc cách điểm hồ quang bị tắt, về phía chưa hàn một đoạn 10 mm [5]. Khi hồ quang hình thành thì di chuyển ngược lại về đầu đường hàn hoặc về vị trí hồ quang bị tắt để bắt đầu hàn lại.

Ta lựa chọn phạm vi cho phép đối với vị trí môi hoặc môi lại hồ quang tại rãnh hàn, cách đầu đường hàn hoặc cách điểm hồ quang bị tắt, về phía chưa hàn một khoảng $8 \div 12$ mm. Nếu vị trí môi hay môi lại hồ quang mà không nằm trong phạm vi này thì sẽ tính là lỗi môi hay môi lại hồ quang.

2.3 Kết thúc hồ quang

Kết thúc hồ quang bằng cách tăng dần chiều dài hồ quang sau khi đã dừng mọi chuyển động khác của que hàn. Với chiều dài hồ quang tối đa là 10 mm thì khi chiều dài hồ quang > 10 mm, hồ quang sẽ tắt.

2.4 Các chuyển động của mỏ hàn

2.4.1 Chuyển động dọc trục que hàn

Đây là chuyển động (V_1) để duy trì chiều dài hồ quang ổn định. Đây chính là tốc độ cháy của que hàn.

Tốc độ cháy của que hàn phụ thuộc chủ yếu vào loại que hàn, đường kính que hàn, cường độ dòng điện hàn. Qua tính toán và hàn thực nghiệm với que hàn thường dùng là loại E6013 có đường kính 3,2 mm với 3 giá trị cường độ dòng điện trong phạm vi cho phép $70 \div 130$ [A] [4, 6-7] ta thấy tốc độ cháy của que hàn như sau: Với $I = 70$ A: $V_1 \approx 15$ [cm/phút]; Với $I = 100$ A: $V_1 \approx 20$ [cm/phút]; Với $I = 130$ A: $V_1 \approx 30$ [cm/phút]. Để phù hợp với người mới bắt đầu học hàn ta lựa chọn tốc độ cháy của que hàn ứng với 3 mức tốc độ cháy như sau:

- Tốc độ cháy chậm: $V_1 = 10$ [cm/phút];
- Tốc độ cháy trung bình: $V_1 = 15$ [cm/phút];
- Tốc độ cháy nhanh: $V_1 = 30$ [cm/phút];

Để đánh giá thao tác chuyển động dọc trục que hàn của người thực hành hàn hồ quang tay ảo ta sẽ

đánh giá thông qua sự duy trì chiều dài hồ quang. Nếu chuyển động này mà nhanh quá, làm cho que hàn chạm vào vật hàn, hồ quang sẽ bị tắt. Ngược lại, nếu chuyển động này mà chậm quá, chiều dài hồ quang sẽ lớn và nếu $L_{hq} > 5$ mm thì hồ quang sẽ tắt.

2.4.2 Chuyển động dọc theo trục mỏ hàn

Chuyển động dọc theo trục mỏ hàn (V_2) để hàn hết chiều dài đường hàn. Đây là chuyển động để đảm bảo vận tốc hàn yêu cầu.

Để người học làm quen với các vận tốc hàn nhanh chậm khác nhau, ta đưa ra 3 mức vận tốc hàn:

- Tốc độ thấp: $V_2 = 10 \pm 1$ [cm/phút].
- Tốc độ trung bình: $V_2 = 20 \pm 2$ [cm/phút].
- Tốc độ cao: $V_2 = 35 \pm 3,5$ [cm/phút].

Ứng với mỗi mức tốc độ lựa chọn, nếu tốc độ hàn thực tế không nằm trong phạm vi cho phép như trên thì đánh giá là tốc độ hàn sai và ngược lại là tốc độ hàn đúng.

2.4.3 Dao động ngang

Dao động ngang (V_3) để đảm bảo chiều rộng mỏ hàn. Khi hàn không có dao động ngang thì chiều rộng của mỏ hàn chỉ đạt được khoảng $(0,8 \div 1,5)d$ [5], với d là đường kính que hàn. Như vậy khi hàn có khe hở và vát mép rộng hơn khoảng trên thì phải có dao động ngang. Khi có dao động ngang, chiều rộng mỏ hàn có thể đạt $(3 \div 5)d$ [5]. Với đường kính que hàn thông dụng lớn nhất là 6 mm [5] thì biên độ dao động ngang lớn nhất cho phép là 30 mm.

