

## LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan ngoại trừ các số liệu được trích dẫn từ tài liệu tham khảo thì nội dung còn lại là công trình nghiên cứu và tính toán của riêng tôi, các số liệu tính toán là trung thực và chưa từng được ai công bố. Nếu sai tôi xin hoàn toàn chịu trách nhiệm.

*Nam Định, ngày ..... tháng ..... năm 2021*

*Người cam đoan*

**Hoàng Minh Hùng**

**TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT NAM ĐỊNH**

## MỤC LỤC

|   |           |
|---|-----------|
| LỜI CAM ĐOAN .....  | i         |
| MỤC LỤC .....   | ii        |
| DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT.....   | v         |
| DANH MỤC CÁC BẢNG .....   | vi        |
| DANH MỤC CÁC HÌNH ẢNH, ĐỒ THỊ.....  | vii       |
| <b>MỞ ĐẦU</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>1. Lý do chọn đề tài</b> .....   | <b>1</b>  |
| <b>2. Lịch sử nghiên cứu</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>3. Mục đích nghiên cứu</b> .....   | <b>2</b>  |
| <b>4. Nội dung nghiên cứu</b> .....   | <b>2</b>  |
| <b>5. Phương pháp nghiên cứu</b> .....  | <b>2</b>  |
| <b>6. Lời cảm ơn</b> .....  | <b>2</b>  |
| <b>CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN VỀ NHÔM VÀ HỢP KIM NHÔM</b> .....                             | <b>3</b>  |
| <b>1.1 Tình hình nghiên cứu trong nước và nước ngoài</b> .....                      | <b>3</b>  |
| 1.1.1 Tình hình nghiên cứu ở nước ngoài .....                                       | 3         |
| 1.1.2 Tình hình nghiên cứu trong nước .....   | 4         |
| <b>1.2 Tổng quan về vật liệu nhôm và hợp kim nhôm</b> .....                         | <b>5</b>  |
| 1.2.1 Đặc điểm công nghệ của nhôm và hợp kim nhôm, phạm vi ứng dụng của chúng ..... | 5         |
| 1.2.2 Tính hàn của nhôm và hợp kim nhôm.....  | 7         |
| <b>1.3 Các phương pháp hàn nhôm và hợp kim nhôm</b> .....                           | <b>8</b>  |
| 1.3.1 Hàn hồ quang que hàn thuốc bọc (SMAW) .....                                   | 8         |
| 1.3.2 Hàn TIG (GTAW) .....  | 8         |
| 1.3.3 Hàn MIG (GMAW).....   | 9         |
| <b>Kết luận chương 1</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>CHƯƠNG 2 CÔNG NGHỆ VÀ QUÁ TRÌNH LUYỆN KIM KHI HÀN HỢP KIM NHÔM</b> .....         | <b>12</b> |
| <b>2.1 Công nghệ hàn nhôm và hợp kim nhôm</b> .....                                 | <b>12</b> |
| <b>2.2 Đặc điểm</b> .....   | <b>12</b> |
| <b>2.3 Các thông số công nghệ</b> .....   | <b>13</b> |
| 2.3.1. Cường độ dòng điện hàn (tốc độ đẩy dây hàn) .....                            | 13        |
| 2.3.2. Điện áp hàn.....   | 13        |
| 2.3.3. Lưu lượng khí bảo vệ .....   | 14        |
| 2.3.4. Đường kính dây hàn .....   | 14        |
| 2.3.5. Vận tốc hàn.....   | 14        |
| 2.3.6. Chiều dài phân nhô ra của dây hàn (độ nhú của điện cực).....                 | 14        |
| <b>2.4 Ứng suất dư</b> .....  | <b>16</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>2.5 Vật liệu hàn.....</b>   | <b>17</b> |
| 2.5.1. Khí bảo vệ.....   | 17        |
| 2.5.2. Dây hàn.....  | 17        |
| <b>Kết luận chương 2.....</b>  | <b>18</b> |
| <b>Chương 3 TRƯỜNG NHIỆT ĐỘ TRONG HÀN HỒ QUANG .....</b>                   | <b>19</b> |
| <b>3.1 Các vấn đề nhiệt trong quá trình hàn .....</b>                      | <b>19</b> |
| <b>3.2 Các loại nguồn nhiệt trong hàn .....</b>                            | <b>20</b> |
| 3.2.1 Dẫn nhiệt .....  | 20        |
| 3.2.2 Một số nguồn nhiệt hàn .....   | 24        |
| <b>3.3 Giới thiệu nguồn nhiệt khi hàn tấm mỏng.....</b>                    | <b>32</b> |
| <b>3.4 Trường nhiệt độ .....</b>   | <b>36</b> |
| <b>3.5 Sự phân bố nhiệt độ ở trạng thái giả ổn định.....</b>               | <b>38</b> |
| 3.5.1 Nguồn nhiệt di động.....   | 40        |
| 3.5.2 Nghiệm tổng quát cho trường hợp hàn tấm dày.....                     | 41        |
| 3.5.3 Nghiệm tổng quát cho trường hợp hàn tấm mỏng .....                   | 47        |
| <b>Kết luận chương 3.....</b>  | <b>52</b> |
| <b>CHƯƠNG 4 MÔ PHỎNG SỐ LIÊN KẾT HÀN GÓC CHỮ T BẰNG PHẦN</b>               |           |
| <b>MỀM SYSWELD .....</b>   | <b>53</b> |
| <b>4.1 Giới thiệu Sysweld.....</b>   | <b>53</b> |
| <b>4.2 Tính toán, mô phỏng ứng suất, biến dạng trong liên kết hàn nhôm</b> |           |
| <b>A5083 bằng PP.PTHH .....</b>  | <b>55</b> |
| 4.2.1 Tính toán mô phỏng bài toán nhiệt - đàn hồi - dẻo bằng PP.PTHH ..... | 55        |
| 4.2.2 Ứng dụng PP. PTHH trong mô phỏng tính toán liên kết hàn.....         | 60        |
| 4.2.3 Mô phỏng số liên kết hàn góc chữ T hợp kim nhôm A5083.....           | 61        |
| <b>4.3 Mô phỏng quá trình hàn trên phần mềm Sysweld .....</b>              | <b>64</b> |
| 4.3.1 Giới thiệu.....  | 64        |
| 4.3.2 Thông số quá trình hàn và mô phỏng .....                             | 65        |
| 4.3.3 Tính chất cơ lý hóa của hợp kim nhôm A5083 .....                     | 65        |
| <b>4.4 Mô hình hóa và mô phỏng số .....</b>                                | <b>68</b> |
| 4.4.1 Mô hình hóa.....   | 68        |
| 4.4.2 Xây dựng mô hình phần tử hữu hạn (FEM).....                          | 69        |
| 4.4.2 Mô phỏng số.....   | 70        |
| <b>4.5 Kế quả mô phỏng .....</b>   | <b>72</b> |
| 4.5.1. Trường nhiệt độ .....   | 72        |
| 4.5.2. Biến dạng hàn .....   | 74        |
| 4.5.3. Ứng suất dư .....   | 75        |
| <b>Kết luận chương 4:.....</b>   | <b>79</b> |
| <b>KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ .....</b>   | <b>80</b> |
| <b>TÀI LIỆU THAM KHẢO .....</b>  | <b>81</b> |

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT NAM ĐỊNH

## DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

| TT | Kí hiệu/<br>chữ viết tắt | Ý nghĩa  |
|----|--------------------------|--|
| 1  | KLCB                     | Kim loại cơ bản  |
| 2  | KLMH                     | Kim loại mối hàn   |
| 3  | HAZ                      | Vùng ảnh hưởng nhiệt   |
| 4  | $I_h$                    | Cường độ dòng điện hàn   |
| 5  | $U_h$                    | Điện áp hàn  |
| 6  | $V_h$                    | Vận tốc hàn  |
| 7  | MIG (GMAW)               | Hàn hồ quang trong môi trường khí bảo vệ với điện cực nóng chảy (Metal Inert Gas)          |
| 8  | TIG (GTAW)               | Hàn hồ quang trong môi trường khí bảo vệ với điện cực không nóng chảy (Tungsten Inert Gas) |
| 9  | SMAW(MMA)                | Hàn hồ quang que hàn thuốc bọc (Submerged Metal Arc Welding)                               |
| 10 | Ar                       | Khí bảo vệ argon   |
| 11 | He                       | Khí bảo vệ heli  |
| 12 | AC                       | Dòng điện xoay chiều   |
| 13 | DC                       | Dòng điện một chiều  |
| 14 | B                        | Bề rộng mặt lõi mối hàn  |
| 15 | H                        | Chiều cao mặt lõi mối hàn  |
| 16 | B                        | Bề rộng mặt đáy của mối hàn  |
| 17 | H                        | Chiều cao mặt đáy của mối hàn  |

## DANH MỤC CÁC BẢNG

|   |    |
|---|----|
| Bảng 1. 1 Cơ tính hợp kim nhôm 5083.....                    | 6  |
| Bảng 1. 2 Thành phần hóa học hợp kim nhôm 5083.....         | 7  |
| Bảng 2. 1 Bảng chế độ hàn góc chữ T hợp kim nhôm A5083..... | 16 |
| Bảng 2. 2 Các loại dây dùng cho hàn MIG nhôm.....           | 17 |
| Bảng 3. 1 Sơ đồ cân bằng nhiệt khi hàn GMAW.....            | 20 |
| Bảng 4. 1 Mô hình nguồn nhiệt theo Goldak .....             | 65 |
| Bảng 4. 2 Thông số mô phỏng hàn.....                        | 65 |
| Bảng 4. 3 Cơ tính hợp kim nhôm A5083.....                   | 66 |
| Bảng 4. 4 Thành phần hóa học hợp kim nhôm A5083.....        | 66 |
| Bảng 4. 5 Kết quả biến dạng mô phỏng và thực nghiệm .....   | 75 |

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT NAM ĐỊNH

## DANH MỤC CÁC HÌNH ẢNH, ĐỒ THỊ

|  |    |
|--|----|
| Hình 1. 1 Sơ đồ nguyên lý phương pháp hàn hồ quang que hàn thuốc bọc ..... | 8  |
| Hình 1. 2 Sơ đồ nguyên lý phương pháp hàn TIG .....                        | 8  |
| Hình 1. 3 Sơ đồ nguyên lý phương pháp hàn MIG .....                        | 9  |
| Hình 2. 1 Quan hệ của dòng điện hàn và tốc độ cấp dây .....                | 13 |
| Hình 2. 2 Các dạng dịch chuyển kim loại vào bể hàn .....                   | 14 |
| Hình 2. 3 Độ hòa tan của $H_2$ trong KLCB .....                            | 15 |
| Hình 2. 4 Phân bố ứng suất dư trong liên kết hàn góc chữ T .....           | 16 |
| Hình 3. 1 Phương và chiều của grad T .....                                 | 21 |
| Hình 3. 2 Nguồn nhiệt điểm tức thời trong vật thể bán vô hạn .....         | 25 |
| Hình 3. 3 Nguồn nhiệt đường tức thời trong vật thể bán vô hạn .....        | 26 |
| Hình 3. 4 Nguồn nhiệt phẳng tức thời trong vật bán vô hạn .....            | 27 |
| Hình 3. 5 Nguồn nhiệt phẳng theo chuẩn phân bố Gauss .....                 | 29 |
| Hình 3. 6 Mô hình nguồn nhiệt ellipsoid .....                              | 30 |
| Hình 3. 7 Nguồn nhiệt đường di chuyển trong tấm mỏng .....                 | 33 |
| Hình 3. 8 Sự phân bố nhiệt hàn trong tấm mỏng .....                        | 34 |
| Hình 3. 9 Nguồn nhiệt trong hàn GMAW .....                                 | 37 |
| Hình 3. 10 Tương quan giữa vị trí và nhiệt độ, [2] .....                   | 38 |
| Hình 3. 11 Ba trạng thái cơ bản trong hàn hồ quang .....                   | 39 |
| Hình 3. 12 Mô hình nguồn nhiệt di động .....                               | 40 |
| Hình 3. 13 Nguồn nhiệt điểm di động trong tấm bán vô hạn, Grong .....      | 41 |
| Hình 3. 14 Nguồn nhiệt 3D trong tấm dày, Rosenthal .....                   | 42 |
| Hình 3. 15 Đường bao đẳng nhiệt .....                                      | 45 |
| Hình 3. 16 Nguồn nhiệt đường di chuyển trong tấm mỏng .....                | 48 |
| Hình 3. 17 Sự phân bố nhiệt hàn trong tấm mỏng .....                       | 49 |
| Hình 4. 1 Cấu trúc của Sysweld .....                                       | 53 |
| Hình 4. 2 Giao diện khởi động của Sysweld .....                            | 53 |
| Hình 4. 3 Khởi động vào module Welding Advisor và các công cụ chính .....  | 54 |
| Hình 4. 4 Quá trình mô phỏng một bài toán hàn .....                        | 54 |
| Hình 4. 5 Các bước xây dựng dạng hình học tính toán .....                  | 60 |
| Hình 4. 6 Một số mô hình vật thể lý tưởng .....                            | 61 |
| Hình 4. 7 Trình tự lựa chọn quá trình mô phỏng .....                       | 61 |
| Hình 4. 8 Các chương trình con trong mô phỏng hàn .....                    | 62 |

|  |    |
|--|----|
| Hình 4. 9 Mô hình nguồn nhiệt hàn MIG .....  | 65 |
| Hình 4. 10 Giới hạn chảy theo các pha của hợp kim nhôm A5083 .....                   | 66 |
| Hình 4. 11 Hệ số dẫn nhiệt của hợp kim nhôm A5083 .....                              | 66 |
| Hình 4. 12 Khối lượng riêng của hợp kim nhôm A5083 .....                             | 67 |
| Hình 4. 13 Nhiệt dung riêng của hợp kim nhôm A5083 .....                             | 67 |
| Hình 4. 14 Mô đun Young của hợp kim nhôm A5083.....                                  | 67 |
| Hình 4. 15 Thiết kế mối ghép hàn hợp kim nhôm A5083 .....                            | 68 |
| Hình 4. 16 Bố trí các mối hàn .....  | 68 |
| Hình 4. 17 Kiểu lưới phần tử a) Phần tử 1-D; (b, c) Phần tử 2-D; d) Phần tử 3-D..... | 69 |
| Hình 4. 18 Vùng chia lưới và kiểu lưới.....  | 70 |
| Hình 4. 19 Lớp vỏ trao đổi nhiệt.....  | 70 |
| Hình 4. 20 Quỹ đạo đường hàn và đường dẫn .....                                      | 71 |
| Hình 4. 21 Mô hình gá kẹp.....   | 72 |
| Hình 4. 22 Hình dạng bề hàn.....   | 72 |
| Hình 4. 23 Phân bố nhiệt độ sau 1000s .....  | 73 |
| Hình 4. 24 Chiều sâu ngấu hàn .....  | 73 |
| Hình 4. 25 So sánh chiều sâu ngấu giữa thực nghiệm và mô phỏng.....                  | 73 |
| Hình 4. 26 Sự biến thiên nhiệt độ tại nút 18536 và 4786 .....                        | 74 |
| Hình 4. 27 Biến dạng tổng.....   | 74 |
| Hình 4. 28 Biến dạng cạnh tấm không kẹp (mô phỏng và thực nghiệm) .....              | 75 |
| Hình 4. 29 Phân bố ứng suất Von mises .....  | 75 |
| Hình 4. 30 Phân bố ứng suất pháp theo X .....  | 76 |
| Hình 4. 31 Phân bố ứng suất pháp theo Y .....  | 76 |
| Hình 4. 32 Phân bố ứng suất pháp theo Z.....   | 77 |
| Hình 4. 33 Phân bố ứng suất tiếp theo phương X .....                                 | 77 |
| Hình 4. 34 Phân bố ứng suất dư dọc đường hàn theo Y.....                             | 77 |
| Hình 4. 35 Phân bố ứng suất dư theo phương Z.....                                    | 78 |



## MỞ ĐẦU

### 1. Lý do chọn đề tài

Ngày nay cùng với sự phát triển không ngừng của khoa học kỹ thuật thì hàng loạt các vật liệu mới đã ra đời. Cho đến nay vật liệu được sử dụng trong các ngành là rất đa dạng về chủng loại và tính công nghệ. Cùng với đó nhu cầu của con người về năng suất, chất lượng và tính thẩm mỹ của sản phẩm ngày càng được nâng cao. Nhôm và hợp kim nhôm hiện đang được ứng dụng rộng rãi trong xây dựng, hàng không và công nghiệp tàu biển. Vì vậy ngành công nghệ hàn cũng phải nghiên cứu để tìm ra những công nghệ nhằm đáp ứng thực tế đó. Kết quả là hàng loạt công nghệ hàn ra đời, trong đó có công nghệ hàn MIG nhôm và hợp kim nhôm đang từng bước được áp dụng rộng rãi ở nước ta.

Quá trình hàn MIG nhôm và hợp kim nhôm có các ưu điểm: thời gian duy trì hồ quang dài, tốc độ đắp lớn, không bị tổn thất đầu mẫu que hàn nhiều so với hàn hồ quang tay; mức độ bắn tóe thấp. Với các ưu điểm của mình thì công nghệ hàn MIG nhôm và hợp kim nhôm ngày càng được áp dụng trong thực tiễn. Nhưng hàn MIG nhôm và hợp kim nhôm là một phương pháp hàn tương đối mới ở nước ta, việc nghiên cứu, ứng dụng công nghệ này vào thực tế sản xuất còn rất hạn chế. Vì vậy, để có cơ sở đánh giá chất lượng mỗi hàn việc nghiên cứu ảnh hưởng của thông số cơ bản đến kích thước và hình dạng của mỗi hàn thực hiện bằng công nghệ hàn MIG nhôm và hợp kim nhôm là hết sức cần thiết và có ý nghĩa thực tiễn cao.

### 2. Lịch sử nghiên cứu

Từ nhiều năm nay, hợp kim nhôm được ứng dụng khá rộng rãi trên toàn thế giới ở các lĩnh vực như xây dựng, hàng không, dầu khí, đóng tàu,...Rất nhiều các công ty, tập đoàn lớn cũng đã nghiên cứu quy trình công nghệ hàn và sản xuất vật liệu hàn cho các hợp kim nhôm như: Huyndai, Miller, lincol,... Ở nước ta hợp kim nhôm được áp dụng rộng rãi trong xây dựng từ nhiều năm nay còn trong công nghiệp tàu thủy thì mới áp dụng hợp kim nhôm để đóng mới tàu tuần tra, cabin tàu thủy từ một vài năm gần đây.

Năm 2015 tác giả Dương Đình Hảo cùng các cộng sự đã nghiên cứu về quá trình hàn ma sát khuấy áp dụng với hợp kim nhôm AA7075 áp dụng cho ngành công nghiệp tàu thủy.

Bản thân tác giả cũng đã trực tiếp nghiên cứu và thi công cabin tàu tuần tra bằng hợp kim nhôm 5052, 5083 tại nhà máy đóng tàu Nguyễn Văn Tuấn, công ty TNHH 1 thành viên đóng tàu Thịnh Long bằng công nghệ hàn TIG, MIG vào năm 2015-2016.

