

# Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số chế độ hàn đến độ bền kéo và kích thước hình học của mối hàn điện xỉ - áp lực ứng dụng trong kỹ thuật cơ khí xây dựng

Studying the effect of welding parameters on tensile strength and geometry size of electroslag pressure weld joint applied in construction mechanical engineering

Hoàng Đức Long<sup>1,\*</sup>, Hà Minh Hùng<sup>1,2,\*</sup>, Lê Đức Bảo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Viện Nghiên cứu Cơ khí, Bộ Công Thương

<sup>2</sup>Viện Phát triển Kỹ thuật, Công nghệ tiên tiến (IDAT)

<sup>3</sup>Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Email: haminhhunggs@gmail.com; h.longnarime@gmail.com

Tel: +84.024.3.7920.406; Mobile: 0903431340

---

## Tóm tắt

### Từ khóa:

Cơ tính mối hàn; Hàn điện xỉ - áp lực; Quy hoạch thực nghiệm trực giao; Tổ chức mối hàn.

Bài báo giới thiệu kết quả nghiên cứu thực nghiệm và tính toán xây dựng mô hình toán học biểu diễn mối quan hệ giữa ba thông số công nghệ hàn điện xỉ - áp lực gồm cường độ dòng điện hàn, thời gian hàn và áp lực hàn trong một chu kỳ hàn ảnh hưởng đến độ bền kéo, kích thước hình học và tổ chức vật liệu của mối hàn nối đầu cột thép xây dựng theo quy hoạch trực giao kiểu 3 mức 3 yếu tố (N27). Mô hình toán học thu được là cơ sở để xác định miền điều khiển thích hợp chế độ hàn đảm bảo tính năng làm việc theo yêu cầu kết cấu chịu lực trong công trình xây dựng.

## Abstract

### Keywords:

Mechanical characteristics of weld joints; Electroslag pressure welding; Experimental orthogonal planning; Microstructure of weld joints.

The paper presents the results of empirical research and mathematical modeling calculation of the influence of three main technological parameters of electroslag pressure welding (welding current, welding time and welding pressure) to the tensile strength, geometry size and microstructure of the butt joints of reinforced steel construction in accordance with the three-factor 3-element (N27) orthogonal planning. The obtained mathematical model served as basis for determining the suitable control domain of welding mode to ensure the required performance of load bearing structures.

Ngày nhận bài: 09/07/2018

Ngày nhận bài sửa: 04/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

---

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hàn điện xỉ - áp lực cốt thép xây dựng là quá trình rất phức tạp bởi nó tích hợp nhiều công đoạn với đặc tính lý hóa khác nhau gồm: tạo bể xỉ, điện xỉ và giữ mối hàn sau điện xỉ dưới áp lực với nhiều mức điều chỉnh lựa chọn khác nhau. Trong công trình [3], tác giả đã đề cập đến kết quả

ngghiên cứu ảnh hưởng của chế độ hàn điện xỉ - áp lực như thời gian hàn ( $T_h$ ), áp lực hàn ( $p_h$ ) khi chọn những thông số khác như cường độ dòng điện hàn ( $I_h$ ) và đường kính danh nghĩa cốt thép hàn ( $d_{d.n}$ ) ở mức cố định cho trước đến tính chất độ bền kéo ( $\sigma_K$ ) và tổ chức thô đại mối hàn. Ở đây, nhóm nghiên cứu đã đưa ra miền khảo sát lựa chọn của các thông số công nghệ chính để tiến hành thí nghiệm theo quy hoạch đầy đủ N27 gồm: 1) Cường độ dòng điện hàn  $I_h = 300; 450; 600A$ , bước điều chỉnh  $\lambda_1 = 150A$ ; 2) Thời gian hàn  $T_h = 25; 30; 35s$ , bước điều chỉnh  $\lambda_2 = 5,0s$ ; 3) Áp lực hàn  $p_h = 2,5; 4,5; 6,5MPa$ , bước điều chỉnh  $\lambda_3 = 2,0MPa$  là hoàn toàn có cơ sở khoa học.

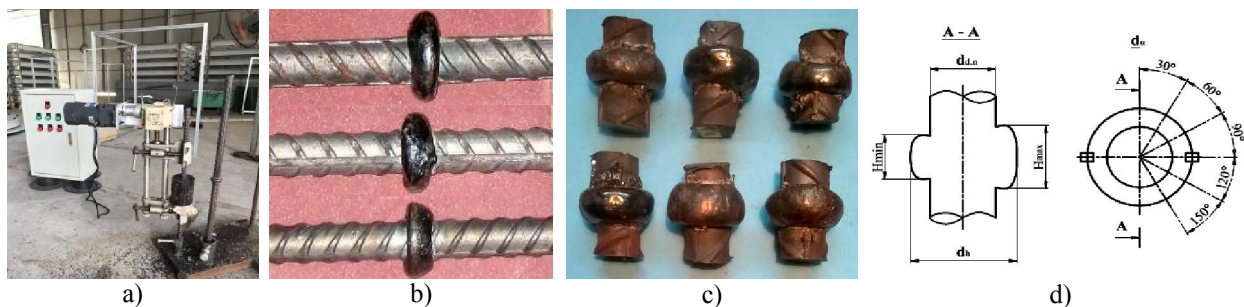
Bài báo [4] trình bày kết quả thực nghiệm xác định quy luật ảnh hưởng của các thông số công nghệ chính nêu trên đến  $\sigma_K$  khi xét ảnh hưởng cặp đôi của ( $I_h.T_h$ ) và ( $I_h.p_h$ ) ở 3 mức  $p_h$  và  $T_h$  tương ứng khác nhau, đồng thời với việc đo độ cứng tế vi ( $HV_{0,05}$ ), chụp ảnh tổ chức vật liệu tại trung tâm mối hàn và các vùng ảnh hưởng nhiệt lân cận trên một số mẫu điển hình. Qua đó đưa ra khuyến cáo về các tổ hợp chế độ hàn theo quy hoạch thực nghiệm N27 cho phép nhận được chất lượng mối hàn tốt nhất là:  $I_h = 450 \div 600 A$ ;  $T_h = 30 \div 35 s$  và  $p_h = 4,5 \div 6,5 MPa$ .