Để người học làm quen với dao động ngang (V_3) ứng với các phạm vi khác nhau ta lựa chọn 3 mức độ dao động ngang để người học được lựa chọn:

- Không có dao động ngang: $V_3 = 0$;
- Dao động ngang biên độ hẹp: $V_3 = 10$ mm;
- Dao động ngang biên độ rộng: $V_3 = 30$ mm.

Chuyển động của mỏ hàn được thực hiện theo nhiều cách là sự phối hợp của ba chuyển động cơ bản trên [5]. Đối với người mới học hàn ta lựa chọn dạng đơn giản nhất là dao động ngang dạng răng cưa [5]. Trong quá trình hàn, nếu phạm vi biên độ dao động ngang không nằm trong khoảng cho phép ± 1 mm đối với giá trị biên độ dao động ngang đã lựa chọn thì sẽ tính là lỗi bám đường hàn.

2.5 Góc nghiêng của que hàn

Trong hàn thật, góc nghiêng của que hàn được xác định đối với mặt phẳng của vật hàn [4-8]. Trong hàn ảo, ta quy ước góc nghiêng của que hàn được xác định đối với mặt phẳng màn hình. Hệ tọa độ OXY trong mặt phẳng màn hình có trục OX nằm ngang

hướng từ trái sang phải, trục OY thẳng đứng hướng từ dưới lên trên. Góc α là góc giữa que hàn với trục OX. Góc β là góc giữa que hàn và trục OY. Khi góc nghiêng của que hàn không nằm trong phạm vi cho phép đối với từng loại mối hàn, từng tư thế hàn như đề cập dưới đây thì sẽ có thông báo hiện trên màn hình về lỗi góc nghiêng của que hàn để người học nhanh chóng tự điều chỉnh góc nghiêng cho phù hợp.

2.5.1 Mối hàn giáp mối tư thế hàn sấp (1G)

Màn hình ở tư thế nằm ngửa (Hình 1), hai tấm phôi hàn được vẽ nằm ngang trên màn hình. Phạm vi cho phép của α và β : $\alpha=75^{\circ}\div 80^{\circ}$; $\beta=90^{\circ}\pm 2^{\circ}$ [5, 7-8].

2.5.2 Mối hàn góc tư thế hàn sấp (1F)

Màn hình ở tư thế nằm ngửa, hai tấm phôi hàn được vẽ ngang vuông góc với nhau và mỗi tấm tạo với màn hình một góc 45° . Phạm vi cho phép của α và β : $\alpha=75^{\circ}\div 80^{\circ}$; $\beta=90^{\circ}\pm 2^{\circ}$ [7-8].

2.5.3 Mối hàn giáp mối tư thế hàn ngang (2G)

Màn hình ở tư thế đứng (Hình 2), hai tấm phôi hàn được vẽ nằm ngang trên màn hình (Hình 7). Phạm vi cho phép của α và β : $\alpha=75^{\circ}\div 80^{\circ}$; $\beta=95^{\circ}\div 100^{\circ}$ [5-8].

2.5.4 Mối hàn góc tư thế hàn ngang (2F)

Màn hình ở tư thế đứng, hai tấm phôi hàn vuông góc với nhau và một tấm được vẽ nằm ngang trên màn hình còn tấm kia vuông góc với màn hình. Phạm vi cho phép của α và β : $\alpha=75^{\circ}\div 80^{\circ}$; $\beta=45^{\circ}\pm 2^{\circ}$ [7-8].

2.5.5 Mối hàn giáp mối tư thế hàn đứng (3G)

Màn hình ở tư thế đứng, hai tấm phôi hàn được vẽ nằm dọc trên màn hình. Phạm vi của α và β : Hàn dưới lên (3Gu): $\alpha=90^{\circ}\pm 2^{\circ}$; $\beta=105^{\circ}\div 110^{\circ}$ [5-8]; Hàn trên xuống (3Gd): $\alpha=90^{\circ}\pm 2^{\circ}$; $\beta=105^{\circ}\div 110^{\circ}$ [5-8].