### **3. Mục đích nghiên cứu**

Đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ hàn đến cơ tính và tổ chức của mối hàn hàn góc chữ T vật liệu hợp kim nhôm A5083 thực hiện bằng công nghệ hàn hàn MIG nhằm ứng dụng vào sản xuất một cách có hiệu quả.

### **4. Nội dung nghiên cứu**

- Tổng quan về công nghệ hàn nhôm và hợp kim nhôm.
- Công nghệ và quá trình luyện kim khi hàn nhôm và hợp kim nhôm 5083 bằng phương pháp hàn MIG.
- Mô phỏng quá trình hàn nhôm và hợp kim nhôm A5083 bằng phương pháp PTHH.
- Nghiên cứu thực nghiệm so sánh biến dạng với mô phỏng.

### **5. Phương pháp nghiên cứu**

Nghiên cứu lý thuyết; nghiên cứu công nghệ hàn MIG nhôm và hợp kim nhôm và các thông số công nghệ hàn; thiết bị hàn MIG; vật liệu hàn nhôm và hợp kim nhôm; tiêu chuẩn hàn nhôm và hợp kim nhôm.

Nghiên cứu mô phỏng liên kết hàn góc chữ T, 2 phía hợp kim nhôm A5083.

### **6. Lời cảm ơn**

Em xin chân thành cảm ơn sự hướng dẫn và giúp đỡ nhiệt tình của Thầy TS Nguyễn Hồng Thanh, Các Thầy cô trong Bộ môn Kỹ thuật cơ khí trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định. Tác giả cũng xin trân trọng cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Nam Định đã tạo điều kiện cơ sở vật chất để tác giả thực hiện các thí nghiệm để hoàn thành luận văn này!

*Nam Định, ngày ..... tháng ..... năm 2021*

**Học viên**

**Hoàng Minh Hùng**

## CHƯƠNG 1

### TỔNG QUAN VỀ NHÔM VÀ HỢP KIM NHÔM

#### 1.1 Tình hình nghiên cứu trong nước và nước ngoài

##### 1.1.1 Tình hình nghiên cứu ở nước ngoài

Sanjeev kumar và cộng sự, đã ứng dụng công nghệ hàn TIG thường vào hàn nhôm tấm có chiều dày lớn và áp dụng công nghệ hàn TIG xung khi hàn tấm có chiều dày (3÷5mm) với dòng điện hàn trong khoảng từ 48÷112A, lưu lượng khí bảo vệ từ 7÷15 lít/ phút. Ứng suất cắt của KLMH (73MPa) nhỏ hơn KLCB (85 MPa). Từ việc phân tích các mẫu hàn dưới kính hiển vi, các tác giả nhận thấy rằng kim loại đắp (KLD) có cấu trúc dạng nhánh cây, đồng trục dọc theo đường viền chảy và sự phá hủy mẫu thử nằm ở khu vực này.

Indira Rani và cộng sự đã nghiên cứu cơ tính của hợp kim nhôm AA khi hàn TIG không xung và có xung (thay đổi tần số xung). Tác giả chỉ nghiên cứu dòng hàn trong khoảng 70÷74 A và vận tốc hàn 700÷ 60 mm/ phút, tần số xung 3 và 7 Hz. Từ kết quả thực nghiệm nhóm tác giả đã công bố rằng giới hạn chảy và giới hạn bền kéo của KLMH và KLCB gần giống nhau. Mẫu thử kéo cho kết quả đứt tại vùng HAZ.

Ahmed Khalid Hussain và cộng sự đã nghiên cứu ảnh hưởng của vận tốc hàn đến giới hạn bền kéo khi hàn TIG hợp kim nhôm AA6351 với chiều dày 4 mm. Mỗi ghép vát kiểu chữ V, vận tốc hàn 1800 ÷7200 mm/phút. Kết quả thử kéo cho thấy rằng khu vực mối hàn và lân cận mối hàn cho giá trị nhỏ hơn vùng KLCB và giới hạn bền kéo tăng lên khi vận tốc hàn giảm xuống.

Norman và cộng sự đã nghiên cứu tổ chức tế vi của hợp kim Al-Mg-Cu- Mn trong phạm vi chế độ hàn rộng (dòng điện hàn từ 100 ÷ 190 A), tốc độ hàn thay đổi từ 420 ÷ 1500 mm/ phút. Tổ chức tế vi quan sát được ở vùng trung tâm mối hàn khi làm nguội với tốc độ lớn so sánh với tổ chức tế vi tại vùng viền chảy. Norman đã đưa ra kết luận rằng nếu tốc độ hàn tăng, tốc độ nguội ở vùng KLMH tăng thì tổ chức tế vi tại vùng KLMH có dạng hình nhánh cây nhưng kích thước nhỏ hơn.

Kumar and Sundarrajan đã nghiên cứu công nghệ hàn TIG xung khi hàn hợp kim nhôm AA có chiều dày 2,14 mm với dòng điện hàn (40 ÷ 90 A), vận tốc hàn (210 ÷ 230 mm/ phút). Tác giả đã sử dụng phương pháp Taguchi để tối ưu hóa các thông số chế độ hàn TIG xung với mục đích làm tăng cơ tính của KLMH.

Preston và cộng sự đã sử dụng kỹ thuật mô phỏng số để dự đoán ứng suất dư và biến dạng phụ thuộc vào giới hạn chảy của hợp kim nhôm A2024 có chiều dày 3,2 mm bằng phương pháp hàn TIG.

Krzysztof Dudzik đã đưa ra kết quả nghiên cứu về các tính chất cơ học của liên kết hàn hợp kim nhôm 5083 bằng phương pháp hàn MIG. Để so sánh hợp kim 5083 hiện đang được sử dụng trong công nghiệp đóng tàu với hợp kim nhôm 5059 là hợp kim có độ bền cao. Tác giả đã nghiên cứu về công nghệ hàn MIG để áp dụng cho các liên kết hàn hợp kim nhôm. Trong nghiên cứu của mình, tác giả đã đưa ra bộ thông số chế độ hàn và hàn thực nghiệm. Sau đó kiểm tra cơ tính và đánh giá kết quả theo tiêu chuẩn PN-EN10002:2004 của Balan. Mục tiêu chính của tác giả là khẳng định việc sử dụng phương pháp hàn MIG để hàn hợp kim nhôm cho chất lượng đảm bảo theo tiêu chuẩn PN-EN10002:2004 của Balan và cho năng suất cao hơn nhiều so với hàn TIG.

Hội nghị quốc tế lần thứ 6 về "Cơ tin và Kỹ thuật ảo" diễn ra trong 2 ngày 15, 16 tháng 10 năm 2015 tại Braşov, Romania. Polixenia Iuliana Simion cùng các cộng sự đã trình bày về quy trình hàn MIG hợp kim nhôm áp dụng trên các cabin tàu thủy trong ngành công nghiệp đóng tàu. Trong nghiên cứu này tác giả đã đưa ra được các thuộc tính vật liệu của hợp kim nhôm 5083 và 6061 đồng thời áp dụng công nghệ hàn MIG sử dụng khí bảo vệ Ar để hàn các hợp kim nói trên. Tác giả đánh giá độ ngẫu của liên kết hàn góc và giáp môi. Đồng thời đánh giá mức độ ảnh hưởng của xung đơn và xung kép đến chất lượng hàn.

### **1.1.2 Tình hình nghiên cứu trong nước**

Là một bước đột phá trong công nghệ đóng tàu cao tốc vỏ hợp kim nhôm ở Việt Nam, năm 1997, Công ty 189 chế tạo thành công tàu tuần tra cao tốc vỏ nhôm mang ký hiệu ST 112 cho Bộ Tư Lệnh Bộ đội Biên Phòng.

Theo sau sản phẩm tàu hợp kim nhôm ST112, năm 1997, Công ty chế tạo hàng loạt xuồng cao tốc vỏ hợp kim nhôm mang ký hiệu thiết kế ST450, ST520, ST660, ST570, ST700, ST650, ST750, ST750-CN, ST750CNX, ST737, ST850, ST880, ST900, ST920, ST1200, ST740, SD530, SD420 cho Các Bộ và các ngành để phục vụ cho các chương trình kiểm tra phòng chống bão lụt, tuần tra, cứu hộ cứu nạn, đồ bộ và du lịch. Tất cả sản phẩm trên đã được kiểm nghiệm qua thực tế khai thác sử dụng, được các thị trường khó tính đánh giá cao về chất lượng và tính năng sử dụng.

Không chỉ thành công trong việc chế tạo các sản phẩm xuồng cao tốc vỏ hợp kim nhôm, Công ty 189 còn thành công trong việc chế tạo hàng loạt tàu tuần tra quân sự tiên tiến (tàu tuần tra ST126 của Bộ Công an, tàu tuần tra ST112 của Bộ đội Biên phòng, tàu tuần tra DS197 của Tổng cục Hải quan, tàu tuần tra ST146 của Biên phòng ...), tàu chở khách (tàu KT01 của Huyện đảo Cô Tô, tàu vỏ hợp kim nhôm cao tốc 100 khách Bạch Long (ST138) của Ban QLDA Bạch Long Vĩ...) và

hàng loạt các loại tàu khác như tàu đo đạc địa chính, tàu khảo sát thủy văn...

Năm 2001, đánh dấu một bước phát triển vượt bậc của Công ty 189 bằng việc Công ty đã chế tạo thành công tàu cảnh sát biển cao tốc vỏ hợp kim nhôm mang ký hiệu thiết kế TT120 cho lực lượng Cảnh sát Biển Việt Nam – đây là tàu tuần tra cao tốc vỏ hợp kim nhôm có giá trị và qui mô lớn được đóng lắp tại Việt Nam và sản phẩm tàu TT120 đã được Thủ trưởng Bộ và các cơ quan chức năng đánh giá cao cả về chất lượng, thẩm mỹ và đáp ứng được các tính năng kỹ chiến thuật được duyệt (hiện nay Công ty đã xuất xưởng được đến chiếc tàu thứ 8).

Không chỉ thành công trong lĩnh vực đóng tàu tuần tra cao tốc phục vụ công tác quốc phòng, trong lĩnh vực đóng mới tàu khách, tàu du lịch, tàu công vụ cao tốc vỏ hợp kim nhôm, Công ty 189 cũng đã thực hiện rất thành công và hiệu quả. Hiện nay, Công ty đã xuất xưởng hàng loạt tàu, xuồng du lịch chở khách, tàu công vụ cao tốc vỏ hợp kim nhôm như tàu chở khách ST880, ST1500, ST138, ST166-1&2, ST1600, ST1650-1&2, ST155, K103, ST176, ST196, ST182, ST1360, 1706... những sản phẩm này đã được kiểm nghiệm qua thực tế khai thác và được khách hàng đánh giá cao. Chủ yếu nghiên cứu hàn hợp kim nhôm 5083.

Vũ Đình Toại đã nghiên cứu và bảo vệ thành công luận án tiến sĩ kỹ thuật khi hàn liên kết góc giữa nhôm 1010 và thép.

Nguyễn Quốc Mạnh cũng đã nghiên cứu và bảo vệ thành công luận án tiến sĩ kỹ thuật khi hàn hàn góc chữ T và liên kết góc giữa hợp kim nhôm 6061 và 5083 với thép không gỉ 304 và 316.

Các đề tài đã nghiên cứu ở trong nước hay ở nước ngoài đã nghiên cứu về lĩnh vực hàn nhôm và hợp kim nhôm nhưng chưa đi vào cụ thể, chưa tính toán tối ưu chế độ công nghệ cho loại nhôm nào đó. Ở đề tài này tác giả đi nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ hàn MIG đến cơ tính và tổ chức của kim loại mối hàn, từ đó tìm ra chế độ công nghệ, quy trình hàn hợp lý cho hợp kim nhôm 5083 với chiều dày 6 mm.

## **1.2 Tổng quan về vật liệu nhôm và hợp kim nhôm**

### **1.2.1 Đặc điểm công nghệ của nhôm và hợp kim nhôm, phạm vi ứng dụng của chúng**

Nhôm là một kim loại mềm, nhẹ với màu bạc ánh kim mờ và có một lớp mỏng oxit hóa tạo thành rất nhanh khi để trần nó ngoài không khí [1]. Tỷ trọng riêng của nhôm chỉ khoảng một phần ba lần sắt hay đồng. Nó mềm dễ uốn và gia công trên máy móc hay đúc, nó có khả năng chống ăn mòn và bền vững do có lớp oxit bảo vệ, ngoài ra nhôm cũng không nhiễm từ và không cháy khi để ngoài không khí trong

điều kiện thông thường.

Nhôm có trọng lượng nhẹ nhất trong các kim loại, do vậy nhôm dễ vận chuyển và chi phí vận chuyển thấp. Là nguyên liệu hấp dẫn cho ngành hàng không, nhà cao tầng và công nghiệp ô tô. Khi được dùng trong lĩnh vực vận tải thì nó giúp giảm chi phí nhiên liệu.

Người ta có thể làm nhôm bền theo ý muốn. Khi nhiệt độ giảm, nhôm bền hơn vì vậy nó được ưu chuộng hơn ở vùng khí hậu lạnh. Nhôm là sự kết hợp đặc biệt giữa trọng lượng nhẹ và độ bền cao, độ bền có thể tăng lên đáng kể khi thêm vào một hay nhiều chất sau: manganese, đồng, kẽm ... và độ bền được tăng cao hơn nếu được xử lý nhiệt đặc biệt.

Tính chống mài mòn của nhôm tùy vào lớp màng oxit mỏng, và cứng bên ngoài. Lớp màng này có thể dày tới 0.2 milimet, có thể sơn hoặc xi để tăng độ bền.

Nhôm có tính dẫn nhiệt cao thích hợp cho những nơi làm việc cần trao đổi nhiệt như bộ phận làm mát của tủ lạnh và các thành phần của động cơ. Nhôm được định hình theo hình dạng thích hợp cho những bộ phận cần dẫn nhiệt.

Nhôm là kim loại rẻ có tính dẫn điện cao được dùng dẫn điện.

\* Các loại nhôm và hợp kim nhôm thường gặp:

- Nhôm nguyên chất (1XXX series)
- Hợp kim nhôm-đồng (2xxx series)
- Hợp kim nhôm-mangan (3xxx series)
- Hợp kim nhôm-silic (4xxx series)
- Hợp kim nhôm-magiê (5xxx series)
- Hợp kim nhôm-magiê-silicon (6xxx series)
- Hợp kim nhôm-kẽm-magiê (7XXXseries)
- Các hợp kim khác (8XXXseries)

Trong đó hợp kim nhôm – magiê (5xxx series) được ứng dụng rộng rãi tại các nước phát triển trong các ngành xây dựng, công nghiệp đóng tàu, hàng không,... [1], [2] Vì thế tác giả chọn nghiên cứu công nghệ hàn hợp kim nhôm - magiê 5083 với cơ tính và thành phần hóa học như sau:

Bảng 1. 1 Cơ tính hợp kim nhôm 5083

| Cấp vật liệu | Cơ tính (MPa) |                  |
|--------------|---------------|------------------|
|              | Giới hạn chảy | Giới hạn bền kéo |
| 5083         | min 125       | 270 ÷ 345        |



Bảng 1. 2 Thành phần hóa học hợp kim nhôm 5083

| Thành phần hóa học (%) |       |      |      |           |      |       |       |         |
|------------------------|-------|------|------|-----------|------|-------|-------|---------|
| Mg                     | Mn    | Cu   | Si   | Cr        | Fe   | Zn    | Ti    | Al      |
| 4÷4,9                  | 0,4÷1 | ≤0,1 | ≤0,4 | 0,05÷0,25 | ≤0,4 | ≤0,25 | ≤0,15 | Còn lại |

### 1.2.2 Tính hàn của nhôm và hợp kim nhôm

Nhiệt độ nóng chảy Al: 660 °C; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 2050 °C

Khối lượng riêng của Al: 2,7 g/cm<sup>3</sup>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: 3,6 g/cm<sup>3</sup>

Khi hàn dễ hình thành lớp màng oxit Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Do đó, có thể xảy ra các hiện tượng như cạnh môi hàn khó nóng chảy, lẫn xỉ trong khi hàn. Vì vậy trước khi hàn cần phải khử lớp màng oxit nhôm bằng các biện pháp [1]:

- Cơ học: mài dũa, chải bằng bàn chải có sợi thép không gỉ ...

- Hóa học: thuốc hàn tạo thành các chất dễ bay hơi :

thuốc 50% KCl + 15% NaCl + 35% Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> cho phản ứng

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 6KCl → 2AlCl<sub>3</sub> + 3K<sub>2</sub>O. Dung dịch axit kiềm.

- Hồ quang: hiệu ứng bắn phá catot của hồ quang.

Tại nhiệt độ cao, độ bền giảm nhanh, làm nhôm bị sứt khi hàn. Độ chảy loãng cao, nhôm dễ bị chảy ra khỏi chân mối hàn. Ngoài ra nhôm bị đổi màu khi hàn nên khó phát hiện và điều chỉnh kích thước vũng hàn.

Hệ số dẫn nở nhiệt cao, module đàn hồi thấp, nhôm dễ bị biến dạng khi hàn (phải dùng đồ gá kẹp chặt bằng đồ gá có tính dẫn nhiệt kém) [3].

Hydrô là nguồn gây rỗ khí chủ yếu khi hàn nhôm, cần phải khử các hợp chất chứa khí Hydrô trên bề mặt hàn. Độ hòa tan của hydro trong nhôm nóng chảy rất cao nhưng giảm mạnh trong nhôm khi kết tinh, do đó khi kết tinh xảy ra trong bể hàn nhiều hydro sẽ hình thành "bong bóng" và "bong bóng" bị mắc kẹt trong mối hàn để trở nên xốp. Trong mối hàn thép, hiện tượng rỗ khí ít hơn vì hai lý do: Thứ nhất, khi thép kết tinh, độ hòa tan của hydro cũng giảm rất nhiều, nhưng việc giảm không quá quyết liệt như trong quá trình kết tinh nhôm; Thứ hai, nhiệt độ kết tinh của thép khoảng gấp hai lần so với nhôm, và độ dẫn nhiệt của thép chỉ bằng khoảng một phần tư so với nhôm vì thế quá trình kết tinh chậm hơn nhiều so với nhôm nên các bong bóng khí dễ dàng thoát ra khỏi bề hàn. Hydro có thể xâm nhập vào liên kết hàn từ: KLCB, kim loại phụ; Dầu, mỡ, dung môi bám dính trên KLCB; Điều kiện môi trường xung quanh. Nhôm dẫn điện tốt nên khi hàn phải dùng nguồn nhiệt có công suất lớn hoặc nguồn xung.