Tuy nhiên, để đưa ra được mô hình toán học thực nghiệm biểu diễn quy luật ảnh hưởng của các thông số công nghệ hàn đến bộ chỉ tiêu đánh giá chất lượng mối hàn cần tiến hành thực nghiệm theo quy hoạch trực giao N27 và tính toán các hệ số ẩn của mô hình toán học cần tìm bằng phương pháp xử lý số liệu thống kê toán học. Từ đó có thể phân tích đánh giá sự ảnh hưởng đồng thời cặp đôi của 2 trong 3 thông số công nghệ chính đã chọn đến đặc tính bền của mối hàn thông qua tiêu chí độ bền kéo và đặc điểm cấu trúc thô đại vật liệu kim loại mối hàn. Tính chất đặc trưng của mối hàn điện xỉ - áp lực được đánh giá bởi mô hình tổng hợp đặc tính bền cơ học ( $y_1 = \sigma_K$ ) và các tính chất quy định bởi kích thước hình học, hình dạng mối hàn thông qua các hàm mục tiêu đầu ra gồm: đường kính hàn trung bình ( $y_2 = d_{t,b}$ ); độ nở phình theo hướng kính của nó ( $y_3 = \Delta d_h$ ); độ nở phình dọc trục cốt thép hàn ( $y_4 = H_{t,b}$ ) và đặc điểm cấu trúc thô đại mối hàn tương ứng với mỗi chế độ hàn ở các nút quy hoạch thực nghiệm.

Bài báo này giới thiệu kết quả thí nghiệm theo quy hoạch trực giao N27, tính toán xử lý số liệu thống kê toán học thực nghiệm để xây dựng các mô hình cần tìm nêu trên, đồng thời khảo sát, chụp ảnh tổ chức thô đại của mối hàn trên một số mẫu điển hình.

## 2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Sử dụng thiết bị hàn điện xỉ - áp lực tại Viện Nghiên cứu Cơ khí (hình 1, a). Mẫu thí nghiệm nhận được sử dụng để thử phá hủy xác định độ bền kéo  $\sigma_K$ , nghiên cứu khảo sát hình dáng hình học và tổ chức thô đại của mối hàn cho trên hình 1, b và hình 1, c tương ứng. Hình 1, d là sơ đồ nguyên lý đo đường kính trung bình, độ nở phình hướng kính và dọc trục của mối hàn.



**Hình 1.** Thiết bị thí nghiệm (a), mẫu hàn nối đầu cốt thép xây dựng (b), mẫu khảo sát đặc tính mối hàn (c) và sơ đồ đo kích thước hình học mối hàn (d):  $d_{d.n}$  - đường kính danh nghĩa cốt thép hàn;  $d_h$  - đường kính hàn;  $H_{min}$ ,  $H_{max}$  - độ nở phình dọc trục min, max;  $d_a$  - đường kính mối hàn đo tại góc  $\alpha$ .

Điều kiện thí nghiệm cho trong bảng 1, ký hiệu mã hóa các chế độ quy hoạch thực nghiệm cho trong bảng 2.

**Bảng 1.** Điều kiện thí nghiệm hàn điện xi - áp lực theo quy hoạch trực giao N27

| Thông số công nghệ khảo sát chính, ký hiệu, đơn vị tính | Ký hiệu mã hóa | Mức 0 | Mức 1 | Mức 2 | Bước điều chỉnh, $\lambda_i$ |
|---|----------------|-------|-------|-------|------------------------------|
| Cường độ dòng điện hàn, $I_h$ , A                       | $X_1$          | 300   | 450   | 600   | 150,0                        |
| Thời gian hàn, $T_h = T_1 + T_2 + T_3$ , s              | $X_2$          | 25,0  | 30,0  | 35,0  | 5,0                          |
| Áp lực hàn, $p_h$ , MPa                                 | $X_3$          | 2,5   | 4,5   | 6,5   | 2,0                          |

**Bảng 2.** Ký hiệu mã số hoá tổ hợp bộ 3 thông số công nghệ hàn điện xi - áp lực theo quy hoạch thực nghiệm kiểu  $N = 3^3 = 27$

| Các yếu tố khảo sát |               | $X_2$ (mức 0) | $X_2$ (mức 1) | $X_2$ (mức 2) |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $X_3$ (mức 0)       | $X_1$ (mức 0) | 000           | 010           | 020           |
|                     | $X_1$ (mức 1) | 100           | 110           | 120           |
|                     | $X_1$ (mức 2) | 200           | 210           | 220           |
| $X_3$ (mức 1)       | $X_1$ (mức 0) | 001           | 011           | 021           |
|                     | $X_1$ (mức 1) | 101           | 111           | 121           |
|                     | $X_1$ (mức 2) | 201           | 211           | 221           |
| $X_3$ (mức 2)       | $X_1$ (mức 0) | 002           | 012           | 022           |
|                     | $X_1$ (mức 1) | 102           | 112           | 122           |
|                     | $X_1$ (mức 2) | 202           | 212           | 222           |

Độ bền kéo kim loại mối hàn ( $\sigma_K$ , MPa) là tiêu chí quan trọng nhất của mối hàn điện xi - áp lực, quyết định độ cứng vững của kết cấu cốt thép hàn, được xác định bằng cách thử phá hủy bằng phương pháp kéo dọc mối hàn theo hướng đường kính cốt thép và xác định theo công thức sau:

$$\sigma_K = y_1 = \frac{P}{S} = \frac{4P}{\pi \cdot d_{t,b}^2} \quad (1)$$

trong đó:  $\sigma_K = y_1$  - Độ bền kéo mối hàn, MPa; P - Lực kéo tại thời điểm mẫu thử bị phá hủy, N;

S - Diện tích mặt cắt ngang của mẫu thử phá hủy tại mối hàn,  $\text{mm}^2$ ;  $d_{t,b}$  - Giá trị đường kính trung bình của cốt thép hàn, mm.