2.5.6 Mối hàn góc tư thế hàn đứng (3F)

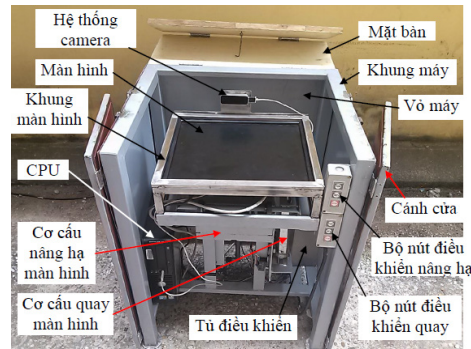
Màn hình ở tư thế đứng, hai tấm phôi hàn được vẽ đứng vuông góc với nhau và mỗi tấm tạo với màn hình một góc 45° . Phạm vi cho phép của α và β : Hàn dưới lên (3Fu): $\alpha=90^{\circ}\pm 2^{\circ}$; $\beta=90^{\circ}\div 95^{\circ}$ [6, 8]; Hàn trên xuống (3Fd): $\alpha=90^{\circ}\pm 2^{\circ}$; $\beta=90^{\circ}\div 95^{\circ}$ [8].

3. Máy hàn hồ quang tay ảo

Máy hàn hồ quang tay ảo (Hình 1) gồm các bộ phận cơ bản sau:

- Bộ lưu giữ và xử lý thông tin (CPU). Đây là nơi lưu giữ phần mềm điều khiển, xử lý và truyền dẫn các thông tin sau khi thu nhận từ màn hình và hệ thống camera. Khi người học thực hiện các thao tác thực hành, mọi thông tin sẽ được lưu vào máy sau đó người học và người dạy cùng có thể mở ra để kiểm tra kết quả thực hành.

- Màn hình: Bộ phận hiển thị và trao đổi thông tin giữa người học và bộ xử lý thông tin. Các giao diện trên màn hình sẽ hỗ trợ cho người sử dụng. Sau khi thực hành, màn hình thực hành sẽ cung cấp các công cụ hỗ trợ giúp người học phân tích kết quả thực hành đồng thời biết được những sai sót mà họ đã mắc phải trong quá trình thực hành.



Hình 1. Máy hàn hồ quang ảo

- Hệ thống camera: Bộ phận thu thập các thông tin để truyền vào CPU xử lý. Hệ thống camera sẽ thu thập vị trí và các góc nghiêng của que hàn qua đó cho phép xác định các thông số như vị trí hiện tại của hồ quang, chiều dài hồ quang, tốc độ hàn, biên độ dao động ngang, góc nghiêng của que hàn,... Ở đây hệ thống camera là thiết bị cảm biến chuyển động 3D “Leap motion” có 2 camera hồng ngoại.

- Khung máy: Để đỡ toàn bộ hệ thống thiết bị. Đây chính là khung bàn hàn. Kích thước khung máy (dài x rộng x cao = 600x500x800 mm) được thiết kế dựa trên kích thước của bàn hàn chuẩn để đảm bảo thuận tiện và thoải mái cho người học. Để đảm bảo độ cứng vững, tính thẩm mỹ và giảm khối lượng vật liệu, khung giá đỡ được hàn từ thép hộp vuông mạ kẽm kích thước 40x40x3 mm.

Mặt trên khung máy được lắp mặt bàn bằng gỗ vừa có tác dụng bảo vệ màn hình, che bụi cho các bộ phận của máy khi không làm việc đồng thời được dùng làm mặt bàn cho người học. Mặt bàn được thiết kế hai nửa có thể gấp lại nhờ bản lề và được lắp bản lề với khung máy. Khi làm việc, mặt bàn được gấp đôi và lật ra phía sau của khung máy.