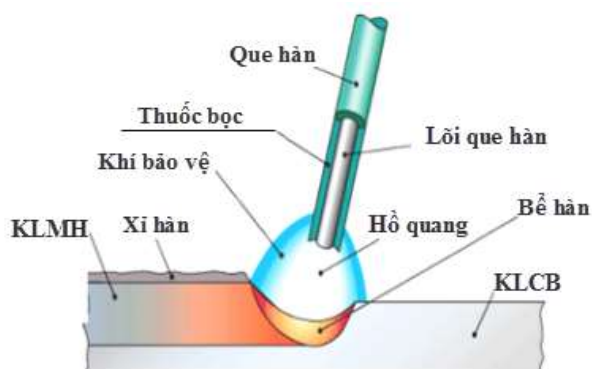
Trong quá trình hàn hiện tượng nứt nóng thường xảy ra với các hợp kim nhôm 7XXX. Những vết nứt này xảy ra ngay trong quá trình hàn và khi kim loại

vẫn còn nóng. Nó thường xảy ra trong vùng HAZ và gọi là hiện tượng nứt nóng.

### 1.3 Các phương pháp hàn nhôm và hợp kim nhôm

Ngày nay công nghệ hàn nhôm [1-[3] đã phát triển khá mạnh và phương pháp hàn nhôm cũng trở nên khá đa dạng. Trong đó các phương pháp hàn thường được sử dụng là: hàn SMAW, TIG, MIG, hàn hơi, hàn nỏ, hàn laser, hàn plasma,...

#### 1.3.1 Hàn hồ quang que hàn thuốc bọc (SMAW)



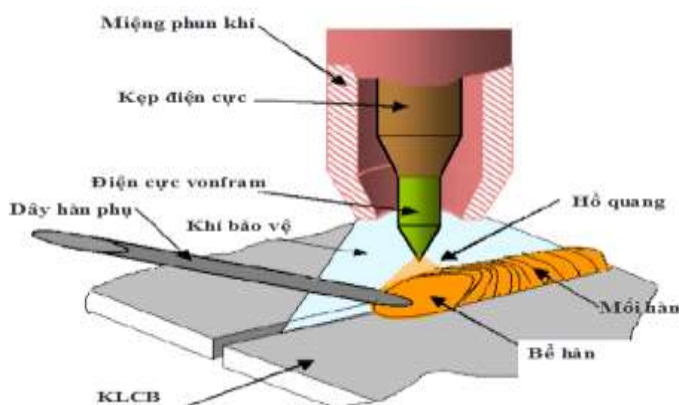
Hình 1. 1 Sơ đồ nguyên lý phương pháp hàn hồ quang que hàn thuốc bọc

Hàn hồ quang que hàn thuốc bọc (SMAW) là quá trình hàn điện nóng chảy sử dụng điện cực dưới dạng que hàn (thường có vỏ bọc), trong đó tất cả các thao tác (gây hồ quang, dịch chuyển que hàn, thay que hàn ...) đều do người thợ hàn thực hiện bằng tay.

Ưu điểm: Thiết bị hàn đơn giản, giá thành thấp, thích hợp cho hàn sửa chữa hoặc những chi tiết đơn giản không yêu cầu kỹ thuật cao.

Nhược điểm: Khi ứng dụng vào hàn nhôm sẽ có một số khó khăn là mỗi hàn không được liên tục do phải thay que hàn, khi đó nguồn nhiệt sẽ bị gián đoạn gây ảnh hưởng tới chất lượng mối hàn. Phương pháp hàn này gây bắn tóe nên cũng gây khó khăn cho khâu vệ sinh sau khi hàn.

#### 1.3.2 Hàn TIG (GTAW)



Hình 1. 2 Sơ đồ nguyên lý phương pháp hàn TIG

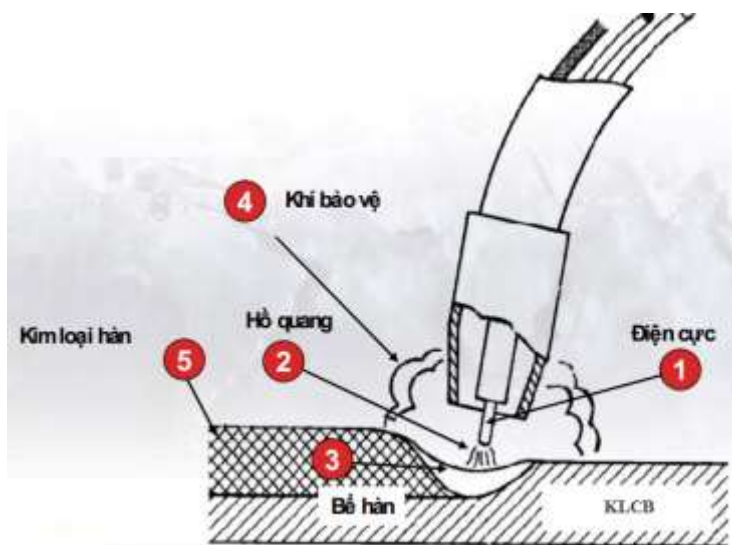


Hàn TIG hay còn gọi là hàn hồ quang điện cực không nóng chảy (Tungsten) trong môi trường khí trơ bảo vệ.

Ưu điểm: Phương pháp này ứng dụng trong hàn nhôm khá nhiều, cho chất lượng mối hàn tốt, tuy nhiên thường chỉ ứng dụng trong hàn các tấm mỏng .

Nhược điểm: Phương pháp TIG cho năng suất thấp và đòi hỏi tay nghề thợ hàn cao, đây cũng là nguyên nhân lớn dẫn đến giá thành sản phẩm tăng.

### 1.3.3 Hàn MIG (GMAW)



Hình 1. 3 Sơ đồ nguyên lý phương pháp hàn MIG

Hàn MIG [1][3] là phương pháp hàn hồ quang với điện cực nóng chảy trong môi trường khí trơ bảo vệ.

1. Phương pháp MIG có những ưu điểm chính sau:

- Phương pháp này có đặc điểm là dây hàn được cấp một cách liên tục, do đó quá trình thực hiện bằng MIG/MAG sẽ nhanh hơn so với quá trình hàn TIG hay SMAW.

- Nó có thể thực hiện được các liên kết hàn với chiều sâu ngấu chảy lớn.
- Nó có thể hàn được cả tấm mỏng lẫn tấm dày.
- Quá trình hàn MIG/MAG cho hệ số đắp kim loại rất lớn.
- Quá trình này dễ dàng thực hiện (vận hành).
- Không cần sử dụng thuốc hàn, sản phẩm hàn MIG/MAG mịn, đẹp, gọn gàng, sạch sẽ, và không có xỉ bắn tóe trên bề mặt do đó không cần yêu cầu làm sạch bề mặt sau hàn. Điều này giúp cho làm giảm tổng chi phí hàn.

- Có thể hàn với tốc độ cao, VAHN nhỏ, làm giảm nguy cơ biến dạng khi hàn.

2. Nhược điểm: đi cùng với các ưu điểm trên, phương pháp MIG/MAG cũng có một số nhược điểm sau:

- Quá trình này hơi phức tạp hơn so với quá trình hàn TIG và hàn que, vì số

một số thông số như: dích điện cực, góc nghiêng điện cực, thông số chế độ hàn (U, I, V,...), kiểu và đường kính dây hàn, kiểu tay hàn, ... Tất cả các thông số này đều yêu cầu được kiểm soát, lựa chọn đúng và kỹ càng để có thể đưa ra được một mối hàn có kết quả tốt.

- Thiết bị hàn thì khá là phức tạp, đắt tiền, tính di động thấp.

- Khí bảo vệ có thể dễ dàng phát tán nếu điều kiện che chắn không được tốt, do đó hàn MIG/MAG sẽ gặp rất nhiều khó khăn trong điều kiện hàn ở ngoài trời nếu không được che chắn tốt.

- Tốc độ nguội của kim loại hàn cao hơn nên khả năng khí thoát không kịp vì thế trong mối hàn dễ bị rỗ khí, vùng HAZ dễ bị hydro xâm nhập dẫn đến hiện tượng nứt nóng với các hợp kim nhôm 7XXX, 6XXX.

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT NAM ĐỊNH

## **Kết luận chương 1**

Trong chương 1 tác giả đã:

Phân tích, tổng hợp và đánh giá các công trình nghiên cứu của các tác giả trong và ngoài nước về công nghệ hàn nhôm và hợp kim nhôm bằng với các phương pháp hàn khác nhau.

Phân tích được đặc điểm, tính công nghệ của nhôm và hợp kim nhôm nói chung và hợp kim nhôm A5083 nói riêng để từ đó lựa chọn được phương pháp hàn phù hợp và hiệu quả đối với hợp kim nhôm A5083.

Lựa chọn phương pháp hàn MIG để hàn mối ghép góc chữ T hợp kim nhôm A5083.

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT NAM ĐỊNH

## CHƯƠNG 2

### CÔNG NGHỆ VÀ QUÁ TRÌNH LUYỆN KIM KHI HÀN HỢP KIM NHÔM

#### 2.1 Công nghệ hàn nhôm và hợp kim nhôm

Phương pháp hàn hồ quang điện cực nóng chảy trong môi trường khí bảo vệ đã được giới thiệu từ năm 1920, nhưng đến tận năm 1948 nó mới được ứng dụng rộng rãi trên thị trường [1][12]. Hàn hồ quang điện cực nóng chảy trong khí bảo vệ là quá trình hàn nóng chảy trong đó nguồn nhiệt hàn được cung cấp bởi hồ quang tạo ra giữa điện cực nóng chảy (dây hàn) và vật hàn. Hồ quang và kim loại nóng chảy được bảo vệ khỏi tác dụng của Oxy và Nitơ trong môi trường xung quanh bởi một loại khí hoặc 1 hỗn hợp khí. Khí bảo vệ có thể là khí trơ không tác dụng với kim loại lỏng khi hàn hoặc là các loại khí hoạt tính có tác dụng chiếm chỗ đầy không khí ra ngoài vùng và hạn chế tác dụng xấu của nó. Phương pháp hàn này gọi là GMAW (Gas Metal Arc Welding) [14].

Hàn hồ quang bằng điện cực nóng chảy trong môi trường khí hoạt tính ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_2 + \text{O}_2, \dots$ ) gọi là phương pháp hàn **MAG (Metal Active Gas)**, thường được sử dụng rộng rãi để hàn kim loại thép carbon và thép hợp kim thấp trong công nghiệp.

Hàn hồ quang bằng điện cực nóng chảy trong môi trường khí trơ (Ar, He, ...) gọi là phương pháp hàn MIG (Metal Inert Gas), thường được sử dụng để hàn kim loại màu và hợp kim màu.

Phương pháp hàn MIG nhôm và hợp kim nhôm có thể áp dụng kiểu bán tự động hoặc tự động. Các loại nhôm, hợp kim nhôm có thể hàn ở mọi tư thế bằng phương pháp này, chỉ cần lựa chọn được vật liệu hàn và các thông số hàn thích hợp.

#### 2.2 Đặc điểm

Được ứng dụng phổ biến trong chế tạo các kết cấu hợp kim nhôm quan trọng. Khí bảo vệ thường được dùng là He (99,985%), Ar (99,98%).

Hiệu quả khi hàn tấm có chiều dày  $\geq 4\text{mm}$

Dòng một chiều cực nghịch (bắn phá catot màng  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bằng các ion dương).

So với hàn TIG, cơ tính mối hàn thấp hơn do điện cực bị nung nóng quá mức. Tuy nhiên có ưu điểm là khử tạp chất (oxit nhôm) tốt và có năng suất cao.

Đường kính dây hàn  $d = 1,2 \div 1,5 \text{ mm}$ . Với các dây lớn hơn quá trình hàn chỉ ổn định khi dòng điện có cường độ cao hơn  $130\text{A} \div 140 \text{ A}$ , cho phép hàn một lượt các tấm có chiều dày  $4 \div 6 \text{ mm}$ . Khi hàn ở các tư thế hàn ngang hàn trên cần giảm cường độ dòng điện hàn  $10 \div 15 \%$

Khoảng cách từ đầu chụp khí đến bề mặt vật hàn là từ  $5 \div 15\text{mm}$ .

Chế độ hàn tiêu biểu: hầu hết hợp kim nhôm được hàn bằng chế độ dịch

chuyển tia có dòng bằng hoặc xung.

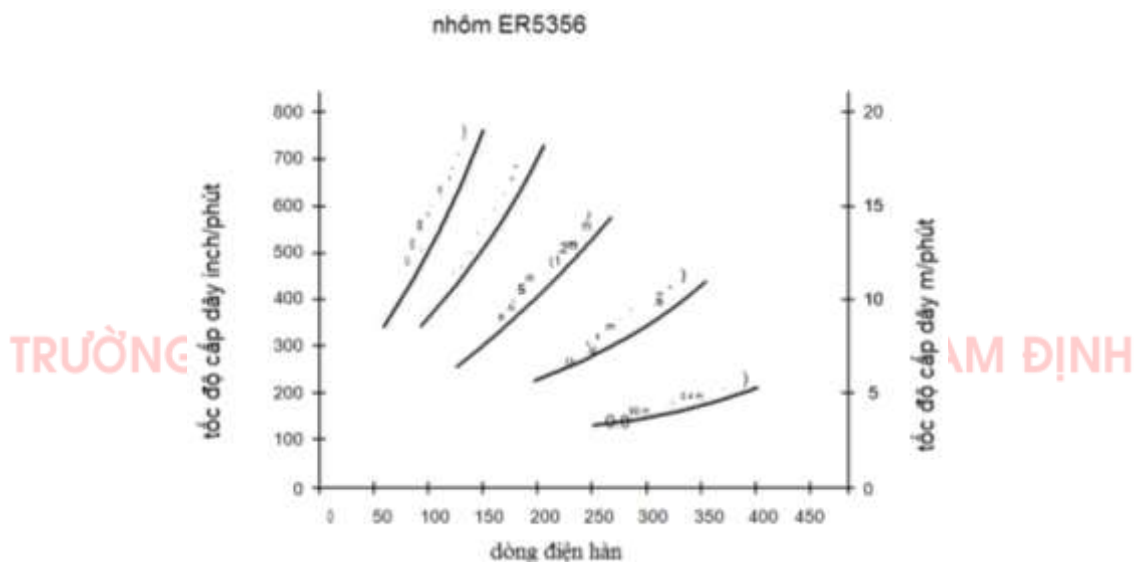
Mật độ dòng điện hàn  $80 \div 480 \text{ A/mm}^2$

Các ưu điểm của dịch chuyển tia là ngấu tốt, hồ quang cứng, hẹp và ổn định dễ hàn ở các tư thế khác nhau, có thể hàn mối hàn góc nhỏ trên chiều dài lớn.

## 2.3 Các thông số công nghệ

### 2.3.1. Cường độ dòng điện hàn (tốc độ đẩy dây hàn)

Dòng điện hàn được chọn phụ thuộc vào kích thước điện cực dây hàn, dạng truyền kim loại lỏng vào bể hàn và chiều dày liên kết hàn. Khi dòng điện quá thấp sẽ không đảm bảo ngấu hết chiều dày liên kết, giảm độ bền của mối hàn. Khi dòng điện quá cao sẽ dẫn tới tăng khả năng bắn tóe kim loại, gây rỗ xốp, biến dạng mối hàn không ổn định [1][12].



Hình 2. 1 Quan hệ của dòng điện hàn và tốc độ cấp dây

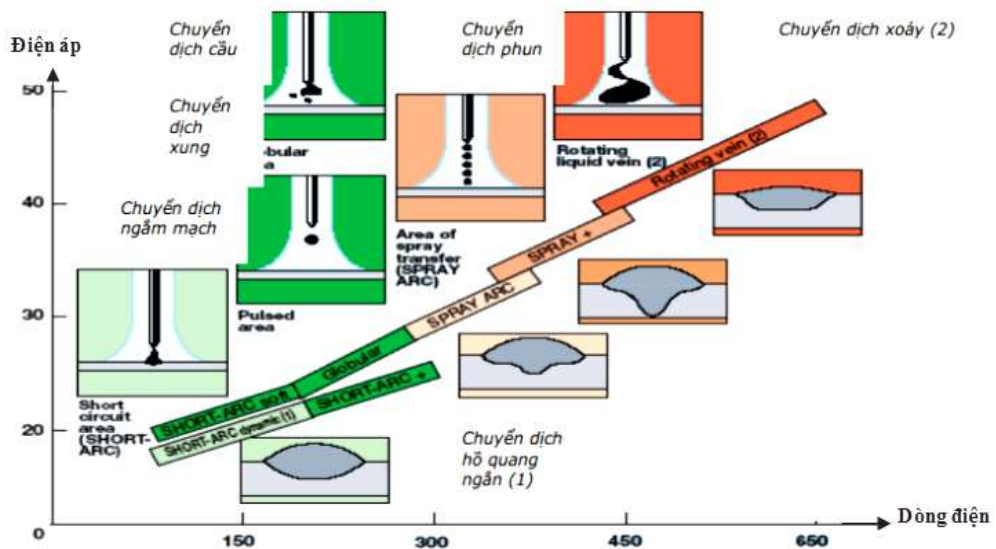
Tốc độ cấp dây phải tương ứng với tốc độ của nóng chảy của điện cực (dây hàn). Tức là phụ thuộc vào cường độ dòng điện hàn và đường kính dây hàn. Tốc độ cấp dây thường được căn chỉnh theo qui định của nhà sản xuất. Tuy nhiên, trước khi tiến hành hàn ta nên hàn thử và điều chỉnh tốc độ theo yêu cầu cụ thể.

### 2.3.2. Điện áp hàn

Điện áp hàn là một thông số quan trọng trong hàn MIG [12-14], quyết định dạng truyền kim loại lỏng. Điện áp sử dụng phụ thuộc vào chiều dày chi tiết hàn, kiểu liên kết, kích thước điện cực dây hàn, thành phần khí bảo vệ, dây hàn... Để có giá trị điện áp hàn hợp lý, ta phải tiến hành hàn thử với các giá trị điện áp tra bảng hoặc tính toán, sau đó ta quan sát đường hàn để chọn giá trị thích hợp.

Mối quan hệ giữa điện áp hàn và cường độ dòng điện hàn quyết định đến hình thức dịch chuyển kim loại lỏng vào bể hàn từ đó ảnh hưởng đến hình dáng, kích

thước và chiều sâu ngấu của mối hàn, [18].



Hình 2. 2 Các dạng dịch chuyển kim loại vào bể hàn

### 2.3.3. Lưu lượng khí bảo vệ

Sự tiêu hao của khí bảo vệ phụ thuộc vào cường độ dòng điện hàn và đường kính dây hàn, đường kính miệng phun [1][12][14]. Lưu lượng khí bảo vệ ít dẫn đến mối hàn bị xốp, lượng kim loại lỏng bắn tóe càng nhiều và có thể không hình thành được mối hàn với hàn nhôm và hợp kim nhôm. Tuy nhiên khi lưu lượng khí bảo vệ dư thừa, miệng phun nhỏ có thể sẽ tạo thành dòng khí xoáy và hút không khí từ môi trường vào bể hàn; khí bảo vệ dư thừa sẽ gây ra lãng phí không cần thiết.

### 2.3.4. Đường kính dây hàn

Thông thường đường kính dây hàn tăng khi tăng chiều dày chi tiết hàn. Tuy nhiên sự lựa chọn đường kính dây hàn lại ảnh hưởng lớn tới kiểu dịch chuyển kim loại lỏng vào bể hàn. Đối với dòng điện hàn cho trước, khi giảm đường kính dây hàn sẽ làm tăng tốc độ dịch chuyển kim loại lỏng và tốc độ nóng chảy của điện cực (dây hàn) sẽ cao hơn do mật độ dòng điện tăng lên.