Dạng tổng quát của các mô hình toán học cần tìm ở biểu thức sau:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (2)$$

Cơ sở lý thuyết về phương pháp tính toán các hệ số ẩn trong mô hình toán học hàm mục tiêu đầu ra cần tìm có thể tham khảo một số công trình khoa học ngoài nước [3], [4] và [5] trong nước.

Tổ chức thô đại của mối hàn điện xi - áp lực được khảo sát chụp ảnh kỹ thuật số trên mặt cắt dọc trục cốt thép hàn sau khi phay bỏ 1/2, sau đó mài đánh bóng và tẩm thực đến mức cần thiết.

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

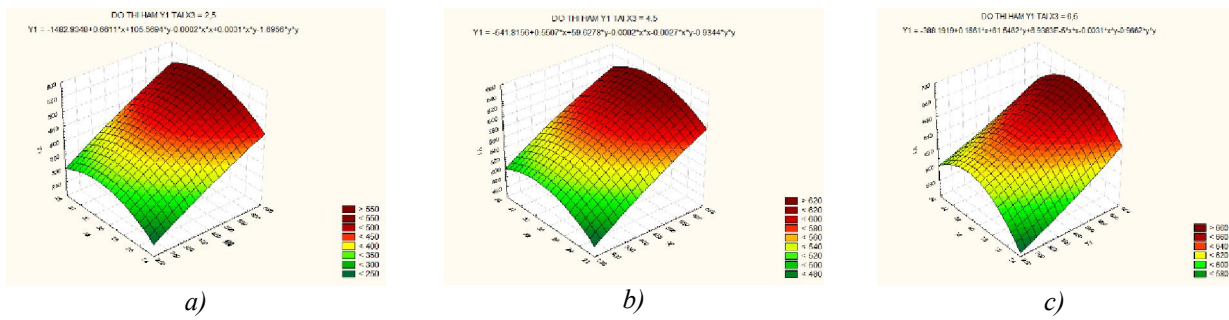
**3.1. Đặc tính bền cơ học và hình dạng mối hàn:** Kết quả thử phá hủy mẫu nhận được theo quy hoạch thực nghiệm trực giao N27 và tính toán độ bền kéo ( $\sigma_{ki}$ ) và các hàm mục tiêu cần tìm

khác của mối hàn điện xỉ - áp lực cho trong bảng 3. Từ đó có thể phân tích đánh giá sự ảnh hưởng đồng thời của các cặp đôi trong ba thông số công nghệ lựa chọn khảo sát đến độ bền kéo của mối hàn điện xỉ - áp lực theo các tổ hợp  $\sigma_K = f(T_h, I_h)$  với 3 mức  $p_h = 2,5; 4,5; 6,5$  MPa.

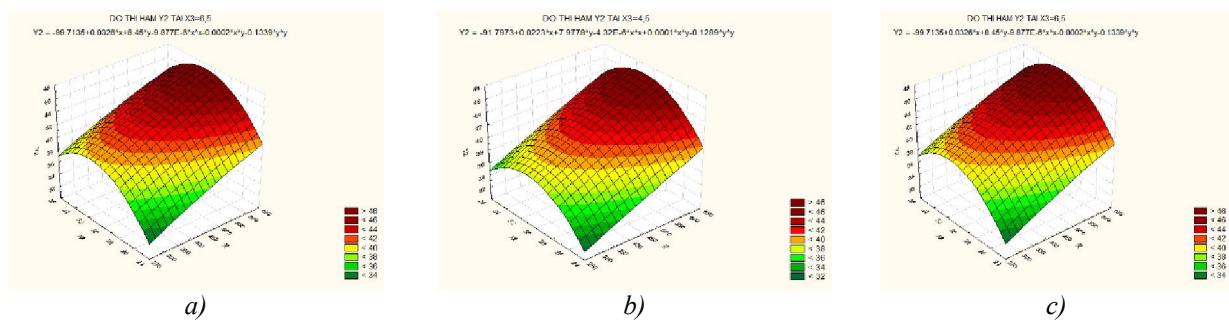
Để có góc nhìn tổng quát về quy luật ảnh hưởng của 3 thông số công nghệ hàn điện xỉ - áp lực đã xét theo quy hoạch thực nghiệm trực giao kiểu N27 đến hàm mục tiêu đầu ra cần tìm nói trên đã sử dụng phần mềm xử lý số liệu thống kê toán học thực nghiệm STATISTICA và đưa ra các đồ thị trong không gian 3 chiều (hình 2 ÷ 5). Qua đó có thể thấy rõ mức độ ảnh hưởng đồng thời của hai thông số chính gồm cường độ dòng điện hàn ( $I_h$ ) và thời gian hàn ( $T_h$ ) ở 3 mức cố định thông số áp lực hàn ( $p_h$ ). Trong các trường hợp khác, nếu cố định thông số công nghệ thời gian hàn ( $T_h$ ) hoặc cường độ dòng điện hàn ( $I_h$ ) thì đồ thị 3D biểu diễn ảnh hưởng cặp đôi của hai thông số còn lại tương tự như xét ở trường hợp cố định  $p_h$ .