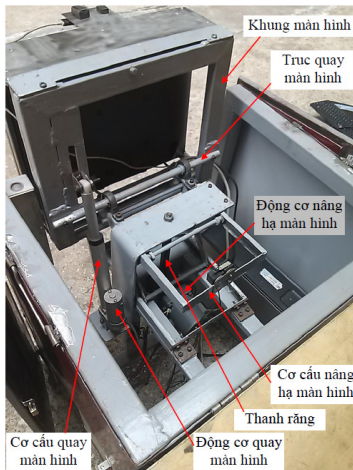
- Khung màn hình: Đây là bộ phận để lắp đặt màn hình và gắn hệ thống camera. Để tăng tính thẩm mỹ và giảm khối lượng vật liệu, khung màn hình được làm bằng thép hộp kích thước 10x6x1,5 mm, loại thép không gỉ.

- Cơ cấu nâng hạ màn hình: Để điều chỉnh chiều cao của màn hình cho phù hợp với người học. Sử dụng động cơ không đồng bộ 1 pha nguồn AC 220V-50Hz kết hợp với cơ cấu bánh răng - thanh răng để nâng hạ khung màn hình. Sử dụng mạch điều khiển

dùng dòng 24V với 2 rơ le điện từ để đảo chiều quay của động cơ.

- Cơ cấu quay màn hình: Để xoay màn hình về tư thế đứng hoặc nằm ngửa phù hợp với các tư thế hàn khác nhau. Sử dụng động cơ một chiều DC 24V đảo chiều quay bằng cách đổi cực dòng điện vào động cơ, kết hợp với cơ cấu vít me – đai ốc để đẩy quay khung màn hình.

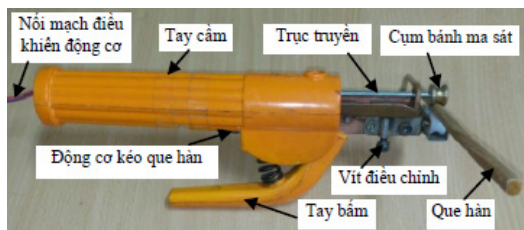
Cơ cấu nâng hạ và xoay màn hình được thiết kế có thể đồng thời vừa nâng hạ vừa quay (Hình 2). Trong mạch điều khiển có các rơ le hành trình để đảm bảo độ chính xác và độ an toàn cho hệ thống thiết bị.



Hình 2. Cơ cấu nâng hạ và xoay màn hình

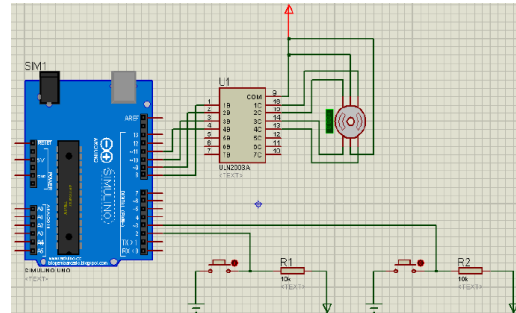
- Mỏ hàn hồ quang tay ảo: Có cấu tạo sao cho người thực hành hàn ảo thực hiện được 3 chuyển động (V_1 , V_2 và V_3) như khi hàn hồ quang tay thật.

Để thực hiện các chuyển động V_2 và V_3 thì người thực hành hàn chỉ cần dịch chuyển theo các chuyển động đó là được. Khi hàn thật, hồ quang cháy làm đầu que hàn nóng chảy, làm tăng chiều dài hồ quang. Để duy trì hồ quang, người thợ hàn phải có chuyển động V_1 đưa que hàn xuống. Trong hàn hồ quang tay ảo, que hàn không cháy nên để nó ngắn lại ta thiết kế bộ phận kéo que hàn chạy ngược lại với hướng V_1 và với vận tốc bằng tốc độ cháy của que hàn V_1 . Để làm được việc này ta sử dụng cụm 3 bánh ma sát gồm một bánh chủ động và hai bánh bị động để kẹp chặt, truyền chuyển động cho que hàn, vừa định hướng cho que hàn chuyển động thẳng (Hình 3).