### 2.3.5. Vận tốc hàn

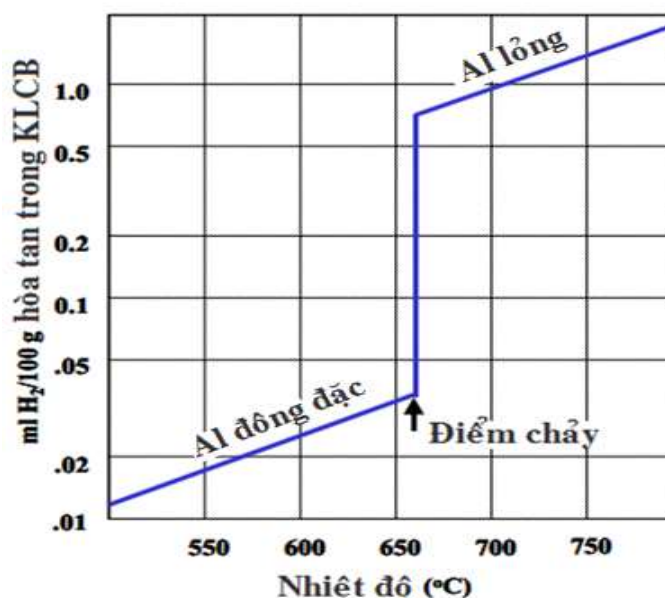
Tốc độ hàn quyết định tới chiều sâu ngấu của mối hàn. Nếu tốc độ hàn thấp, kích thước vũng hàn sẽ lớn và ngấu sâu. Khi tăng tốc độ hàn, tốc độ cấp nhiệt của hồ quang vào mối hàn sẽ giảm, làm giảm độ ngấu và thu hẹp mối hàn [1][6].

### 2.3.6. Chiều dài phần nhô ra của dây hàn (độ nhú của điện cực)

Khi tăng chiều dài phần nhô, nhiệt nung nóng đoạn dây hàn này sẽ tăng, làm giảm cường độ dòng điện hàn cần thiết để nóng chảy điện cực theo tốc độ cấp dây nhất định. Khoảng cách này là rất quan trọng khi hàn, chỉ cần một sự biến thiên nhỏ

cũng làm tăng biến thiên dòng điện một cách rõ rệt.

Chiều dài phần nhô quá lớn sẽ làm dư kim loại nóng chảy ở mối hàn, giảm độ ngấu. Ngoài ra tính ổn định của hồ quang cũng bị ảnh hưởng. Nếu chiều dài phần nhô ra quá nhỏ sẽ gây ra sự bắn tóe, kim loại bắn tóe sẽ dính vào mỏ hàn ống chụp khí làm cản trở khí bảo vệ mối hàn, gây ra rỗ xốp trong mối hàn [12].



Hình 2. 3 Độ hòa tan của H<sub>2</sub> trong KLCB

Hầu như mọi máy hàn MIG đều được dùng dòng điện DC. Tùy theo máy, cường độ dòng điện trong khoảng vài trăm tới khoảng 1200A, điện áp đầu vào 110÷220V hoặc 380V. Chu kỳ tải 40%, 60% hoặc 100%.

- Khí bảo vệ:

Khí Argon là khí được điều chế từ khí quyển bằng phương pháp hóa lỏng không khí và tinh chế độ tinh khiết 99,98%. Khí này được chứa trong các chai khí với áp suất cao hoặc ở dạng lỏng với nhiệt độ -185,5°C.

Khí bảo vệ Argon, Heli dùng trong hàn MIG ngoài tác dụng bảo vệ vùng hàn, bảo vệ điện cực còn làm nhiệm vụ làm mát điện cực và cùng hàn. Khí Argon, Heli là khí trơ (không tác dụng hóa học với các nguyên tố khác), khí Argon không màu, không độc và nặng khoảng 1,5 lần so với không khí (tỷ trọng 1,783g/l) Argon không hòa tan trong kim loại ở trạng thái lỏng hay rắn. Heli có tỷ trọng 0,187g/l có nghĩa là khí Argon nặng gấp 10 lần so với Heli. Trong thực tế khí Argon được sử dụng rộng rãi hơn khí Heli vì Argon có những lí do sau:

+) Nó tạo ra hồ quang cháy êm hơn, tạo ra điện áp hồ quang thấp hơn với cùng một dòng hàn khi dùng các khí khác. Có tác dụng làm sạch bề mặt vật liệu khi hàn Nhôm, bảo vệ cũng hàn tốt hơn với lưu lượng thấp hơn vì nó nặng hơn khí Heli. Dễ gây hồ quang hơn (do điện áp hồ quang thấp hơn khi hàn với các khí khác).

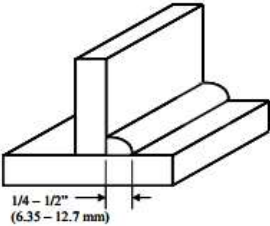
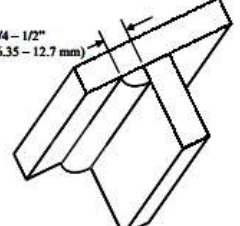
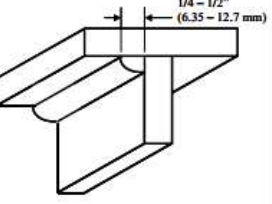


+) Khí Heli là loại khí phong phú thứ hai sau khí Argon so với các khí trơ còn lại với cùng dòng hàn, khí Heli tạo ra điện áp hồ quang gấp 1,7 lần so với khí Argon, đồng thời nguồn nhiệt hồ quang khí Heli cũng lớn gấp 1,7 lần khi hàn so với khí Argon.

+) Trong công nghiệp khí Argon được điều chế từ không khí bằng cách hạ nhiệt độ của không khí, biến nó thành thể lỏng cho bay hơi tách Argon ra khỏi hỗn hợp (dựa vào nhiệt độ sôi của các chất thành phần không khí).

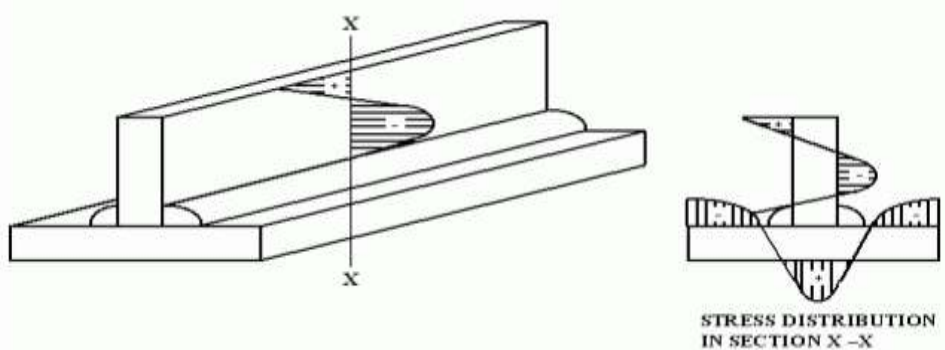
Chế độ hàn nhôm trong môi trường khí bảo vệ điện cực nóng chảy (SMAW)

Bảng 2. 1 Bảng chế độ hàn góc chữ T hợp kim nhôm A5083

|   |   |                      |                     |  |                     |                     |   |                     |                     |
|---|---|----------------------|---------------------|--|---------------------|---------------------|---|---------------------|---------------------|
| <b>Process: Gas Metal-Arc</b><br><b>Weld Size, in (mm):</b><br>1/4 - 1/2 (6.35-12.7)<br><b>Type of Joint: Fillet</b><br><b>Positions: Horizontal, Vertical, and Overhead</b><br><b>Polarity: DCEP</b> |  |                      |                     |  |                     |                     |  |                     |                     |
|   | Fillet Size, L, in (mm)   | 1/4 (6.35)           | 3/8 (9.525)         | 1/2 (12.7)   | 1/4 (6.35)          | 3/8 (9.525)         | 1/2 (12.7)  | 1/4 (6.35)          | 3/8 (9.525)         |
| Pass  | 1   | 1                    | 3                   | 1  | 2                   | 3                   | 1   | 2                   | 3                   |
| Electrode Size, in (mm)   | 1/16 (1.587)  | 1/16 (1.587)         | 3/32 (2.38)         | 1/16 (1.587)   | 1/16 (1.587)        | 1/16 (1.587)        | 1/16 (1.587)  | 1/16 (1.587)        | 1/16 (1.587)        |
| Current (amp)   | 160 - 180   | 200 - 230            | 240 - 280           | 160 - 180  | 180 - 200           | 180 - 220           | 160 - 180   | 180 - 200           | 180 - 220           |
| Volts   | 24 - 26   | 27-29                | 26 - 28             | 24 - 26  | 27 - 29             | 27 - 29             | 23 - 25   | 27 - 29             | 27 - 29             |
| Arc Speed, ipm (mm/s)   | 24 - 28 (10.2 - 11.9)   | 20 - 24 (8.5 - 10.2) | 16 - 20 (6.8 - 8.5) | 16 - 20 (6.8 - 8.5)  | 14 - 18 (5.9 - 7.6) | 12 - 16 (5.1 - 6.8) | 18 - 22 (7.6 - 9.3)   | 18 - 22 (7.6 - 9.3) | 16 - 20 (6.8 - 8.5) |
| Argon Gas, cfh  | 30 - 40   | 30 - 40              | 40 - 60             | 30 - 40  | 40 - 60             | 40 - 60             | 40 - 60   | 40 - 60             | 60 - 80             |
| Gas Cup Opening, in (mm)  | 1/2 (12.7)  | 1/2 (12.7)           | 5/8 (15.875)        | 1/2 (12.7)   | 1/2 (12.7)          | 5/8 (15.875)        | 1/2 (12.7)  | 1/2 (12.7)          | 5/8 (15.875)        |
| Total Time (hr/ft of weld)  | .00769  | .00909               | .0333               | .0111  | .0250               | .0429               | .0100   | .0200               | .0333               |

## 2.4 Ứng suất dư

Ứng suất dư là loại ứng suất xuất hiện..



Hình 2. 4 Phân bố ứng suất dư trong liên kết hàn góc chữ T



## 2.5 Vật liệu hàn

### 2.5.1. Khí bảo vệ

Khí bảo vệ dùng trong hàn MIG nhôm và hợp kim nhôm là Ar, He với độ tinh khiết 99,98% hoặc hỗn hợp Ar + He.

### 2.5.2. Dây hàn

Theo tiêu chuẩn AWS A5.10 – 1980:

- E: Điện cực hàn.
- R: dây hàn

Bảng 2. 2 Các loại dây dùng cho hàn MIG nhôm

| Kí hiệu | Thành phần (%)                           |
|---------|--|
| ER 1100 | 90,9 Al                                  |
| ER 2319 | 6,3 Cu, (V +Zr) có kiểm soát; Al còn lại |
| ER 4043 | 5,3 Si; còn lại là Al                    |
| ER 4047 | 12 Si; còn lại là Al                     |
| ER 4145 | 10 Si, 4 Cu; còn lại là Al               |
| ER 5183 | 0,8 Mn; 4,9 Mg; còn lại là Al            |
| ER 5356 | 0,1 Mn; 5 Mg; còn lại là Al              |
| ER 5554 | 0,8 Mn; 5,1 Mg; còn lại là Al            |
| ER 5654 | 3,5 Mg; Mn không đáng kể; còn lại là Al  |
| R 242   | 4 Cu; 1,5 Mg; 2 Ni; còn lại là Al        |
| R 295   | 4,5 Cu; còn lại là Al                    |
| R 355   | 5 Si; 1,2 Cu; 0,5 Mg; còn lại là Al      |
| R 356   | 7 Si; 0,3 Mg; còn lại là Al              |

Thành phần hóa học của dây nhôm

Chọn vật liệu hàn cho hàn nhôm [3] [4] là bước rất quan trọng, nếu chọn vật liệu không thích hợp có thể gây nứt tại kim loại mối hàn do kim loại mối hàn hoặc vùng ảnh hưởng có tính dẻo và độ bền thấp khi nhiệt độ tăng (hiện tượng này đôi khi gây ra tình trạng sụt mối hàn).

Để giảm xu hướng nứt giữa các tinh thể trong vùng ảnh hưởng nhiệt, nên dùng vật liệu hàn có nhiệt độ nóng chảy bằng hoặc thấp hơn kim loại cơ bản, tức là có hàm lượng các nguyên tố hợp kim cao hơn.

## **Kết luận chương 2**

Trong chương này tác giả đã:

- Đưa ra được cái nhìn tổng quát về công nghệ hàn nhôm và hợp kim nhôm.
- Đánh giá các yếu tố công nghệ ảnh hưởng trực tiếp tới hình dáng kích thước bề hàn, chất lượng mối hàn hợp kim nhôm. Ảnh hưởng của dây hàn (vật liệu bổ sung), khí bảo vệ tới chất lượng mối hàn.
- Khảo sát đánh giá mức độ ảnh hưởng của các thông số tới ứng suất và biến dạng dư hàn.

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT NAM ĐỊNH

## CHƯƠNG 3: TRƯỜNG NHIỆT ĐỘ TRONG HÀN HỒ QUANG

### 3.1 Các vấn đề nhiệt trong quá trình hàn

Một trong các thông số quan trọng để xác định trường nhiệt độ trong vật hàn là năng lượng đường [6][7]. Đây là phần công suất từ nguồn nhiệt hàn được dùng để tạo nên mối hàn. Có một số các định nghĩa lượng nhiệt đưa vào mối hàn như công  $Q(J)$  của nguồn nhiệt tức thời hoặc là công suất của nguồn nhiệt liên tục trong một đơn vị thời gian ( $W$ ). Đối với trường hợp hàn một lượt liên kết hàn giáp mối, có thể dùng khái niệm năng lượng đường, tức là lượng nhiệt cung cấp cho một đơn vị chiều dài của mối hàn hoặc chiều dày tấm cần hàn  $q_w (J/mm)$  ( $q_w=Q/v$ ,  $v$  là tốc độ di chuyển của hồ quang hàn (mm/s)).

Đối với các quá trình hàn hồ quang thông dụng, năng lượng đường được tính từ công suất nhiệt của hồ quang (dòng điện một chiều hoặc xoay chiều) như sau:

$$Q = U.I \quad 3.1$$

$$Q = U.I_{hd} \quad 3.2$$

Trong đó  $U$  là điện áp,  $I$  là cường độ dòng điện hàn một chiều và  $I_{hd}$  là cường độ hiệu dụng của dòng điện hàn xoay chiều.

Trong trường hợp nguồn nhiệt có mật độ nhiệt năng mang đặc trưng phân bố theo chuẩn Gauss, nhiệt lượng truyền vào vật hàn được coi là từ nguồn nhiệt phẳng ( $J/mm^2$ ) hoặc nguồn nhiệt khối ( $J/mm^3$ ). Những nguồn nhiệt có cường độ cao như hồ quang hàn hoặc hồ quang plasma thường có đặc trưng phân bố cao và hẹp theo chuẩn Gauss còn các nguồn nhiệt có cường độ thấp như hàn khí thường có phân bố Gauss thấp và rộng.

Hiệu suất của hồ quang hàn là tỷ lệ giữa phần năng lượng của hồ quang truyền vào vật hàn so với toàn bộ năng lượng của hồ quang [7][9]. Nhiệt tỏa ra từ hồ quang gồm bức xạ vào môi trường không khí xung quanh, truyền nhiệt đối lưu trong vũng hàn, đối lưu nhiệt với môi trường xung quanh và dẫn nhiệt từ vị trí được nung tới những vị trí nguội hơn trong vật hàn. Ngoài ra còn có sự truyền dẫn tản nhiệt vào điện cực. Nhờ đối lưu nhiệt bởi dòng khí chuyển động trong cột hồ quang nên nhiệt lại được truyền vào vật hàn và tổn thất vào môi trường xung quanh.

Bức xạ nhiệt gồm tổn thất từ hồ quang và từ bề mặt vật hàn. Khi hàn hồ quang tay và hàn hồ quang điện cực nóng chảy trong môi trường khí bảo vệ, nhiệt hấp thụ bởi điện cực được truyền vào vật hàn, do đó những quá trình hàn này có

hiệu suất cao hơn so với quá trình hàn hồ quang điện cực không nóng chảy trong môi trường khí bảo vệ.

Có thể sử dụng các công thức sau đây để tính hiệu suất hồ quang hàn:

$$\eta = 1 - \frac{q_e + (1-n)q_p + mq_w}{UI} \quad 3.3$$

Đối với quá trình hàn sử dụng điện cực không nóng chảy và

$$\eta = 1 - \frac{(1-n)q_p + mq_w}{UI} \quad 3.4$$

Đối với quá trình hàn sử dụng điện cực nóng chảy (dây hàn, que hàn, vv..)

Trong các công thức trên,  $q_e$  là phần nhiệt truyền vào điện cực;  $q_p$  là phần nhiệt được bức xạ và đối lưu từ cột hồ quang;  $q_w$  là phần nhiệt được truyền vào vật hàn;  $m$  là phần nhiệt bị tổn thất do bức xạ;  $n$  là phần nhiệt truyền vào vật hàn từ cột hồ quang;  $U$  là điện áp hồ quang;  $I$  là cường độ dòng điện đi qua hồ quang.

Hiệu suất của các quá trình hàn hồ quang tay và hàn bằng điện cực nóng chảy trong môi trường khí bảo vệ dao động trong khoảng 66-85%; đối với hàn hồ quang bằng điện cực không nóng chảy trong môi trường khí bảo vệ, hiệu suất hồ quang là 21-48%, nhưng với hàn hồ quang dưới lớp thuốc, giá trị hiệu suất hồ quang có thể đạt 90-99%.

Trung bình, khoảng 80% lượng nhiệt sinh ra được sử dụng một cách hữu ích để hình thành mối hàn.

Bảng 3. 1 Sơ đồ cân bằng nhiệt khi hàn GMAW

|                                      |   |   |                                    |
|--------------------------------------|---|---|------------------------------------|
| 20%, vào môi trường (+0,5%, bắn tóe) |   | = | 100%, công suất nhiệt của hồ quang |
| 26%, giọt kim loại (-0,5, bắn tóe)   | 80%, công suất nhiệt hiệu dụng của hồ quang |   |                                    |
| +24%, hơi kim loại dây hàn           |   |   |                                    |
| +30,5%, kim loại cơ bản              |   |   |                                    |

### 3.2 Các loại nguồn nhiệt trong hàn

#### 3.2.1 Dẫn nhiệt

Nhiệt trường, mặt đẳng nhiệt và gradient nhiệt độ [7]

Nhiệt độ là một thông số trạng thái biểu thị mức độ nóng lạnh của một vật thể

hoặc một môi trường.

Nhiệt trường là tập hợp những điểm có nhiệt độ trong một vật thể hoặc trong không gian tại một thời điểm  $\tau$  nào đó.

Nhiệt trường là hàm số của không gian và thời gian. Phương trình tổng quát của trường nhiệt độ có dạng  $t = f(x, y, z, \tau)$ .