**Bảng 3.** Kết quả đo, tính toán độ bền kéo và kích thước hình học của mối hàn điện xỉ - áp lực trên mẫu quy hoạch thực nghiệm N27

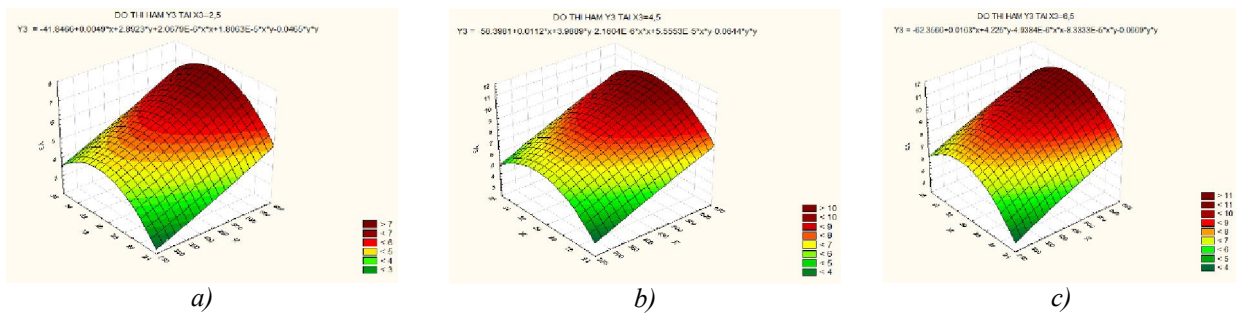
| Số TN | Mã số QHTN | Chế độ hàn điện xỉ áp lực: $I_h, T_h, p_h$ | Độ bền kéo mỗi hàn, $\sigma_K, \text{MPa}$ | Đường kính trung bình mỗi hàn, $d_{t,b}, \text{mm}$ | Độ nở phình hướng kính, $\Delta d_h, \text{mm}$ | Độ nở phình dọc trục, $H_{t,b}, \text{mm}$ | Ảnh thô đại mỗi hàn điển hình |
|-------|------------|--|--|---|---|--|-------------------------------|
| 1     | 000        | 300A; 25s; 2,5MPa                          | 298,50                                     | 31,2500   | 3,1250  | 3,9000                                     | -                             |
| 2     | 010        | 300A; 30s; 2,5MPa                          | 361,16                                     | 34,7500   | 4,8750  | 7,1666                                     | -                             |
| 3     | 020        | 300A; 35s; 2,5MPa                          | 345,83                                     | 33,0833   | 4,4041  | 5,8333                                     | -                             |
| 4     | 100        | 450A; 25s; 2,5MPa                          | 380,66                                     | 33,7500   | 4,3750  | 6,3333                                     | Hình 6, a                     |
| 5     | 110        | 450A; 30s; 2,5MPa                          | 453,33                                     | 37,0833   | 6,0416  | 10,1000                                    | -                             |
| 6     | 120        | 450A; 35s; 2,5MPa                          | 433,16                                     | 35,2500   | 5,1250  | 7,8666                                     | -                             |
| 7     | 200        | 600A; 25s; 2,5MPa                          | 457,16                                     | 35,5833   | 5,2916  | 8,1666                                     | -                             |
| 8     | 210        | 600A; 30s; 2,5MPa                          | 527,16                                     | 39,0833   | 7,0416  | 11,5000                                    | Hình 6, b                     |
| 9     | 220        | 600A; 35s; 2,5MPa                          | 513,66                                     | 38,2500   | 6,6250  | 9,4333                                     | Hình 6, c                     |
| 10    | 001        | 300A; 25s; 4,5MPa                          | 491,83                                     | 34,1666   | 4,5833  | 5,8333                                     | -                             |
| 11    | 011        | 300A; 30s; 4,5MPa                          | 530,33                                     | 38,7500   | 6,8750  | 10,1666                                    | -                             |
| 12    | 021        | 300A; 35s; 4,5MPa                          | 525,50                                     | 37,1666   | 6,0833  | 7,8666                                     | -                             |
| 13    | 101        | 450A; 25s; 4,5MPa                          | 554,16                                     | 37,6666   | 6,3333  | 8,1666                                     | -                             |
| 14    | 111        | 450A; 30s; 4,5MPa                          | 580,50                                     | 42,3333   | 8,6666  | 12,3333                                    | Hình 6, d                     |
| 15    | 121        | 450A; 35s; 4,5MPa                          | 565,66                                     | 40,1666   | 7,5833  | 10,4333                                    | -                             |
| 16    | 201        | 600A; 25s; 4,5MPa                          | 587,66                                     | 40,5000   | 7,7500  | 10,1666                                    | -                             |
| 17    | 211        | 600A; 30s; 4,5MPa                          | 628,33                                     | 45,3333   | 10,1666   | 14,3333                                    | Hình 6, e                     |
| 18    | 221        | 600A; 35s; 4,5MPa                          | 613,33                                     | 43,8333   | 9,4166  | 12,3333                                    | Hình 6, f                     |
| 19    | 002        | 300A; 25s; 6,5MPa                          | 585,16                                     | 35,6666   | 5,3333  | 5,3333                                     | -                             |
| 20    | 012        | 300A; 30s; 6,5MPa                          | 623,33                                     | 40,5000   | 7,7500  | 9,2666                                     | -                             |
| 21    | 022        | 300A; 35s; 6,5MPa                          | 612,66                                     | 39,1666   | 7,0833  | 7,1666                                     | Hình 6, g                     |
| 22    | 102        | 450A; 25s; 6,5MPa                          | 612,06                                     | 38,5000   | 6,7500  | 7,6666                                     | -                             |
| 23    | 112        | 450A; 30s; 6,5MPa                          | 642,83                                     | 43,6666   | 9,3333  | 11,6666                                    | Hình 6, h                     |
| 24    | 122        | 450A; 35s; 6,5MPa                          | 632,16                                     | 42,2500   | 8,6250  | 9,7666                                     | -                             |
| 25    | 202        | 600A; 25s; 6,5MPa                          | 635,83                                     | 41,3333   | 8,1666  | 9,8333                                     | -                             |
| 26    | 212        | 600A; 30s; 6,5MPa                          | 672,33                                     | 46,5000   | 10,7500   | 13,3333                                    | Hình 6, k                     |
| 27    | 222        | 600A; 35s; 6,5MPa                          | 654,16                                     | 44,3333   | 9,6666  | 11,6333                                    | -                             |