Hình 3. Mỏ hàn hồ quang tay ảo

Để kết cấu mỏ hàn được gọn, tăng tính thẩm mỹ và đảm bảo đầu mỏ hàn không bị nặng mất cân đối, động cơ được đặt trong tay cầm do đó cần có trục truyền dài để truyền chuyển động cho bánh ma sát nằm ở đầu mỏ hàn. Để điều khiển chiều chạy và tốc độ chạy của que hàn ứng với 3 mức tốc độ khác nhau ta sử dụng động cơ bước 2 pha 12V loại 28BYJ48-12-300-01 được điều khiển bằng mạch điều khiển Modul ULN2003 (Hình 4).



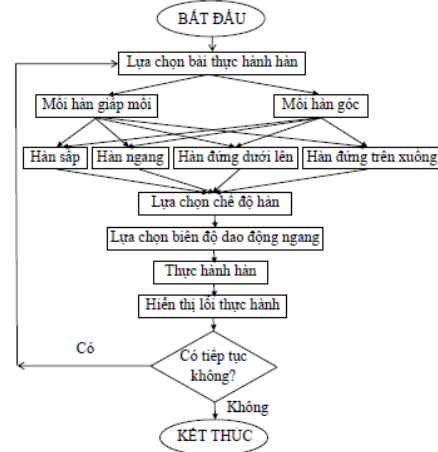
Hình 4. Mạch điều khiển động cơ kéo que hàn

- Tủ điều khiển: Chứa các linh kiện của mạch điều khiển động cơ nâng hạ màn hình và động cơ quay màn hình, bộ đổi dòng,...

4. Phần mềm hàn hồ quang ảo

4.1 Phần mềm hàn hồ quang tay ảo

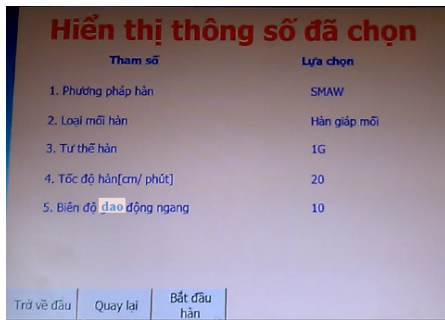
Sơ đồ thuật toán của phần mềm hàn hồ quang tay ảo được thể hiện trên hình 5.



Hình 5. Sơ đồ thuật toán hàn hồ quang ảo

Khi thực hiện một bài thực hành, phần mềm cho phép lựa chọn loại môi hàn sẽ thực hiện (môi hàn giáp môi hay môi hàn góc), rồi đến lựa chọn tư thế hàn (có 3 tư thế hàn cho mỗi loại môi hàn: Tư thế hàn sấp, tư thế hàn ngang, tư thế hàn đứng bao gồm hàn đứng từ dưới lên và hàn đứng từ trên xuống). Sau đó phần mềm cho phép lựa chọn chế độ hàn, biên độ dao động ngang. Tốc độ cháy của que hàn sẽ được lựa chọn thông qua nút bấm trên bảng mạch điều khiển

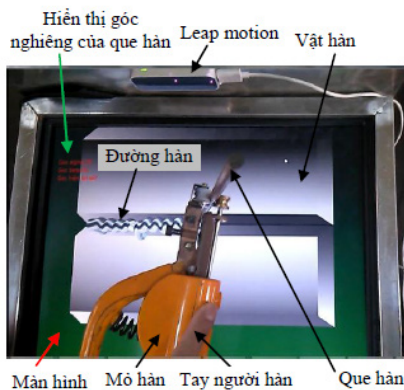
tốc độ kéo que hàn. Sau khi lựa chọn các thông số, một cửa sổ màn hình sẽ hiển thị các thông số đã lựa chọn để người học xem lại, hiệu chỉnh hoặc đồng ý bắt đầu hàn (Hình 6).