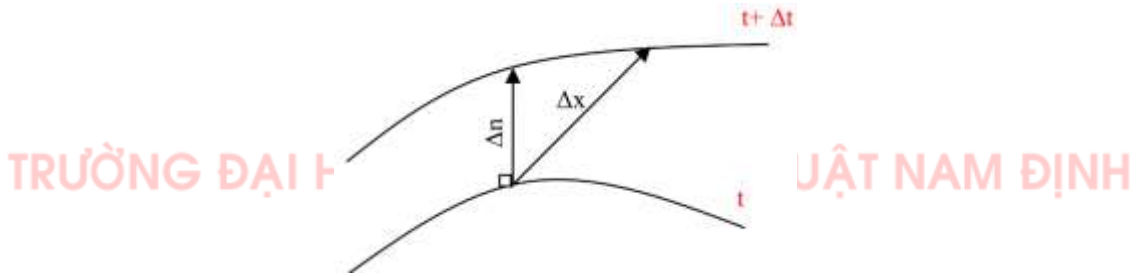
Nếu trường nhiệt độ chỉ thay đổi theo không gian mà không thay đổi theo thời gian thì gọi là nhiệt trường ổn định.

Nếu nhiệt trường thay đổi theo cả không gian và thời gian thì gọi là nhiệt trường không ổn định. Ngoài ra, tùy theo nhiệt độ thay đổi theo 1 trục tọa độ, 2 trục tọa độ hoặc 3 trục tọa độ mà có thể phân thành trường 1 chiều, 2 chiều hay 3 chiều.

Mặt đẳng nhiệt và gradient nhiệt độ

Mặt đẳng nhiệt là tập hợp những điểm có cùng nhiệt độ tại một thời điểm nào đó.

Gradient nhiệt độ: Giả sử biến thiên nhiệt độ giữa hai mặt đẳng nhiệt liền nhau là  $\Delta t$ , khoảng cách giữa chúng theo phương pháp tuyến là  $\Delta n$ , theo phương  $x$  là  $\Delta x$ ,



Hình 3. 1 Phương và chiều của grad  $T$

$\frac{\Delta t}{\Delta n}$  và  $\frac{\Delta t}{\Delta x}$  là sự gia tăng nhiệt độ trên một đơn vị độ dài, vì  $\Delta n < \Delta x$  nên

$\frac{\Delta t}{\Delta n} > \frac{\Delta t}{\Delta x}$ , do đó sự biến thiên nhiệt độ trên một đơn vị độ dài sẽ lớn nhất theo

phương pháp tuyến. Khi hai mặt tiến sát tới nhau:

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{dt}{dn}, \quad \text{grad}T = \frac{dt}{dn} (^{\circ}/m) \quad 3.5$$

Gradient nhiệt độ là một véc-tơ có phương trùng với phương của pháp tuyến của bề mặt đẳng nhiệt và có chiều là chiều tăng của nhiệt độ. Dấu (-) thể hiện ngược với chiều dòng nhiệt. Gradient nhiệt độ thể hiện tốc độ biến thiên của nhiệt độ trên một đơn vị độ dài theo phương pháp tuyến của bề mặt đẳng nhiệt. Khi  $dt > 0$  thì  $\text{grad} T > 0$  thì mới xảy ra hiện tượng dẫn nhiệt, tức là có dòng nhiệt xuất hiện trong vật thể.

Định luật Fourier và hệ số dẫn nhiệt

Khi nghiên cứu quá trình dẫn nhiệt trong vật thể, Fourier đã phát hiện: “Một

lượng nhiệt  $dQ$  truyền qua một bề mặt  $dF$  trong thời gian  $d\tau$  sẽ tỷ lệ thuận với gradient nhiệt độ, với thời gian và diện tích bề mặt”:

$$dQ = \lambda \cdot \frac{dt}{dn} dF \cdot d\tau \quad (\text{bỏ qua chiều, chỉ xét độ lớn}) \quad 3.6$$

Nếu quá trình là ổn định:  $Q = \lambda \frac{dt}{dn} F \cdot \tau$  với,  $\lambda$  là hệ số dẫn nhiệt (hệ số tỷ lệ, độ dẫn nhiệt),  $Q$  là nhiệt lượng,  $F$  là bề mặt vuông góc với phương dẫn nhiệt ( $m^2$ ),  $\tau$  là thời gian (s).

Hệ số dẫn nhiệt của chất rắn: hệ số dẫn nhiệt của nó chung đều phụ thuộc vào nhiệt độ, và phần lớn hệ số dẫn nhiệt tăng khi nhiệt độ tăng. Đối với vật thể rắn đồng chất, quan hệ giữa hệ số dẫn nhiệt và nhiệt độ có thể được biểu diễn qua công thức:

$$\lambda = \lambda_0(1+bt) \quad 3.7$$

Trong đó:  $\lambda$  là hệ số dẫn nhiệt ở  $t$  ( $^{\circ}C$ ),  $\lambda_0$  là hệ số dẫn nhiệt ở  $0$  ( $^{\circ}C$ ),  $t$  là nhiệt độ làm việc,  $b$  là hệ số nhiệt độ, được xác định bằng thực nghiệm và phụ thuộc vào tính chất của vật liệu. Đơn vị của  $\lambda$  là  $W/m^{\circ}C$ .

Sự truyền nhiệt năng trong kim loại chủ yếu do các điện tử tự do, còn dao động của các nguyên tử dưới dạng sóng đàn hồi không đáng kể. Khi tăng nhiệt độ làm cho sự hỗn loạn của điện tử tự do tăng, do đó hệ số dẫn nhiệt tăng. Trong kim loại khi có lẫn các tạp chất khác thì hệ số dẫn nhiệt giảm đi rất nhanh do sự tăng tính hỗn loạn của kết cấu mạng và dẫn đến làm tăng sự phân tán của điện tử tự do

Việc phân tích quá trình truyền nhiệt hàn sẽ biểu diễn tương quan giữa nhiệt độ của vật hàn và thời gian. Sự truyền nhiệt trong quá trình hàn bao gồm nhiều hiện tượng phức tạp như bức xạ, đối lưu, dẫn nhiệt và chuyển động của dòng kim loại nóng chảy.

Việc giải quyết bài toán này đòi hỏi phải giải các phương trình vi phân truyền nhiệt. Các phương pháp số phổ biến hiện nay có thể dùng là phương pháp sai phân hữu hạn, phần tử hữu hạn. Bên cạnh đó cũng có thể sử dụng các phương pháp giải tích, phương pháp này tuy còn một số hạn chế song nó có ưu thế là các phương trình có nghiệm giải tích cho phép cung cấp thông tin về thời gian và nhiệt độ hàn một cách nhanh chóng và tiện lợi.

Hầu hết các quá trình hàn sử dụng khi hàn các tấm dày, dòng nhiệt truyền trong tấm mang tính chất 3 chiều không gian (3D) [6][7]. Để mô phỏng truyền nhiệt

3D, cần sử dụng nguồn nhiệt 3D, ví dụ các nguồn nhiệt có mật độ phân bố theo dạng khối cầu hoặc khối elipsoid. Trong trường hợp hàn tấm tương đối mỏng, khi có thể hàn ngấu hết chiều dày tấm chỉ bằng một đường hàn duy nhất, có thể dùng các phương trình dòng nhiệt hai chiều (2D) để phân tích, trên cơ sở nguồn nhiệt 2D. Với những nguồn nhiệt công suất lớn, di chuyển nhanh, dòng nhiệt theo hướng di chuyển của nguồn nhiệt có thể được bỏ qua, và do đó có thể coi như đây là trường hợp dòng nhiệt một chiều.

Các phân tích sau này giới thiệu những nguồn nhiệt hàn khác nhau và phương pháp giải tích dùng trong giải các bài toán truyền nhiệt hàn từ các nguồn nhiệt đó, không xét tới khía cạnh tổn thất nhiệt do bức xạ và đối lưu trong quá trình hàn. Sự phân bố nhiệt theo thời gian được tính toán trên cơ sở sử dụng các phương trình dẫn nhiệt cổ điển trong môi trường vật rắn. (NTN)

Phương trình dẫn nhiệt tổng quát trong môi trường vật rắn như sau:

$$\left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3.8$$

Trong đó  $a$  là hệ số khuếch tán nhiệt (còn gọi là hệ số truyền nhiệt độ) của vật liệu dẫn nhiệt ( $a = k / \rho c$ , với  $k$  là hệ số dẫn nhiệt,  $\rho$  là khối lượng riêng và  $c$  là nhiệt dung riêng của vật liệu).

Phương trình này có thể biểu diễn ở hệ tọa độ trụ  $(r, \theta, z)$  như sau:

$$\left[ \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad 3.9$$

Có 5 điều kiện ban đầu và điều kiện biên tiêu biểu đặc trưng cho các phương trình vi phân dẫn nhiệt như sau:

Nhiệt độ bề mặt cho trước:  $T(x, y, z, t) = f(x, y, z, t)$

Năng lượng nhiệt cung cấp cho trước:  $k \partial T(x, y, z, t) / \partial n = g(x, y, z, t)$  trong đó  $n$  là véc tơ đơn vị vuông góc với bề mặt.

Bề mặt cách nhiệt hoàn hảo:  $\partial T(x, y, z, t) / \partial n = 0$ .

Đối lưu tại bề mặt:  $k \partial T(x, y, z, t) / \partial n = h [T_o - T(x, y, z, t)]$  trong đó  $h$  là hệ số màng dẫn nhiệt bề mặt.

Hai vật rắn tiếp xúc nhau:  $T_1(x, y, z, t) = T_2(x, y, z, t)$  và

$k_1 \partial T(x, y, z, t) / \partial n = k_2 \partial T(x, y, z, t) / \partial n$  trong đó  $T_1, T_2$  là các nhiệt độ tại bề mặt tiếp xúc và  $k_1, k_2$  là các hệ số dẫn nhiệt tương ứng của hai vật tiếp xúc nhau.

### 3.2.2 Một số nguồn nhiệt hàn

#### 1. Nguồn nhiệt điểm tức thời

Phương trình (3.10) có nghiệm:

$$T(x, y, z, t) = \frac{Q}{\sqrt{4\pi at^3}} \exp\left(-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4at}\right) \quad 3.10$$

Biểu diễn sự phân bố nhiệt độ trong một vật có kích thước vô hạn [7] từ một nguồn nhiệt tại điểm  $(x', y', z')$ . Nhiệt lượng toàn phần ứng với sự phân bố này được tính bằng cách lấy tích phân các lượng nhiệt có trong đơn vị thể tích  $dx dy dz$  tương ứng với nhiệt độ  $T(x, y, z, t)$ :

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \rho c T(x, y, z, t) dx dy dz = \\ & \frac{Q \rho c}{\sqrt{4at^3}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right) dx \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(y-y')^2}{4at}\right) dy \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(z-z')^2}{4at}\right) dz = Q \rho c \end{aligned} \quad 3.11$$

Điều này có nghĩa phân bố nhiệt độ theo phương trình (1.10) là ứng với tổng lượng nhiệt đưa vào  $Q \rho c$ . Khi thời gian  $t$  tiến tới giá trị 0, phương trình (1.10) sẽ đạt tới giá trị bằng 0 tại tất cả các điểm bên trong vật rắn vô hạn, ngoại trừ điểm  $(x', y', z')$ , khi nó đạt tới giá trị vô cùng. Vì vậy có thể coi nghiệm của phương trình (1.10) như là một phân bố nhiệt độ tương ứng với nguồn nhiệt cung cấp có độ lớn  $Q \rho c$ , là một nguồn nhiệt hình thành tại thời điểm  $t=0$  ở điểm  $(x', y', z')$ . Nghiệm này được gọi là phân bố nhiệt độ do nguồn nhiệt điểm tức thời tại điểm  $(x', y', z')$  có độ lớn  $Q$  tạo ra ở thời điểm  $t=0$ .

Trên cơ sở này về nguồn nhiệt tức thời, ta có thể coi một vật rắn vô hạn với nhiệt độ ban đầu  $T_0(x, y, z)$  có phân bố nhiệt độ do một chuỗi vô số các nguồn nhiệt điểm tức thời hình thành ở thời điểm  $t=0$  trên toàn bộ thể tích vật thể. Lượng nhiệt  $\rho c T_0(x', y', z') dx' dy' dz'$  được tỏa ra trong phần tử thể tích  $dx' dy' dz'$  tại điểm  $(dx', dy', dz')$ . Nhiệt độ  $T(x, y, z, t)$  tại điểm bất kỳ trong vật thể  $(x, y, z)$  do ảnh hưởng tương ứng từ chuỗi các nguồn nhiệt điểm tức thời này sẽ được tính bằng cách lấy tích phân trên toàn bộ thể tích của vật thể vô hạn như sau:

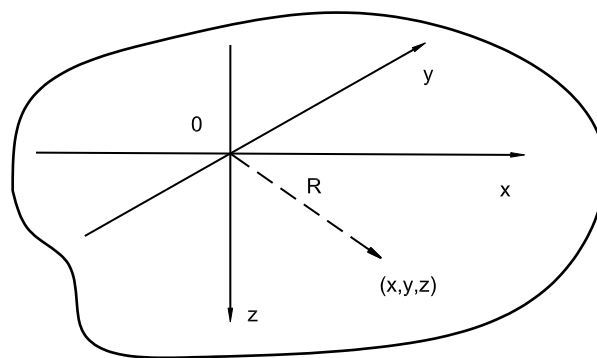


$$T(x, y, z, t) = \frac{1}{\sqrt{4\pi at^3}} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} T_0(x', y', z') \exp\left(-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4at}\right) dx' dy' dz' \quad 3.12$$

Nguồn nhiệt điểm thường được sử dụng để mô phỏng hàn đắp lên bề mặt vật rắn hoặc tấm dày. Nguồn nhiệt điểm tức thời dựa trên một số lượng hữu hạn lượng nhiệt tỏa ra tại một điểm và 0 thời điểm cho trước trong một vật rắn có kích thước vô hạn. Nghiệm cho bài toán nguồn nhiệt tức thời được coi là nghiệm căn bản trong phân tích nhiệt hàn.

Khi lấy tích phân theo thời gian, ta có thể nhận được nghiệm cho nguồn nhiệt điểm liên tục khi tỏa nhiệt tại một điểm cho trước với một tốc độ nhất định trong một đơn vị thời gian  $q(t)$ . Nếu lượng nhiệt cung cấp không phụ thuộc thời gian ( $Q=q(t)$ ) và việc cấp nhiệt được duy trì trong thời gian đủ dài, nghiệm này sẽ trở thành nghiệm của trường hợp nguồn nhiệt điểm ổn định. Còn nếu lấy tích phân cho nguồn nhiệt điểm theo các biến số không gian thích hợp, ta có thể nhận được nghiệm cho các bài toán các nguồn nhiệt tức thời dạng đường, dạng mặt phẳng, dạng mặt cầu hoặc dạng mặt trụ đối với các vật thể khác nhau.

Đối với những quá trình hàn có tốc độ nung nhanh, ví dụ hàn điểm, nguồn nhiệt điểm cố định, tức thời là một mô hình đơn giản và hữu ích. Trong trường hợp này, nguồn nhiệt điểm có lượng nhiệt  $Q$  được coi là tác động tức thời ở thời điểm  $t=0$  tại điểm gốc của hệ tọa độ đề các  $\{Oxyz\}$  nằm tại chính giữa bề mặt của vật hàn bán vô hạn mà mặt đỉnh của nó được cách nhiệt hoàn toàn, tức là điểm  $(x', y', z')$  mô tả trong phương trình (1.10) sẽ là  $(0,0,0)$  trong trường hợp này.



Hình 3. 2 Nguồn nhiệt điểm tức thời trong vật thể bán vô hạn

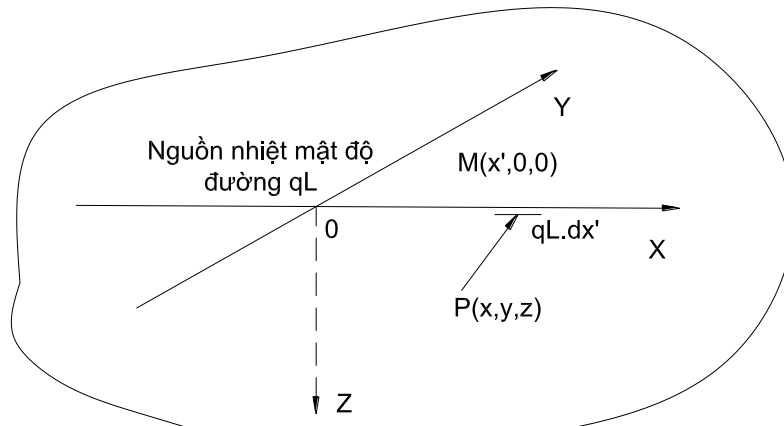
Tương quan nhiệt độ theo thời gian cho một điểm bất kỳ  $(x, y, z)$  nằm cách nguồn nhiệt điểm một khoảng  $R$  đã được Rykalin (trích dẫn tài liệu Rykalin) giải như sau:

$$T - T_0 = \frac{2Q}{\rho c (4\pi at)^{1.5}} \exp\left(-\frac{R^2}{4at}\right) \quad 3.13$$

Trong đó  $T_0$  là nhiệt độ ban đầu và khoảng cách  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

### 2. Nguồn nhiệt đường tức thời trong vật thể bán vô hạn

Nguồn nhiệt đường [7] được sử dụng khá rộng rãi trong mô phỏng các liên kết hàn giáp mối. Khi hàn tự động các tấm dày với tốc độ hàn tương đối cao, lượng nhiệt  $q$  do hồ quang hàn tỏa ra được coi là tác động tức thời tại thời điểm  $t=0$  và đồng thời dọc theo phần tử nằm tại đường dọc trục của vật thể bán vô hạn. Nguồn nhiệt hàn khi đó được coi là nguồn nhiệt tức thời:



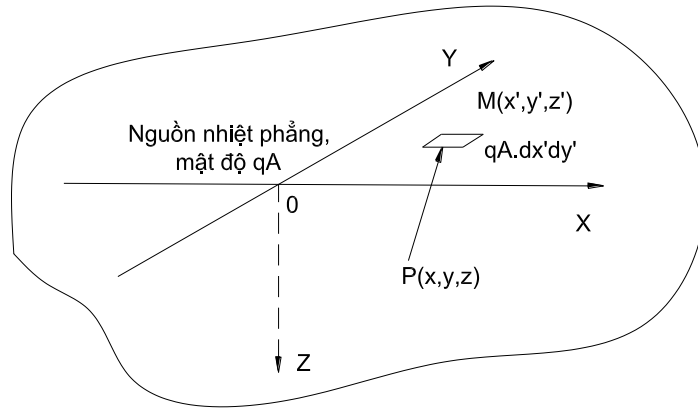
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT NAM ĐỊNH  
Hình 3. 3 Nguồn nhiệt đường tức thời trong vật thể bán vô hạn

Giả thiết nguồn nhiệt đường được phân bố đồng đều trên toàn bộ phần tử đường với mật độ nhiệt  $q_L$  (cal/mm) trên một đơn vị chiều dài. Nhiệt này được truyền theo hai hướng: vuông góc với hướng của nguồn nhiệt đường và xuyên qua vật thể bán vô hạn (các hướng  $y$  và  $z$  như trên hình). Như vậy lượng nhiệt ứng với một phần tử đường nhỏ vô hạn  $dx'$  sẽ là  $q_L dx'$ . Nếu áp dụng nguyên lý tổ hợp bằng cách giả thiết nguồn nhiệt đường tức thời này gồm một chuỗi các nguồn nhiệt điểm tức thời có lượng nhiệt cấp  $q_L dx'$ , và thay vào phương trình (1.13), sau đó lấy tích phân trên toàn bộ thể tích của vật thể bán vô hạn, ta có:

$$T - T_0 = \frac{2q_L}{\rho c \sqrt{\pi} (4at)} \exp\left(-\frac{y^2 + z^2}{4at}\right) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\left(-\frac{(x-x')^2}{4at}\right)}{\sqrt{4at}} dx' = \frac{q_L}{2\pi kt} \exp\left(-\frac{r_{yz}^2}{4at}\right) \quad 3.14$$

Với  $r_{yz}$  là khoảng cách vuông góc tính từ điểm  $P(x, y, z)$  tới nguồn nhiệt đường  $r_{yz}^2 = y^2 + z^2$ .