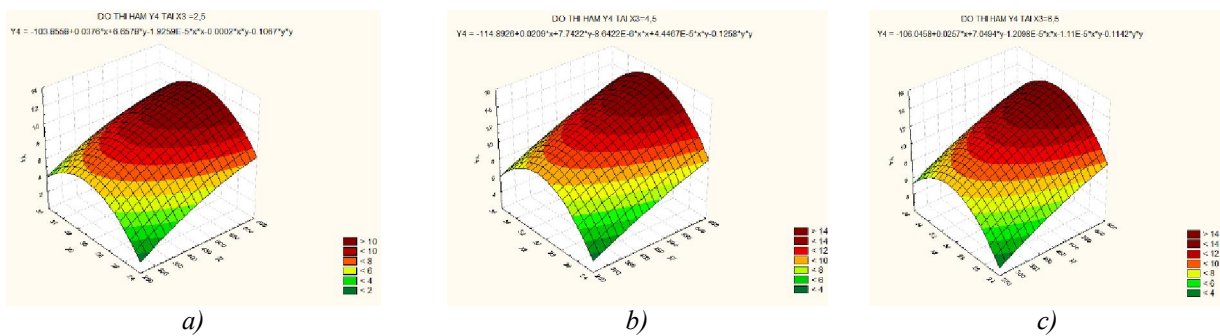
**Hình 2.** Độ bền kéo mỗi hàn điện xi áp lực  $y_1 = \sigma_K = f(I_h, T_h)$  ở chế độ  $p_h = 2,5$  MPa (a);  $p_h = 4,5$  MPa (b) và  $p_h = 6,5$  MPa (c)



**Hình 3.** Đường kính trung bình mỗi hàn điện xi áp lực  $y_2 = d_{t,b} = f(I_h, T_h)$  ở chế độ:  $p_h = 2,5$  MPa (a);  $p_h = 4,5$  MPa (b) và  $p_h = 6,5$  MPa (c)



**Hình 4.** Độ nở phình hướng kính trung bình mỗi hàn điện xi áp lực  $y_3 = \Delta d_{t,b} = f(I_h, T_h)$  ở chế độ:  $p_h = 2,5$  MPa (a);  $p_h = 4,5$  MPa (b) và  $p_h = 6,5$  MPa (c)



**Hình 5.** Độ nở phình dọc trục cốt thép hàn của mỗi hàn điện xi áp lực  $y_4 = H_{t,b} = f(I_h, T_h)$  ở chế độ:  $p_h = 2,5$  MPa (a);  $p_h = 4,5$  MPa (b) và  $p_h = 6,5$  MPa (c)

Phân tích kết quả thí nghiệm ở bảng 3 và các hình 2 ÷ 5 cho thấy đặc tính mỗi hàn như sau:  
 - Với mức áp lực hàn ( $p_h$ ) chọn ở 3 mức  $p_h = 2,5; 4,5; 6,5$  MPa, còn hai thông số chính thay đổi trong khoảng khảo sát đã chọn là cường độ dòng điện hàn  $I_h = 300 \div 600$  A và thời gian hàn  $T_h = 25 \div 35$  s, ta có kết quả mô phỏng trong không gian 3 chiều hàm mục tiêu độ bền kéo mỗi hàn  $y_1 = f(I_h, T_h) = \sigma_K$  bằng phần mềm STATISTICA cho trên hình 2, a,b,c tương ứng. Mô hình toán học nhận được tương ứng với đồ thị 3D ở hình 2 là các hàm phi tuyến bậc 2:

$$y_1 = -1482,93481 + 0,6611.I_h + 105,5694.T_h - 0,0002.I_h^2 + 0,0031.I_h.T_h - 1,6956.T_h^2$$

với  $p_h = 2,5$  MPa (3)

$$y_1 = -541,8156 + 0,5507.I_h + 59,6278.T_h + 0,0002.I_h^2 - 0,0027.I_h.T_h - 0,9344.T_h^2$$

với  $p_h = 4,5$  MPa (4)

$$y_1 = -388,1919 + 0,1861.I_h + 61,5462.T_h + 6,9383.I_h^2 - 0,0031.I_h.T_h - 0,9622.T_h^2$$

với  $p_h = 6,5$  MPa (5)

- Kết quả mô phỏng hàm mục tiêu cần tìm thứ hai là đường kính trung bình mỗi hàn  $y_2 = f(I_h, T_h) = d_{t.b}$  khi áp lực hàn chọn ở 3 mức  $p_h = 2,5; 4,5; 6,5$  MPa, còn hai thông số chính thay đổi trong khoảng khảo sát đã chọn là cường độ dòng điện hàn  $I_h = 300 \div 600$  A, thời gian hàn  $T_h = 25 \div 35$  s nhờ trợ giúp của phần mềm STATISTICA cho trên hình 3, a,b,c tương ứng. Mô hình toán học nhận được tương ứng với đồ thị 3D ở hình 3 là các hàm phi tuyến bậc 2:

$$y_2 = -99,7135 + 0,0326.I_h + 8,45.T_h - 9,877.10^{-6}.I_h^2 - 0,0002.I_h.T_h - 0,1339.T_h^2$$

với  $p_h = 2,5$  MPa và  $p_h = 6,5$  MPa (6)

$$y_2 = -91,7973 + 0,0223.I_h + 7,9778.T_h - 4,32.10^{-6}.I_h^2 + 0,0001.I_h.T_h - 0,1289.T_h^2$$

với  $p_h = 4,5$  MPa (7)