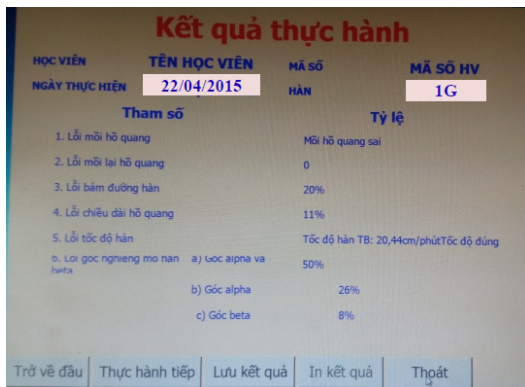
Hình 6. Cửa sổ hiển thị các thông số đã lựa chọn

4.2 Hiện thị quá trình hàn

Khi lựa chọn bắt đầu hàn, màn hình hiển thị phối hàn với loại mối hàn, tư thế hàn đã lựa chọn (Hình 7) để người học thực hành thực hiện các thao tác hàn với các thông số đã lựa chọn. Các chuyển động và góc nghiêng của que hàn được nhận diện nhờ thiết bị “Leap motion”. Leap motion là thiết bị cảm biến chuyển động sử dụng 2 camera và 3 đèn cảm ứng hồng ngoại để thu được tín hiệu 3 chiều với độ chính xác 0,01 mm với độ nhạy hơn 200 lần so với bất kỳ thiết bị cảm biến hiện có.



Hình 7. Cửa sổ hiển thị các thông số đã lựa chọn



Hình 8. Cửa sổ hiển thị kết quả bài thực hành

Trong quá trình thực hành hàn ở góc trên bên trái màn hình hiển thị giá trị của góc nghiêng để người học có thể hiệu chỉnh tức thì.

4.3 Hiện thị kết quả

Sau khi kết thúc bài thực hành, phần mềm sẽ hiển thị kết quả thực hành hàn, đánh giá các thông số như: Lỗi mối hồ quang, lỗi mối lại hồ quang, lỗi bám đường hàn (chính là lỗi biên độ dao động ngang), lỗi chiều dài hồ quang, lỗi vận tốc hàn, lỗi góc nghiêng của que hàn (Hình 8).

5. Kết luận

Máy hàn hồ quang tay ảo đã chế tạo cho phép:

- Thực hành được nhiều loại mối hàn khác nhau với nhiều loại tư thế hàn khác nhau.

- Rèn luyện được các thao như khi hàn hồ quang tay thật với các mức độ từ dễ đến khó.

- Có cảm giác như khi đang hàn thật, do đó sẽ không bỏ ngỡ khi chuyển từ hàn ảo sang hàn thật.

- Nhờ hệ thống camera và màn hình hiển thị tức thời mà theo dõi trực tiếp được các thao tác từ đó nhanh chóng hiệu chỉnh để hàn đúng yêu cầu.

- Sau khi thực hành biết ngay được các lỗi mắc phải từ đó rút kinh nghiệm cho bài thực hành tiếp.

Ngoài ra nó còn có ưu điểm gọn gàng, thuận lợi, dễ sử dụng, chi phí thấp.

References

- [1]. Anh Quang, Bất cập chi phí đào tạo nghề, Báo Giáo dục và Thời đại, Số 27/06 (2013).
- [2]. Deanna Postethwaite, Community college welding program update, Welding Journal, AWS, April (2012).
- [3]. Claude Choquet, ARC+ & ARC PC welding simulators: Teach welders with virtual interactive 3D technologies, 123 Certification Ins., Canada.
- [4]. Larry Jeffus, Welding: Principles and Applications, Fifth edition, Delmar Cengage Learning Publisher (2002).
- [5]. Ngô Lê Thông, Công nghệ hàn điện nóng chảy, Tập 1: Cơ sở lý thuyết, Nhà xuất bản Khoa học Kỹ thuật (2004).
- [6]. Gower A. Kennedy, Welding Technology, 2nd edition, Glencoe Publishing Company, California (1982).
- [7]. Raymond Sacks, Welding: Principles & Practices, Glencoe Publishing Company, California, USA (1981).
- [8]. Nguyễn Tiến Dương, Nghiên cứu xác định phạm vi cho phép đối với bộ thông số điều khiển quá trình hàn hồ quang tay ảo, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, Số 8 (2014) 64-69.