### 3. Nguồn nhiệt phẳng tức thời



Hình 3. 4 Nguồn nhiệt phẳng tức thời trong vật bán vô hạn

Loại nguồn nhiệt [7] này phù hợp để mô phỏng một số loại quá trình hàn, ví dụ như hàn điện tiếp xúc hoặc nung nóng tiếp xúc, hàn ma sát và hàn hồ quang nói chung. Giả sử có một nguồn nhiệt phẳng tức thời trên mặt phẳng biên của vật bán vô hạn. Lượng nhiệt được coi là tác động tức thời tại thời điểm  $t=0$  và được phân bố đồng đều trên toàn bộ diện tích của mặt phẳng có mật độ  $q_A(\text{cal}/\text{mm}^2)$ . Như vậy, lượng nhiệt phân bố trên một phần tử phẳng nhỏ vô hạn  $dx'dy'$  là  $q_A dx'dy'$ :

Sử dụng nguyên lý tổ hợp, ta có thể coi nguồn nhiệt phẳng bao gồm một chuỗi các nguồn nhiệt có lượng nhiệt cung cấp  $Q=q_A dx'dy'$ . Thay giá trị  $Q$  này vào phương trình (1.13) và lấy tích phân trên toàn bộ thể tích của vật, ta sẽ có được nghiệm cho nhiệt độ tại điểm bất kỳ như sau:

$$T - T_0 = \frac{2q_A}{\rho c \sqrt{4at}} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\left(\frac{-(x-x')^2}{4at}\right)}{\sqrt{4at}} dx' \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\exp\left(\frac{-(y-y')^2}{4at}\right)}{\sqrt{4at}} dy' \quad 3.15$$

Phương trình (1.15) còn có thể đơn giản hóa bằng cách thay biểu thức toán học

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-\xi^2) d\xi = \sqrt{\pi} \quad , \quad \text{khi đó ta có:}$$

$$T - T_0 = \frac{2q_A}{\rho c \sqrt{4\pi at}} \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right) \quad 3.16$$

#### 4. Nguồn nhiệt phân bố theo Gauss

Nguồn nhiệt phân bố theo chuẩn Gauss là một mô hình đơn giản hóa cho nguồn nhiệt hàn mang tính tập trung cục bộ khi mật độ của nó được giả định tuân theo dạng phân bố Gauss. Thông thường, trường nhiệt độ ở vùng lân cận nguồn nhiệt phụ thuộc nhiều vào mật độ dòng nhiệt của nguồn nhiệt. Tuy nhiên, ở những vị trí xa nguồn nhiệt hơn, nhiệt độ không chịu ảnh hưởng nhiều của mật độ dòng nhiệt.

Vì vậy, nguồn nhiệt phân bố như vậy có phân bố nhiệt độ tương tự như khi ta thay nguồn nhiệt đó bằng một nguồn nhiệt tập trung tại tâm điểm của bề mặt của nó. Ta có thể sử dụng nguồn nhiệt có phân bố Gauss để mô phỏng nguồn nhiệt hàn nhằm dự báo tốt hơn trường nhiệt độ ở gần tâm nguồn nhiệt, đồng thời có thể khắc phục được những nhược điểm của các mô hình nguồn nhiệt điểm, nguồn nhiệt đường khi hai mô hình này cho kết quả tính toán nhiệt độ cao vô hạn tại tâm nguồn nhiệt.

Nguồn nhiệt phân bố Gauss được dùng để mô phỏng hồ quang hàn, ngọn lửa hàn hoặc nguồn nhiệt hàn dùng tia laser hoặc tia điện tử, khi mà mật độ của nguồn nhiệt  $q(x,y)$  tại điểm  $(x,y)$  bất kỳ được biểu diễn theo phương trình:

$$q(x, y) = q_{\max} \cdot \exp(-kr^2) \quad 3.17$$

Trong phương trình (1.17),  $q_{\max}$  là giá trị tối đa mật độ của nguồn nhiệt,  $r$  là khoảng cách từ điểm  $(x,y)$  tới tâm nguồn nhiệt ( $r^2 = x^2 + y^2$ ) và  $k$  là hệ số xác định mật độ tập trung nhiệt năng của nguồn nhiệt, còn được gọi là thông số phân bố, thể hiện bằng chiều rộng của đường cong phân bố Gauss (giá trị  $k$  càng cao thì nguồn nhiệt càng có mức độ tập trung nhiệt năng cao).

Giả sử  $Q$  là toàn bộ lượng nhiệt do nguồn nhiệt hàn tỏa ra. Theo điều kiện cân bằng nhiệt năng:

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} q_{\max} \cdot \exp(-kr^2) dx dy \quad 3.18$$

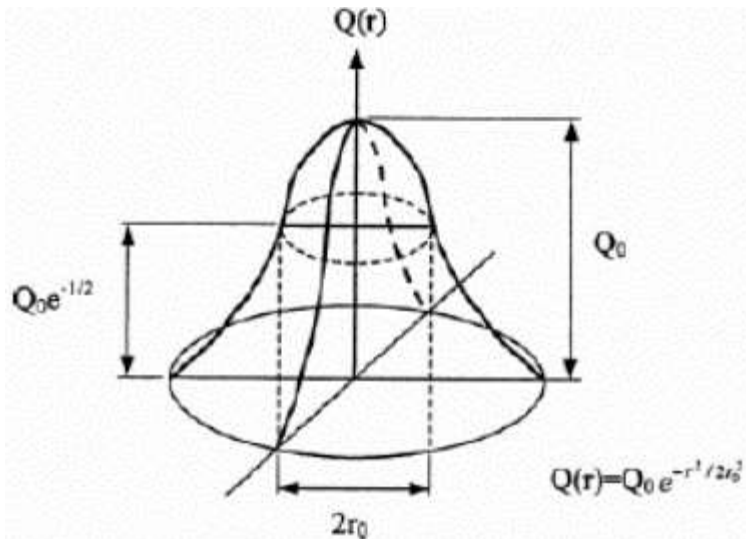
Hoặc

$$\frac{Q}{q_{\max}} = \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-kx^2) dx \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ky^2) dy = \frac{\pi}{k} \quad (3.19)$$

Kết quả là mật độ tối đa của nguồn nhiệt  $q_{\max}$  sẽ phụ thuộc vào lượng nhiệt  $Q$  và thông số  $k$  theo quan hệ  $q_{\max} = Qk / \pi$  và phương trình (1.18) trở thành:

$$q(x, y) = \frac{Qk}{\pi} \exp(-kr^2) \quad (3.20)$$

Nhận thấy khi  $r \rightarrow 0$  thì mật độ nhiệt  $q \rightarrow q_{\max}$ , là nguồn nhiệt có phân bố chuẩn Gauss này sẽ cho nhiệt độ hữu hạn tại tâm nguồn nhiệt điểm. Mô hình này cho kết quả dự đoán nhiệt độ tại tâm nguồn nhiệt có tính thực tế hơn hai mô hình trước.



Hình 3. 5 Nguồn nhiệt phẳng theo chuẩn phân bố Gauss

Một loại nguồn nhiệt phẳng [6][7] phân bố Gauss có dạng tổng quát hơn đã được giới thiệu và biết đến như là nguồn nhiệt phân bố Gauss hai biến, trong đó các thông số phân bố Gauss không giống nhau ở hai hướng vuông góc  $x$  và  $y$ . Giả sử  $\sigma_a$  và  $\sigma_b$  là các giá trị tương ứng của các thông số phân bố của nguồn nhiệt phân bố Gauss hai biến này theo các hướng vuông góc  $x$  và  $y$ , phương trình mật độ nhiệt cho một điểm bất kỳ  $(x,y)$  trong nguồn nhiệt phân bố Gauss hai biến này là:

$$q(x, y) = q_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{kx^2}{\sigma_a} - \frac{ky^2}{\sigma_b}\right) \quad (3. 21)$$

Nếu  $Q$  là tổng lượng nhiệt của nguồn thì từ điều kiện cân bằng nhiệt ta có:

$$Q = q_{\max} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{kx^2}{\sigma_a}\right) dx \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{ky^2}{\sigma_b}\right) dy = \frac{q_{\max} \sigma_a \sigma_b \pi}{k} \quad (3. 22)$$

Thay  $q_{\max} = Qk / \pi \sigma_a \sigma_b$ , phương trình (1.20) sẽ có dạng:

$$q(x, y) = \frac{Qk}{\pi \sigma_a \sigma_b} \exp\left(-\frac{kx^2}{\sigma_a} - \frac{ky^2}{\sigma_b}\right) \quad (3. 23)$$

### 5. Nguồn nhiệt dạng khối cầu

Xét một khối hình cầu [6][7] có bán kính  $r$  như một nguồn nhiệt có mật độ nhiệt dạng khối thể tích trong đó mật độ nhiệt giảm dần từ giá trị lớn nhất  $Q_{\max}$  tính từ tâm hình cầu tới bề mặt của nó. Mật độ nhiệt tại điểm bất kỳ  $(x,y,z)$  trong nguồn nhiệt cầu này được biểu diễn bằng công thức:

$$Q(x, y, z) = Q_{\max} \cdot \exp(-kR^2) \quad (3. 24)$$

Trong đó,  $R$  là khoảng cách từ điểm  $(x,y,z)$  tới tâm hình cầu này ( $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ ) và  $k$  là thông số phân bố của nguồn nhiệt.

Nếu  $Q$  là tổng lượng nhiệt tỏa ra từ nguồn nhiệt này, từ điều kiện cân bằng nhiệt, lượng nhiệt tỏa ra tới một vật vô hạn sẽ là:

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} Q_{\max} \cdot e^{-kr^2} dx dy dz = Q_{\max} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-kx^2} dx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ky^2} dy \int_{-\infty}^{\infty} e^{-kz^2} dz = \frac{\pi\sqrt{\pi}}{k\sqrt{k}} Q_{\max} \quad (3.25)$$

Do đó, giá trị  $Q_{\max}$  sẽ là:

$$Q = \frac{Q_k \sqrt{k}}{\pi\sqrt{\pi}} \quad (3.26)$$

Ta hãy giả thiết mật độ nhiệt tại bề mặt nguồn nhiệt cầu này chỉ giảm xuống còn 5% giá trị tại tâm nguồn nhiệt, tức là:

$$0,05Q_{\max} = Q_{\max} \cdot \exp(-kr_h^2) \quad (3.27)$$

Do đó thông số  $k$  sẽ có dạng:

$$k = \frac{-\ln(0,05)}{r_h^2} = \frac{2,9975}{r_h^2} \approx \frac{3}{r_h^2} \quad (3.28)$$

Thay phương trình (1.28) vào phương trình (1.26) ta có:

$$Q_{\max} = \frac{3\sqrt{3}Q}{\pi\sqrt{\pi} \cdot r_h^3} \quad (3.29)$$

Vì vậy, phương trình cho mật độ nguồn nhiệt sẽ là:

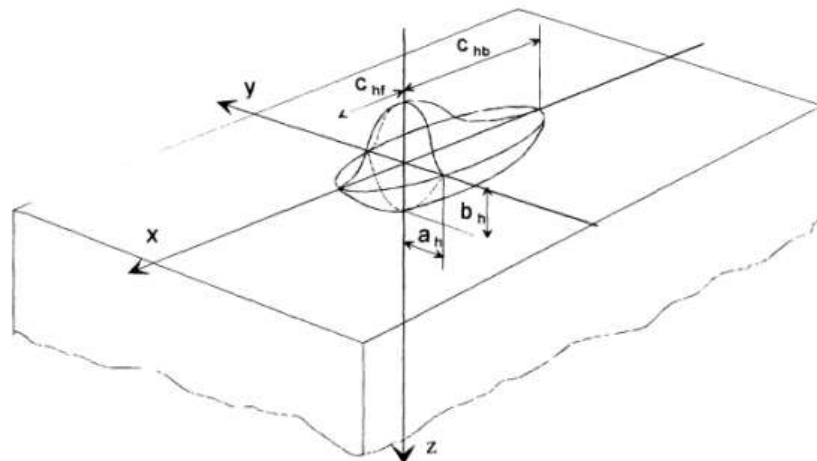
$$Q(x, y, z) = \frac{3\sqrt{3}Q}{\pi\sqrt{\pi} \cdot r_h^3} \cdot \exp\left(-\frac{3R^2}{r_h^2}\right) \quad (3.30)$$

### 6. Nguồn nhiệt khối có mật độ ellipsoid đơn

Goldak và cộng sự [6][7] đã từng đưa ra mô hình nguồn nhiệt khối bán ellipsoid đơn trong đó mật độ nhiệt tuân theo quy luật phân bố Gauss trong toàn bộ thể tích nguồn nhiệt. Mật độ  $Q(x,y,z)$  tại điểm bất kỳ  $(x,y,z)$  bên trong khối bán ellipsoid này được biểu diễn qua phương trình:

$$Q(x, y, z) = Q_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{3x^2}{c_h^2} - \frac{3y^2}{a_h^2} - \frac{3z^2}{b_h^2}\right) \quad (3.31)$$

Trong công thức (1.30),  $a_h, b_h, c_h$  là các thông số hình học của nguồn nhiệt, xem hình (giả thiết  $c_{hf}=c_{hb}=c_h$ ).



Hình 3. 6 Mô hình nguồn nhiệt ellipsoid

Tương tự như vậy, nếu  $Q$  là tổng lượng nhiệt do nguồn nhiệt này tỏa ra, điều kiện cân bằng nhiệt với lượng nhiệt tỏa ra vật vô hạn là:

$$Q = Q_{\max} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{3x^2}{c_h^2}} dx \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{3y^2}{a_h^2}} dy \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{3z^2}{b_h^2}} dz = Q_{\max} \frac{a_h b_h c_h \pi \sqrt{\pi}}{6\sqrt{3}} \quad (3.32)$$

Viết theo cách khác:

$$Q_{\max} = \frac{6\sqrt{3}Q}{a_h b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \quad (3.33)$$

Thay phương trình (1.32) vào phương trình (1.30), phương trình cho nguồn nhiệt ellipsoid đơn trong vật bán vô hạn sẽ là:

$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}Q}{a_h b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{3x^2}{c_h^2} - \frac{3y^2}{a_h^2} - \frac{3z^2}{b_h^2}\right) \quad (3.34)$$

Với nguồn nhiệt hồ quang,  $Q = \eta UI$ , trong đó  $U$  là điện áp hồ quang,  $I$  là cường độ dòng điện,  $\eta$  là hiệu suất hồ quang hàn.

Goldak cùng cộng sự [7], từ kinh nghiệm đã nghiên cứu loại nguồn nhiệt này, đã chỉ ra rằng khi sử dụng chúng để tính toán biến thiên nhiệt độ ở phía trước hồ quang, kết quả nhận được nhỏ hơn so với kết quả đo thực tế. Trong khi đó, tính toán biến thiên nhiệt độ ở phía sau hồ quang lớn hơn so với thực tế. Để khắc phục nhược điểm này của nguồn nhiệt ellipsoid đơn nói trên, các tác giả đã kết hợp hai nguồn nhiệt ellipsoid lại thành một nguồn nhiệt và đặt tên là “*nguồn nhiệt ellipsoid kép*”.

Nguồn nhiệt có mật độ phân bố ellipsoid kép được xác định bằng cách phối hợp hai khối bán ellipsoid khác nhau để tạo thành một nguồn nhiệt, còn gọi là nguồn nhiệt ellipsoid kép. Mật độ nhiệt bên trong từng khối bán ellipsoid được mô tả bằng hai phương trình riêng. Đối với một điểm bất kỳ  $(x, y, z)$  bên trong khối bán ellipsoid đầu tiên (nằm phía trước hồ quang hàn), mật độ nguồn nhiệt được biểu diễn bởi phương trình:

$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}r_f Q}{a_h b_h c_h \pi \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{c_{hf}^2} - \frac{3y^2}{a_h^2} - \frac{3z^2}{b_h^2}\right) \quad (3.35)$$

Đối với một điểm bất kỳ  $(x, y, z)$  bên trong khối ellipsoid thứ hai (nằm phía sau hồ quang hàn), mật độ nguồn nhiệt được biểu diễn bởi phương trình:



$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}r_b Q}{a_h b_h c_{hb} \pi \sqrt{\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{3x^2}{c_{hb}^2} - \frac{3y^2}{a_h^2} - \frac{3z^2}{b_h^2}\right) \quad (3.36)$$

Trong hai công thức trên,  $a_h$ ,  $b_h$ ,  $c_{hf}$ , và  $c_{hb}$  là các thông số hình học của nguồn nhiệt khối ellipsoid kép, xem hình;  $Q$  là công suất của nguồn nhiệt và  $r_f$ ,  $r_b$ , là các hệ số tỷ lệ, đại diện cho sự phân chia nhiệt phía trước và phía sau nguồn nhiệt, trong đó,  $r_f + r_b = 2$ .

Điều cần lưu ý là nguồn nhiệt khối ellipsoid kép có mật độ nhiệt năng mang tính liên tục nên giá trị  $Q(x, y, z)$  từ hai phương trình (1.35) và (1.36) phải bằng nhau tại mặt phẳng  $x=0$ . Từ điều kiện này, ta có thêm ràng buộc đối với các hệ số  $r_f$ , và  $r_b$  là  $r_f/c_{hf} = r_b/c_{hb}$ .

Vì vậy, giá trị của hai hệ số này được xác định như sau:

$$r_f = 2c_{hf} / (c_{hf} + c_{hb}) \quad (3.37)$$

$$r_b = 2c_{hb} / (c_{hf} + c_{hb}) \quad (3.38)$$

Như vậy có thể thấy rằng nguồn nhiệt khối ellipsoid kép có phân bố Gauss này có thể được biểu diễn bằng 5 thông số là: hiệu suất hồ quang  $\mu$ , và 4 thông số hình học của nguồn nhiệt:  $a_h, b_h, c_{hf}$  và  $c_{hb}$ .