- Đồ thị 3D biểu diễn sự ảnh hưởng cặp đôi của hai thông số  $I_h$  và  $T_h$  thay đổi trong khoảng khảo sát  $I_h = 300 \div 600$  A và  $T_h = 25 \div 35$  s với 3 mức cố định  $p_h = 2,5; 4,5; 6,5$  MPa đến hàm mục tiêu cần tìm thứ 3 là độ nở phình hướng kính của mỗi hàn  $y_3 = f(I_h, T_h) = \Delta d_h$  cho trên hình 4, a,b,c tương ứng. Mô hình toán học nhận được tương ứng với đồ thị 3D ở hình 4 là các hàm phi tuyến bậc 2:

$$y_3 = -41,8466 + 0,0049.I_h + 2,8923.T_h + 2,0679.10^{-6}.I_h^2 + 1,8063.10^{-5}.I_h.T_h - 0,0465.T_h^2$$

với  $p_h = 2,5$  MPa (8)

$$y_3 = -58,8466 + 0,0112.I_h + 3,9889.T_h - 2,1604.10^{-6}.I_h^2 + 5,5553.10^{-5}.I_h.T_h - 0,0644.T_h^2$$

với  $p_h = 4,5$  MPa (9)

$$y_3 = -62,3566 + 0,0163.I_h + 4,225.T_h - 4,9384.10^{-6}.I_h^2 - 8,3333.10^{-5}.I_h.T_h - 0,0669.T_h^2$$

với  $p_h = 6,5$  MPa (10)

- Nếu chế độ hàn cho ở mức cố định áp lực hàn  $p_h = 2,5$  MPa,  $p_h = 4,5$  MPa,  $p_h = 6,5$  MPa còn hai thông số  $I_h$  và  $T_h$  thay đổi trong khoảng khảo sát  $I_h = 300 \div 600$  A và  $T_h = 25 \div 35$  s, thì đồ thị 3D biểu diễn hàm mục tiêu đầu ra là độ nở phình dọc trục cốt thép hàn  $y_4 = f(I_h, T_h) = H_{t.b}$  cho trên hình 5, a,b,c tương ứng. Mô hình toán học nhận được tương ứng với đồ thị 3D ở hình 5 là các hàm phi tuyến bậc 2:

$$y_4 = -103,8558 + 0,0376.I_h + 6,6578.T_h - 1,9259.10^{-6}.I_h^2 - 0,0002.I_h.T_h - 0,1067.T_h^2$$

với  $p_h = 2,5 \text{ MPa}$  (11)

$$y_4 = -114,8926 + 0,0209.I_h + 7,7422.T_h - 8,6422.10^{-6}.I_h^2 + 4,4467.10^{-5}.I_h.T_h - 0,1258.T_h^2$$

với  $p_h = 4,5 \text{ MPa}$  (12)

$$y_4 = -106,0458 + 0,0257.I_h + 7,0494.T_h - 1,2098.10^{-5}.I_h^2 - 1,11.10^{-5}.I_h.T_h - 0,1142.T_h^2$$

với  $p_h = 6,5 \text{ MPa}$  (13)

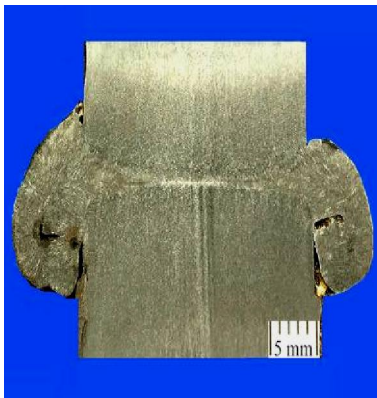
Từ các mô hình toán học trên đây có thể thấy rõ thông số áp lực hàn ( $p_h$ ) có ảnh hưởng mạnh nhất đến độ bền kéo và hình dạng của mối hàn, tiếp theo là thời gian hàn ( $T_h$ ) và cuối cùng là cường độ dòng điện hàn ( $I_h$ ). Các nhận xét trên đều trùng khớp với kết quả xây dựng đồ thị 2D đã thảo luận trong công trình [2].

### 3.2. Đặc tính tổ chức thô đại mối hàn:

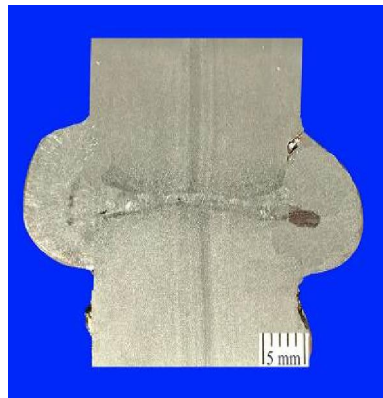
Trên hình 6, a-k dưới đây là ảnh chụp tổ chức thô đại của 09 mẫu điển hình chọn trong số 27 thí nghiệm khi điều chỉnh hai thông số công nghệ chính  $I_h = 300 \div 600 \text{ A}$ , còn thời gian hàn  $T_h = 25 \div 35 \text{ s}$  ở 3 mức áp lực hàn khác nhau ( $p_h = 2,5; 4,5$  và  $6,5 \text{ MPa}$ ). Phân tích tổ chức thô đại và hình dạng hình học của mối hàn trên hình 6 cho thấy:

+ Mẫu số 4 (mã số 100) hàn ở chế độ:  $I_h = 450 \text{ A}$ ;  $T_h = 25 \text{ s}$ ;  $p_h = 2,5 \text{ MPa}$  (hình 6, a). Tổ chức thô đại của mẫu khảo sát này ở chế độ cường độ dòng điện hàn tăng lên ở mức trung bình nhưng áp lực hàn thấp nên vẫn nhận được độ bền kéo mối hàn ở mức thấp tương tự so với 3 mẫu khảo sát đầu tiên và đạt giá trị trung bình  $\sigma_{K4} = 380,66 \text{ MPa}$ .