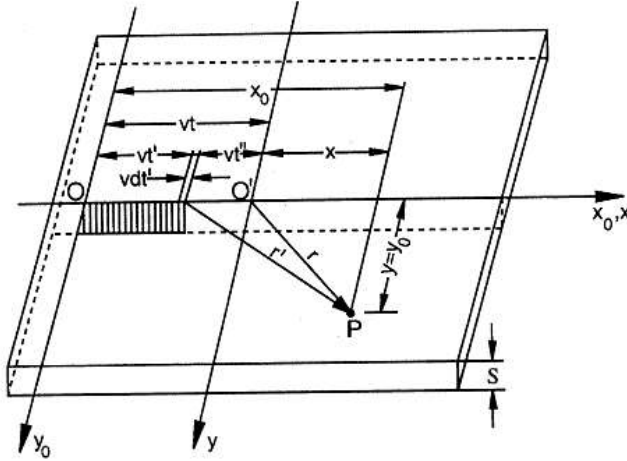
Goldak và cộng sự đã chỉ ra một mối tương quan giữa kích thước của nguồn nhiệt và kích thước của vũng hàn, đồng thời đã cho rằng có thể nhận được những giá trị thích hợp cho  $a_h, b_h, c_{hf}$  và  $c_{hb}$  bằng cách đo trực tiếp các thông số hình học của vũng hàn.

### 3.3 Giới thiệu nguồn nhiệt khi hàn tấm mỏng

Hình 3. 7 minh họa khi hàn tấm mỏng [6][7], thường khi hàn tấm mỏng nguồn nhiệt là nguồn nhiệt đường, chiều dày tấm là  $S$  và ở nhiệt độ ban đầu  $T_0$ . Tại thời gian  $t = 0$ , nguồn nhiệt di chuyển với tốc độ không đổi  $v$ , theo phương  $x$ . Nhiệt độ tăng một lượng  $T - T_0$  tại điểm  $P$  với thời gian  $t$ . Giả thiết, nhiệt độ không đổi theo chiều dày tấm. Theo công thức 1.46, nguồn nhiệt cơ bản,  $dJ = Q \cdot dt'$  giải phóng ra ở vị trí  $vt'$  sẽ làm tăng nhiệt độ lên một lượng  $dT$  tại điểm  $P$  với thời gian  $t$ .

$$dT = \frac{Q dt'}{Sk4\pi(t-t')} \exp\left[-\frac{(r')^2}{4a(t-t')}\right] = \frac{Q dt'}{Sk4\pi''} \exp\left[-\frac{(r')^2}{4at''}\right] \quad (3.39)$$





Hình 3. 7 Nguồn nhiệt đường di chuyển trong tấm mỏng

Trong đó  $t'' = t - t'$  là thời gian mà nguồn nhiệt di chuyển được một khoảng cách  $r'$  đến điểm P. Khi chúng ta quan tâm tới điểm P của nguồn nhiệt tại thời gian  $t$ , chúng ta mong chờ lời giải với thời gian độc lập. Điều này đạt được khi ta chuyển hệ trục tọa độ từ O đến O'

Từ đó:

$$dT = \frac{Qdt'}{Sk4\pi''} \exp\left[-\frac{(x+vt'')^2 + y^2}{4at''}\right] = \frac{Qdt'}{Sk4\pi''} \exp\left[-\frac{vx}{2a} - \frac{r^2}{4at''} - \frac{v^2t''}{4a}\right] \quad (3.40)$$

$$\text{Với } r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.41)$$

Lấy tích phân từ  $t'' = t (t'=0)$  đến  $t'' = 0 (t'=t)$  ta có:

$$(r^*)^2 = \frac{v^2 r^2}{4a^2}; \quad \omega = \frac{v^2 t''}{4a}$$

Hơn nữa,

$$t'' = \frac{4a}{v^2} \omega, \quad t' = \frac{4a}{v^2} \omega, \quad \frac{r^2}{4at''} = \frac{r^{*2}}{4\omega} \quad (3.42)$$

thay vào công thức 3. 54 ta được

$$T - T_0 = \frac{Q}{S4\pi k} \exp\left[-\frac{vx}{2a}\right] \int_{\omega=0}^{\omega=\frac{v^2 t}{4a}} \exp\left[-\frac{(r^*)^2}{4\omega} - \omega\right] \frac{d\omega}{\omega} \quad (3.43)$$

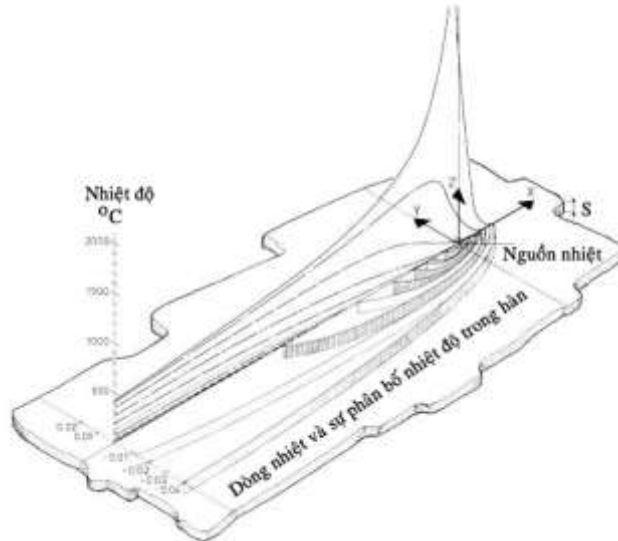
$$\text{Ta lại có: } \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(r^*)^2}{4\omega} - \omega\right] \frac{d\omega}{\omega} = 2K_0(r^*) = 2K_0\left(\frac{vr}{2a}\right)$$

Trong đó  $K_0(r^*)$  là hàm Bessel. Lời giải cho tấm mỏng được viết như sau:

$$T - T_0 = \frac{Q}{S4\pi k} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \left[ K_0\left(\frac{vr}{2a}\right) - \frac{1}{2} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(r^*)^2}{4\omega} - \omega\right] \frac{d\omega}{\omega} \right] \quad (3.44)$$

$$\text{Với } \omega = \frac{v^2 t''}{4a} \text{ ta có } T - T_0 = \frac{Q}{2S\pi k} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0\left(\frac{vr}{2a}\right) \quad (3.45)$$

Công thức 1.45 liên quan đến lời giải tấm mỏng của Rosenthal. cho ta thấy đường bao đẳng nhiệt càng xa nguồn nhiệt càng dài.



Hình 3. 8 Sự phân bố nhiệt hàn trong tấm mỏng

Để đơn giản trong việc tính toán sự phân bố nhiệt độ ở trạng thái giả ổn định trường hợp hàn tấm mỏng, người ta đưa các tham số không thứ nguyên vào:

$$\delta = \frac{v.S}{2a} \quad (3.46)$$

Từ công thức 1.46 ta có

$$\frac{\theta.\delta}{n_3} = \exp(-\xi) K_0(\sigma_5) \quad (3.47)$$

S: chiều dày tấm hàn (mm);

v: vận tốc hàn (mm/s);

a: hệ số dẫn nhiệt (tùy thuộc vào từng loại vật liệu);

-  $\xi$ : tọa độ không thứ nguyên theo phương x.

-  $\psi$ : tọa độ không thứ nguyên theo phương y.

-  $K_0(\sigma_5)$ : hàm Bessel

$$K_0(\sigma_5) = \sqrt{\frac{\pi}{2.\sigma_5}} \exp(-\sigma_5) \quad (3.48)$$

-  $\sigma_5$ : véc tơ bán kính không thứ nguyên (tính từ điểm xét tới tâm nguồn nhiệt).

$$\sigma_5 = \sqrt{\xi^2 + \psi^2} \quad (3.49)$$

Thay số vào công thức (3.59) ta có:

$$\frac{\theta.\delta}{n_3} = \exp(-\xi) K_0 \left( \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{\xi^2 + \psi^2}}} \exp(-\sqrt{\xi^2 + \psi^2}) \right) \quad (3.50)$$

Sự phân bố nhiệt độ ở trạng thái giả ổn định phụ thuộc vào tham số  $(\theta\delta/n_3)$ . Nhưng dạng của đường đẳng nhiệt không bị ảnh hưởng của vận tốc hàn vì cả  $\sigma$  và  $n_3$  đều tỷ lệ với vận tốc hàn ( $v$ ).

Chiều rộng lớn nhất của đường bao đẳng nhiệt đạt được bằng cách cho  $\partial(\theta\delta/n_3)/\partial\xi = 0$  từ đó ta có

$$\frac{\partial(\theta\delta/n_3)}{\partial\xi} = \frac{\partial(\theta\delta/n_3)}{\partial\sigma_5} \frac{\partial\sigma_5}{\partial\xi} = -\exp(\xi_m) \left[ K_0(\sigma_{5m}) + \frac{\xi_m}{\sigma_{5m}} K_1(\sigma_{5m}) \right] \quad (3.51)$$

$$\Rightarrow \xi_m = -\sigma_{5m} \frac{K_0(\sigma_{5m})}{K_1(\sigma_{5m})} \quad (3.52)$$

Thay công thức (1.52) vào công thức (1.47) ta có

$$\frac{\theta.\delta}{n_3} = \exp \left[ \sigma_{5m} \frac{K_0(\sigma_{5m})}{K_1(\sigma_{5m})} \right] K_0(\sigma_{5m}) \quad (3.53)$$

Phương trình (1.53) được sử dụng để tính chiều rộng vùng đẳng nhiệt lớn nhất  $\psi_m$  và tiết diện ngang ( $\Lambda_2$ ) khi hàn tấm mỏng.

Ta có:

$$\psi_m = \sqrt{(\sigma_{5m})^2 - (\xi_m)^2} = \sigma_{5m} \sqrt{1 - \frac{K_0(\sigma_{5m})^2}{K_1(\sigma_{5m})^2}} \quad (3.54)$$

$$\text{Và } \Lambda/\delta = 2 \cdot \psi_m = 2 \cdot \sigma_{5m} \sqrt{1 - \frac{K_0(\sigma_{5m})^2}{K_1(\sigma_{5m})^2}} \quad (3.55)$$

Khoảng cách từ tâm nguồn nhiệt tới phía trước ( $\xi'$ ) và phía sau ( $\xi''$ ) của đường bao đẳng nhiệt đạt được bằng cách thay  $\sigma_5 = \pm \xi$  vào phương trình

$$\text{Ta có } \xi' = \ln \left( \frac{n_3 \cdot K_0(\xi')}{\theta.\delta} \right), \text{ với } \xi' > 0 \quad (3.56)$$

$$\xi'' = \ln \left( \frac{n_3 \cdot K_0(-\xi'')}{\theta.\delta} \right), \text{ với } \xi'' < 0 \quad (3.57)$$

Đối với các điểm nằm gần tâm mỗi hàn phía sau nguồn nhiệt  $\sigma_5 = -\xi = \tau$

Khi  $\tau > 1$  (nghĩa là  $t > 2a/v^2$ ), ta có  $K_0(\tau) = \exp(-\tau) \sqrt{\pi/2\tau}$

$$\text{Từ đó phương trình (1.47) trở thành } \frac{\theta.\delta}{n_3} = \sqrt{\pi/2\tau} \quad (3.58)$$

Phương trình (1.58) cũng là cơ sở để tính thời gian nguội trong khoảng thời gian xác định nào đó (ví dụ từ 275°C xuống nhiệt độ ban đầu của vật liệu).

$$\Delta\tau = \frac{\pi}{2}(n_3/\delta)^2 \left[ \frac{1}{(\theta_2)^2} - \frac{1}{(\theta_1)^2} \right] \quad (3.59)$$

Ví dụ khảo sát thời gian nguội từ 800 đến 500°C là

$$\Delta\tau_{8/5} = \frac{\pi}{2}(n_3/\delta)^2 \left[ \frac{1}{(\theta_{500})^2} - \frac{1}{(\theta_{800})^2} \right] \quad (3.60)$$

Thời gian nguội thực được xác định theo:

$$\Delta t_{8/5} = \left[ \frac{1}{4\pi k \rho c} \right] \left[ \frac{1}{(500 - T_0)^2} - \frac{1}{(800 - T_0)^2} \right] \left[ \frac{q_0}{v.S} \right]^2 \quad (3.61)$$

Như chúng ta đã biết, hầu hết thép kết cấu sử dụng trong chế tạo kết cấu hàn, quá trình phân hủy austenit xảy ra dưới nhiệt độ  $A_{r1}$ . Đặc biệt trong dải nhiệt độ chuyển biến 800 ÷ 500°C của austenit rất dễ hình thành các tổ chức kim loại có độ cứng cao và nhạy cảm với nứt. Vì vậy các nhà nghiên cứu đã đề nghị sử dụng thông số thời gian nguội (tính bằng giây), trong khoảng nhiệt độ đó, gọi là  $\Delta t_{8/5}$  làm đặc trưng cho quá trình nguội (trong khoảng thời gian này, đường cong nguội thường không tuyến tính). Đối với liên kết hàn thép kết cấu, giá trị tiêu biểu của thời gian nguội này như sau:

|                                   |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| - Hàn hồ quang tay                | $\Delta t_{8/5} = 1 \div 10s$    |
| - Hàn trong môi trường khí bảo vệ | $\Delta t_{8/5} = 2 \div 50s$    |
| - Hàn dưới lớp thuốc              | $\Delta t_{8/5} = 10 \div 100s$  |
| - Hàn điện xỉ                     | $\Delta t_{8/5} = 60 \div 1000s$ |

Tuy nhiên đối với thép hợp kim thấp, chuyển biến pha  $\gamma-\alpha$  xảy ra ở nhiệt độ thấp hơn nhiều, trong khoảng từ 500 ÷ 300°C, vì vậy nhiều nhà nghiên cứu coi khoảng nhiệt độ nguội 800 ÷ 150°C là chỉ tiêu đặc trưng cho quá trình nguội của chu trình nhiệt hàn. Ngoài ra, còn có ảnh hưởng của tốc độ nguội ở 300°C lên sự khuếch tán của hydro và tính nhạy cảm của thép đối với nứt nguội do hydro gây ra.

### 3.4 Trường nhiệt độ

Việc xác định trường nhiệt hàn, có hai yếu tố khác nhau đòi hỏi phải quan tâm, đó là loại nguồn nhiệt và phân tích nhiệt độ ở trạng thái đàn dẻo. Các yếu tố này ảnh hưởng tới việc phân tích tỷ số nguồn nhiệt và tốc độ di chuyển của nguồn nhiệt và chiều dày tấm hàn. Yếu tố thứ hai ảnh hưởng tới sự biến dạng tại nguồn nhiệt và sự phân bố nguồn nhiệt và việc hình thành ứng suất dư.

Hệ số dẫn nhiệt được xác định theo công thức (3.1), dòng năng lượng từ vùng nhiệt độ cao đến vùng có nhiệt độ thấp hơn, gradient nhiệt độ  $\nabla T$ :

$$Q'' = -k \cdot \nabla T \quad (\text{W/m}^2) \quad (3.62)$$



Hình 3. 9 Nguồn nhiệt trong hàn GMAW

Trong đó  $k$  là hệ số dẫn nhiệt của vật liệu và  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ . Dấu trừ để thể hiện  $Q''$  mang dấu dương. Bởi vì nguồn nhiệt luôn được truyền theo hướng giảm nhiệt độ giống trạng thái trên. Nguồn năng lượng yêu cầu phải thay đổi nhiệt độ của vật liệu và được xác định bởi các thông số của nguồn nhiệt như là nhiệt dung riêng  $c$  (hoặc gia số Enthalpy,  $H$ ). Theo đó dòng nhiệt và sự phân bố nhiệt độ sẽ là  $Q''$  ( $\text{W/m}^3$ ), sự bảo toàn năng lượng được xác định theo công thức (3.2).

$$\rho c \dot{T} - \nabla(k \nabla T) - Q''' = 0 \quad (3.63)$$

Trong đó  $(\dot{\cdot}) = \frac{d}{dt}$  với  $t$  là thời gian và  $\rho$  là khối lượng riêng của vật liệu

Để có lời giải của công thức trên thì điều kiện biên và điều kiện ban đầu phải cho trước. Điều kiện biên hoặc là độc lập (nhiệt độ cho trước) hoặc là tự nhiên (dòng nhiệt cho trước) và thời gian.

Điều kiện biên đối với hệ số truyền nhiệt được chia ra làm sự bức xạ nhiệt độ và sự trao đổi nhiệt (đối lưu). Nhiệt độ của vật hàn được tính theo độ C (Celsius), sự bức xạ nhiệt xung quanh nhiệt độ  $T_0$  theo định luật Stefan-Boltzman :

$$Q''_{\text{rad}} = \sigma \varepsilon (T^4 - T_0^4) \\ = \sigma \varepsilon (T^2 - T_0^2)(T + T_0)(T - T_0) = h_{\text{rad}}(T - T_0) \quad (3.64)$$

Trong đó  $\varepsilon$  là độ phát xạ,  $\sigma$  là hằng số Stefan-Boltzmann và  $h_{\text{rad}}$  là nhiệt độ phụ thuộc vào hệ số truyền nhiệt do bức xạ.

Nhiệt độ tại điểm khảo sát là  $T$ , bao quanh là chất lỏng hoặc khí tại nhiệt độ  $T_0$ , sự đối lưu nhiệt tồn tại giữa các lớp nhiệt (lớp hàn) với hệ số truyền nhiệt  $a$ , vì thế sự thay đổi nhiệt độ giữa các biên nóng chảy gây ra một dòng chảy,  $Q''_{\text{con}}$ , được xác định

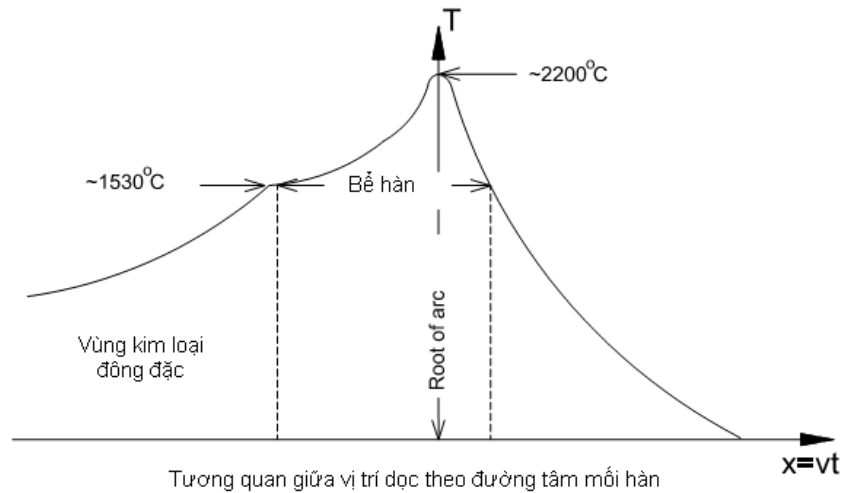
$$Q''_{\text{con}} = a \cdot (T - T_0) \quad (3.65)$$

Dòng chảy được xác định theo công thức

$$a = 0,332 \frac{k}{m} \text{Re}^{1/3} \text{Pr}^{1/3} \quad (3.66)$$

Trong đó Pr là hệ số Prandtl và Re là hệ số Reynolds, a hệ số truyền nhiệt, k là hệ số dẫn nhiệt (W/mK) với m là chiều dày lớp biên. Độ dẫn nhiệt trong không khí thường trong khoảng  $(2 \div 10) \frac{W}{mK}$ .