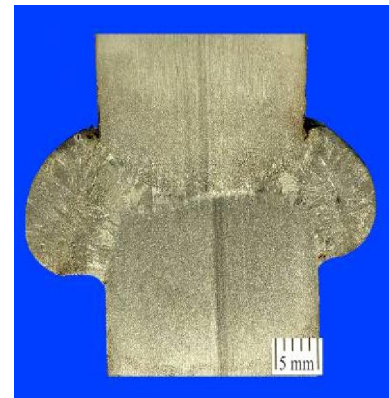
Mẫu số 8 (mã số 210:  $I_h = 600 \text{ A}$ ;  $T_h = 30 \text{ s}$ ;  $p_h = 2,5 \text{ MPa}$ ) và mẫu số 9 (mã số 220:  $I_h = 600 \text{ A}$ ;  $T_h = 35 \text{ s}$ ;  $p_h = 2,5 \text{ MPa}$ ) có tổ chức thô đại tương ứng cho trên hình 6, b và hình 6, c. Cường độ dòng điện hàn và thời gian hàn tăng lên, điều đó đảm bảo độ bền kéo của mối hàn khá cao và đạt giá trị bằng  $\sigma_{K8} = 527,16 \text{ MPa}$  và  $\sigma_{K9} = 513,66 \text{ MPa}$ . Những chế độ hàn điện xỉ - áp lực trong các thí nghiệm này cho thấy cơ tính mối hàn gần đạt mức độ bền vật liệu cơ bản của cốt thép hàn sử dụng;



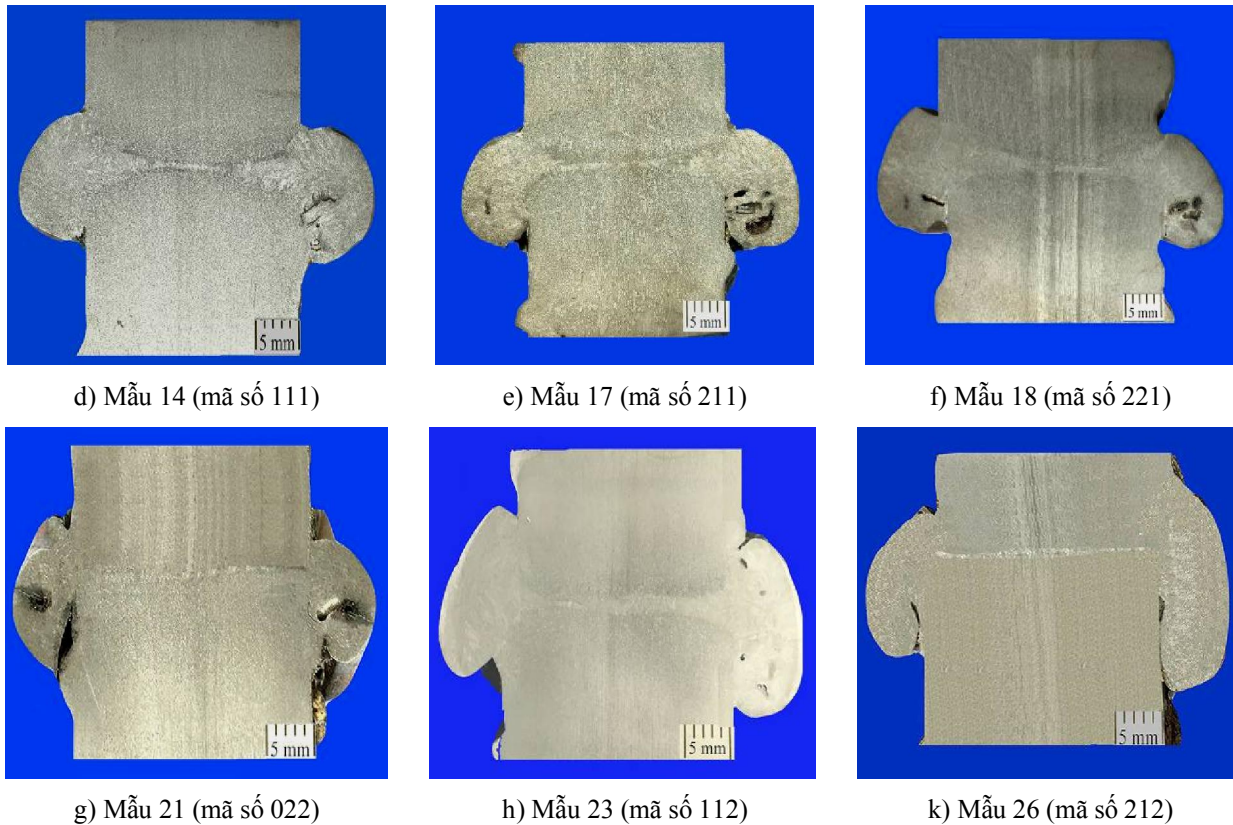
a) Mẫu 4 (mã số 100)



b) Mẫu 8 (mã số 210)



c) Mẫu 9 (mã số 220)



**Hình 6.** Ảnh tổ chức thô đại mối hàn điện xỉ - áp lực trên một số mẫu điển hình nhận được theo quy hoạch thực nghiệm N27

+ Mẫu số 14 (mã số 111):  $I_h = 450$  A;  $T_h = 30$  s và  $p_h = 4,5$  MPa (hình 6, d). Mẫu số 17 (mã số 211):  $I_h = 600$  A;  $T_h = 30$  s và  $p_h = 4,5$  MPa (hình 6, e), còn mẫu số 18 (mã số 221):  $I_h = 600$  A;  $T_h = 35$  s và  $p_h = 4,5$  MPa (hình 6, f). Tổ chức thô đại của 3 mẫu khảo sát này có đặc tính cấu trúc mối hàn rất tốt: các vùng vật liệu nở phình đã đi ra phía ngoài đường kính danh nghĩa cốt thép hàn, còn tổ chức vật liệu trong trung tâm mối hàn đều là liên kết kim loại không có khuyết tật. Điều đó cho thấy ở các chế độ hàn này, khi tăng áp lực hàn, độ bền kéo mối hàn tăng lên cao và đạt yêu cầu về độ bền kéo của vật liệu cơ bản với các giá trị tương ứng là  $\sigma_{K14} = 580,5$  MPa;  $\sigma_{K17} = 628,33$  MPa và  $\sigma_{K18} = 613,33$  MPa;

+ Mẫu số 21 (mã số 022):  $I_h = 300$  A;  $T_h = 35$  s và  $p_h = 6,5$  MPa (hình 6, g). Mẫu số 23 (mã số 112):  $I_h = 450$  A;  $T_h = 30$  s và  $p_h = 6,5$  MPa (hình 6, h), Mẫu số 26 (mã số 212):  $I_h = 600$  A;  $T_h = 30$  s và  $p_h = 6,5$  MPa (hình 6, k). Tổ chức thô đại của 3 mẫu khảo sát này nhận được có đặc tính cấu trúc mối hàn rất tốt: Vùng cấu trúc vật liệu trong trung tâm mối hàn màu sáng có chiều dày nhỏ và đều là liên kết kim loại không có khuyết tật, còn các vùng vật liệu nở phình ít khuyết tật do có biến dạng dẻo tốt hơn so với các mẫu khảo sát ở trên. Như vậy, khi tăng áp lực hàn lên cao, độ bền kéo mối hàn tăng lên rất cao và đạt các giá trị tương ứng là  $\sigma_{K23} = 642,83$  MPa;  $\sigma_{K25} = 635,83$  MPa và  $\sigma_{K26} = 672,33$  MPa.

#### 4. KẾT LUẬN

1) Bằng phương pháp mô hình hóa toán học đặc tính bền của mối hàn điện xỉ - áp lực thông qua bộ tiêu chí đánh giá gồm độ bền kéo dọc trục cốt thép hàn, hình dạng mối hàn được quy định



bởi các kích thước hình học xác định đường kính hàn trung bình, độ nở phình hướng kính và độ nở phình dọc trục trên 27 mẫu thí nghiệm nhận được theo quy hoạch thực nghiệm trực giao kiểu N27, đã làm rõ sự ảnh hưởng của 3 thông số công nghệ hàn điện xỉ - áp lực chính ( $I_h$ ,  $T_h$  và  $p_h$ ) đến 4 hàm mục tiêu đầu ra cần tìm lựa chọn ( $y_1 = \sigma_K$ ;  $y_2 = d_{t,b}$ ;  $y_3 = \Delta d_h$  và  $y_4 = H_{t,b}$ ) với quy luật hàm đa thức bậc 2 một cách trực quan ở dạng 3D. Các số liệu thực nghiệm cho thấy thông số áp lực hàn ( $p_h$ ) có ảnh hưởng mạnh nhất đến các hàm mục tiêu đầu ra, tiếp theo đó là thời gian hàn ( $T_h$ ) và cuối cùng là cường độ dòng điện hàn ( $I_h$ );

2) Kết quả nghiên cứu khảo sát và chụp ảnh tổ chức thô đại của mối hàn trên một số mẫu điển hình nhận được ở 3 mức áp lực hàn khác nhau ( $p_h = 2,5; 4,5; 6,5$  MPa) trong giới hạn miền điều chỉnh của hai thông số  $I_h$  và  $T_h$  đã chọn trong điều kiện quy hoạch thực nghiệm đã giải thích rõ về cơ chế hình thành mối hàn điện xỉ - áp lực, đồng thời minh chứng cho thấy về cơ bản quy luật ảnh hưởng của các thông số công nghệ chính đến các hàm mục tiêu đầu ra lựa chọn trùng khớp với những nhận xét đánh giá được đưa ra trong các công trình [1] và [2] của nhóm nghiên cứu đã công bố;

3) Thông qua các mô hình toán học biểu diễn quan hệ giữa chế độ hàn với hàm mục tiêu đầu ra theo công thức (3) ÷ (13), có thể dễ dàng điều khiển quá trình công nghệ hàn điện xỉ - áp lực trên thiết bị hàn được tích hợp thêm mô đun điều khiển tự động thời gian hàn, áp lực hàn cải tiến, đảm bảo độ chính xác cao để nhận được chất lượng mối hàn với đặc tính bền và hình dạng mối hàn tốt nhất, phù hợp với nhiều định mức yêu cầu kỹ thuật về chịu tải trong kết cấu cốt thép chịu lực của công trình xây dựng cơ bản ở Việt Nam.

## LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả cảm ơn sự hỗ trợ của Viện Nghiên cứu Cơ khí, Viện Khoa học vật liệu thuộc Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Viện IDAT, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội trong nghiên cứu và Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội trong công bố tại Diễn đàn Hội nghị.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Hoàng Đức Long, Hà Minh Hùng (2018): Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ hàn điện xỉ - áp lực đến tính chất cơ học và tổ chức thô đại mối hàn, *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, số 5, T5/2018;

[2]. Hoàng Đức Long, Hà Minh Hùng, Lê Đức Bảo, Nguyễn Văn Đức (2018): Thực nghiệm xác định ảnh hưởng của chế độ hàn điện xỉ - áp lực đến đặc tính mối hàn cốt thép xây dựng, *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*, số 6, T6/2018;

[3]. Ха Минь Хунг (1991): “Разработка и внедрение промышленной технологии получения взрывом антифрикционных композиционных материалов для подшипников скольжения“, *Московский ордена октябрьской революции и ордена трудового красного знамени Институт Стали и Сплавов*, дисс. кандидата техн. наук, Москва, 269 стр.;

[4]. Ха Минь Хунг, Орлов М. И. (1993): “Разработка математической модели процесса сварки взрывом антифрикционных листов сталь+бронза, сталь+алюминиевые сплавы”, Москва, *Известия вузов, Черная металлургия*, No 5.