Việc phân tích FEM với các điều kiện biên được ứng dụng để xác định giá trị của hệ số truyền nhiệt và nhiệt độ ở các vùng lân cận



Hình 3. 10 Tương quan giữa vị trí và nhiệt độ, [2]

### 3.5 Sự phân bố nhiệt độ ở trạng thái giả ổn định.

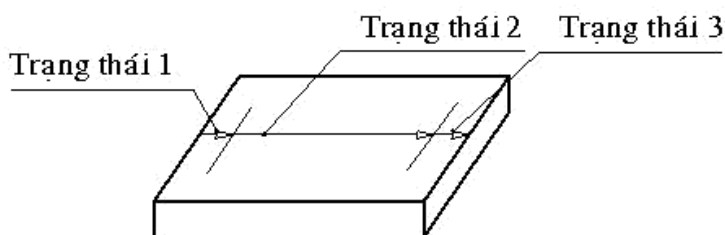
Với các điều kiện cho trước việc đi tìm nghiệm cho bài toán dòng nhiệt là tương đối khó, vì nó phụ thuộc vào tính chất nhiệt độ của kim loại cơ bản. Phần lớn kim loại và hợp kim đều có các giả thiết không thực, vì cả hai hệ số dẫn nhiệt k, hệ số truyền nhiệt  $a = \frac{k}{\rho c}$  và nhiệt dung khối ( $\rho c$ ) có thể rất đa dạng phụ thuộc vào nhiệt độ.

Nguồn nhiệt trong quá trình hàn là nguồn nhiệt di động dọc theo chiều dài đường hàn. Giả thiết rằng nguồn nhiệt di chuyển với tốc độ không đổi và theo đường thẳng và đường bao nhiệt nhìn từ nguồn nhiệt sẽ ở trạng thái giả ổn định. Người ta nói rằng trạng thái giả ổn định là trạng thái mà ở đó nhiệt độ không đổi theo thời gian tại vị trí quan sát ở phía sau nguồn nhiệt.

Một cách khác mô tả như là một điều kiện để so sánh trường nhiệt độ quanh nguồn nhiệt định di chuyển dọc theo hướng hàn. Điểm nằm dọc theo đường tâm mối hàn có nhiệt độ khác so với điểm nằm cách xa nguồn nhiệt (với tốc độ hàn không đổi theo trục thời gian) được thể hiện trên Hình 3. 10.

Trong hàn, kim loại cơ bản sẽ được nung nóng và một phần kim loại nóng chảy tạo thành bể hàn.

Theo phương ngang, sự khác biệt giữa vùng kim loại mối hàn, vùng ảnh hưởng nhiệt và kim loại cơ bản. Nhiệt độ đỉnh và tốc độ nguội quyết định tổ chức tế vi vùng ảnh hưởng nhiệt (HAZ), ở đó gradient nhiệt độ, tốc độ kết tinh và tốc độ nguội.



Hình 3. 11 Ba trạng thái cơ bản trong hàn hồ quang

Nguồn nhiệt trong hồ quang hàn liên quan đến ba trạng thái Hình 3. 11

Trạng thái 1: Giai đoạn bão hòa nhiệt đó là trạng thái nhiệt độ xung quanh nguồn nhiệt tăng lên.

Trạng thái 2: Giai đoạn giả ổn định là trạng thái mà nhiệt độ phân bố ổn định trong một hệ thống tọa độ, di chuyển cùng với nguồn nhiệt.

Trạng thái 3: Giai đoạn san phẳng mà ở đó nhiệt độ sẽ giảm khi hồ quang hàn kết thúc.

Sự giãn nở và co ngót do nhiệt chủ yếu xuất hiện ở phần KLCB chính vì thế ở vùng HAZ xuất hiện trạng thái giả ổn định.

Ở giai đoạn giả ổn định, việc tính toán là tương đối đơn giản, vì bài toán có thể được giải giống như lời giải cho trường hợp nguồn nhiệt ổn định và di động. Trạng thái giả ổn định xuất hiện trong một vùng rất nhỏ gần tâm mối hàn trong quá trình hàn dài. Phần lớn việc tính toán liên quan tới dòng nhiệt truyền vào vật hàn dựa trên sự phân bố nhiệt độ ở trạng thái giả ổn định.

Ở vùng gần trạng thái 1 lúc bắt đầu và trạng thái 3 lúc kết thúc một đường hàn, dòng nhiệt ở trạng thái không ổn định. Khi hàn mối hàn quá ngắn thì trạng thái giả ổn định sẽ không đạt được. Tính toán dòng nhiệt hàn ở trạng thái không ổn định sẽ phức tạp hơn nhiều so với trạng thái giả ổn định.

Giả thiết là nguồn nhiệt tức thời tại thời điểm  $t = 0$  với vật thể bán vô hạn, nhiệt độ ban đầu  $T_0$ . Lời giải công thức (**Error! Not a valid link.**) theo điều kiện biên cho nguồn nhiệt đường với ( $r \geq 0$ ) sẽ là:

$$T - T_0 = \frac{Q}{S.k4\pi.t} \exp\left[-\frac{r^2}{4at}\right] \quad (3. 67)$$



Với  $Q$  là nhiệt lượng cấp vào,  $S$  là chiều dày tấm hàn,  $t$  là thời gian và  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ .

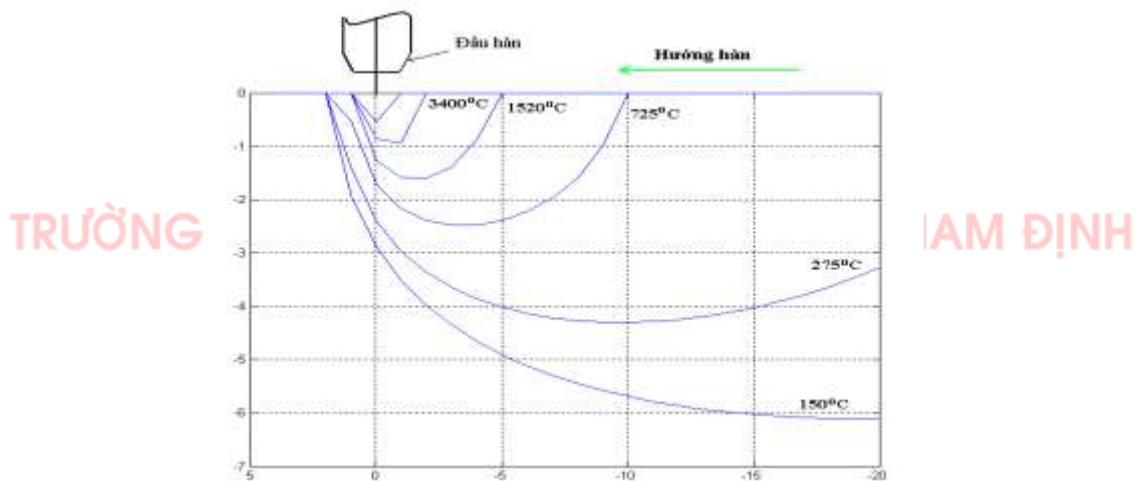
Với nguồn nhiệt 3 chiều – 3D ( $R > 0$ ):

$$T - T_0 = \frac{Q}{\rho c (4\pi a t)^{3/2}} \exp\left[-\frac{R^2}{4at}\right] \text{ với } R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3.68)$$

### 3.5.1 Nguồn nhiệt di động.

Giả thiết cơ bản của dòng nhiệt cấp vào vật hàn là nguồn nhiệt di động được phát triển bởi Rosenthal vào cuối những năm 1930, đây vẫn là phương pháp được áp dụng cho đến nay.

Theo Rosenthal với nguồn nhiệt không đổi xuất phát từ góc của hệ tọa độ vuông góc ( $x', y', z'$ ) di chuyển với vận tốc không đổi ứng với hệ tọa độ vuông góc ( $x, y, z$ ). Vận tốc  $v$  di chuyển dọc theo chiều dương phương  $x$  và 2 hệ trục tọa độ song song  $y'=y, z'=z$ .



Hình 3. 12 Mô hình nguồn nhiệt di động

Giả thiết rằng độ dẫn nhiệt của vật liệu là đồng nhất, trường nhiệt độ  $T(x,y,x,t)$  phải thỏa mãn công thức (**Error! Not a valid link.**) với  $Q'''=0$  (giả thiết với nguồn nhiệt điểm):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.69)$$

$$a \text{ là hệ số truyền nhiệt } a = \frac{k}{\rho c} \quad (3.70)$$

ta có  $x' = x - vt$

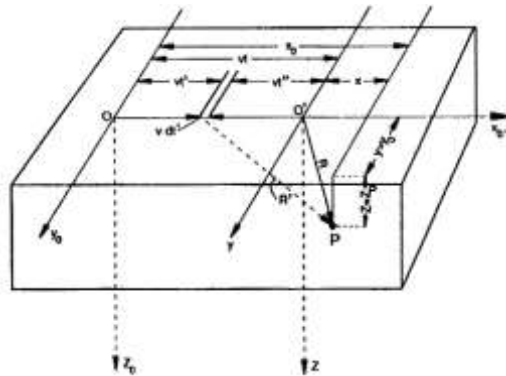
$$y' = y$$

$$z' = z$$

Sử dụng các mối quan hệ ở trên và giả thiết ở trạng thái giả ổn định ta có  $\frac{\partial T}{\partial t} \Big|_{x'=const} = 0$ , lấy đạo hàm riêng  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{v}{a} \frac{\partial T}{\partial x'}$

### 3.5.2 Nghiệm tổng quát cho trường hợp hàn tấm dày.

Tấm dày được coi là đẳng hướng, bán vô hạn với nhiệt độ ban đầu  $T_0$ , giới hạn theo một hướng bởi một mặt phẳng không thoát nhiệt. Tại thời gian  $t = 0$ , nguồn nhiệt điểm không đổi  $Q_0$ , di chuyển với tốc độ không đổi  $v$ , theo phương  $x$ , từ vị trí  $O$ . Nhiệt độ tăng một lượng  $T-T_0$  tại điểm  $P$  với thời gian  $t$ .



Hình 3. 13 Nguồn nhiệt điểm di động trong tấm bán vô hạn, Grong

Trong khoảng thời gian rất ngắn từ  $t'$  đến  $t'+dt'$  một lượng nhiệt lớn tỏa ra trên bề mặt  $dJ = Q \cdot dt'$ . Theo công thức (**Error! Not a valid link.**) lấy vi phân nhiệt độ tại điểm  $P$  sau thời gian  $t$  ta có:

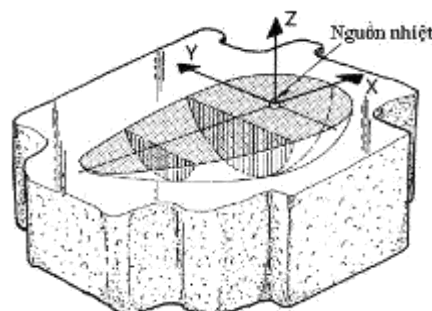
$$dT = \frac{2Qdt'}{\rho c [4\pi a(t-t')]^{3/2}} \exp\left[-\frac{(R')^2}{4a(t-t')}\right] \quad (3.71)$$

Sau khi biến đổi, ta có sự phân bố nhiệt độ ở trạng thái giả ổn định:

$$T - T_0 = \frac{Q}{2\pi k} \left(\frac{1}{R}\right) \exp\left[-\frac{v}{2a}(R+x)\right] \quad (3.72)$$

Công thức này liên quan đến lời giải tấm dày Rosenthal

Hình 3. 14 minh họa nguồn nhiệt 3 chiều, thể hiện hình dáng kích thước vùng hàn khi hàn tấm dày.



Hình 3. 14 Nguồn nhiệt 3D trong tấm dày, Rosenthal

Tấm dày bán vô hạn đồng nhất có nhiệt độ ban đầu  $T_0$  giới hạn theo một hướng là một mặt phẳng không thoát nhiệt.

Tại thời điểm  $t = 0$ , nguồn nhiệt điểm công suất không đổi  $q_0$  dịch chuyển từ điểm O theo hướng x với tốc độ v.

Sự tăng nhiệt độ của điểm P tại thời điểm t là  $T - T_0$ .

Trong khoảng thời gian từ  $t'$  tới  $t' + dt'$  lượng nhiệt phát ra ở bề mặt là  $dQ = q_0 dt'$ . Ta có công thức tính nguồn nhiệt điểm trong tấm dày như sau:

$$T - T_0 = \frac{Q}{\rho c (4\pi a t)^{3/2}} \exp(-R^2/4at) \quad (3.73)$$

T : là nhiệt độ sau khoảng thời gian t

$T_0$  : là nhiệt độ ban đầu ( $T_0 = 20^\circ\text{C}$ )

Theo (**Error! Not a valid link.**) sự tăng nhiệt độ ở điểm P tại thời điểm t là:

$$dT = \frac{2q_0 dt'}{\rho c [4\pi a (t - t')]^{3/2}} \exp\left[-\frac{(R')^2}{4a(t - t')}\right] = \frac{-2q_0 dt''}{\rho c (4\pi a t'')^{3/2}} \exp\left[-\frac{(R')^2}{4a t''}\right] \quad (3.74)$$

$t'' = t - t'$  là thời gian nhiệt truyền qua khoảng cách  $R' = \sqrt{(x_0 - vt')^2 + y_0^2 + z_0^2}$

Đổi hệ tọa độ từ vị trí O tới vị trí O'.

$y = y_0$ ;  $z = z_0$ ;  $x = x_0 - vt$  và  $x_0 - vt' = x + vt - vt' = x + vt''$

Khi đó:

$$\begin{aligned} dT &= \frac{-2q_0 dt''}{\rho c (4\pi a t'')^{3/2}} \exp\left[-\frac{(x_0 - vt')^2 + y_0^2 + z_0^2}{4a t''}\right] \\ &= \frac{-2q_0 dt''}{\rho c (4\pi a t'')^{3/2}} \exp\left[-\frac{vx}{2a} - \frac{R^2}{4a t''} - \frac{v^2 t''}{4a}\right] \end{aligned} \quad (3.75)$$

Sự tăng nhiệt độ tổng của điểm P đạt được bằng cách thay:

$u^2 = \frac{R^2}{4a t''}$ ;  $dt'' = -\frac{R^2}{2a u^3} du$ ;  $m = \frac{vR}{4a}$ ;  $\frac{m^2}{u^2} = \frac{v^2 t''}{4a}$  vào phương trình (**Error! Not**

**a valid link.**), và lấy tích phân giữa các giới hạn  $u = \left(\frac{R^2}{4a t''}\right)^{1/2}$  và  $u = \infty$

$$\text{Ta có: } T - T_0 = \frac{q_0}{2\pi k R} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}}\right) \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \int_u^\infty \exp\left(-u^2 - \frac{m^2}{u^2}\right) du \quad (3.76)$$

$$\text{Mặt khác: } \int_0^\infty \exp\left(-u^2 - \frac{m^2}{u^2}\right) du = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \exp(-2m) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \exp\left(-\frac{vR}{2a}\right)$$

Từ các công thức trên ta có lời giải cho tấm dày dạng tổng quát (không đạt tới trạng thái giả ổn định).

$$T - T_0 = \frac{q_0}{2\pi k} \left( \frac{1}{R} \right) \times \left[ \exp\left(-\frac{vR}{2a}\right) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp\left(-u^2 - \frac{m^2}{u^2}\right) du \right] \quad (3.77)$$

Trong trường hợp, nếu  $u$  đủ nhỏ (tức là khi đã hàn được một thời gian), ta có sự phân bố nhiệt độ ở trạng thái giả ổn định sau:

$$T - T_0 = \frac{q_0}{2\pi k} \left( \frac{1}{R} \right) \times \exp\left[-\frac{v}{2a}(R+x)\right] \quad (3.78)$$

Phương trình (**Error! Not a valid link.**) còn được gọi là lời giải cho tấm dày Rosenthal.

Để đơn giản hóa việc tính toán sự phân bố nhiệt độ ở trạng thái giả ổn định người ta đưa vào các tham số không thứ nguyên đó là:

- Tham số vận hành không thứ nguyên ( $n_3$ )

$$n_3 = \frac{q_0 v}{4\pi a^2 \rho c (T - T_0)} = \frac{q_0 v}{4\pi a^2 (H_c - H_0)} \quad (3.79)$$

Trong đó:  $q_0$  - là công suất hồ quang,  $q_0 = \eta \cdot U \cdot I$

$\eta$ : hiệu suất của hồ quang

$a$  - hệ số truyền nhiệt (tùy thuộc vào tính chất của từng loại vật liệu)

( $H_c - H_0$ ): là lượng nhiệt trên một đơn vị thể tích ở nhiệt độ tham chiếu

- Tọa độ không thứ nguyên

$$\xi = \frac{v \cdot x}{2a} \quad (3.80)$$

$$\psi = \frac{v \cdot y}{2a} \quad (3.81)$$

$$\zeta = \frac{v \cdot z}{2a} \quad (3.82)$$

$\xi$ : tọa độ không thứ nguyên (theo phương x)

$\psi$ : tọa độ không thứ nguyên (theo phương y)

$\zeta$ : tọa độ không thứ nguyên (theo phương z)

Thay thế các tham số này vào phương trình (**Error! Not a valid link.**), ta được:

$$\frac{\theta}{n_3} = \frac{1}{\sigma_3} \exp(-\sigma_3 - \xi) \quad (3.83)$$

$\theta$  và  $\sigma_3$  tương ứng là nhiệt độ không thứ nguyên và véc tơ bán kính không thứ nguyên.

$$\text{Với } \theta = \frac{T - T_0}{T_c - T_0} \text{ và } \sigma_3 = \frac{vR}{2a}$$

### 1. Chiều rộng đường bao đẳng nhiệt

Chiều rộng lớn nhất của đường bao đẳng nhiệt đạt được bằng cách cho

$$\frac{\partial \ln\left(\frac{\theta}{n_3}\right)}{\partial \sigma_3} = 0 \Rightarrow \frac{\partial \ln\left(\frac{\theta}{n_3}\right)}{\partial \sigma_3} = \frac{\partial \ln\left(\frac{\theta}{n_3}\right)}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial \sigma_3} = 0$$

Từ định nghĩa của  $\sigma_3$  ta có

$$\frac{\partial \xi}{\partial \sigma_3} = \frac{2\sqrt{\xi^2 + \psi^2 + \zeta^2}}{2\xi} = \frac{\sigma_3}{\xi}$$

Lấy vi phân từng phần của công thức (3. 84) cho ta:

$$\frac{\partial \ln\left(\frac{\theta}{n_3}\right)}{\partial \sigma_3} = -\frac{1}{\sigma_{3m}} - 1 - 1 \cdot \frac{\sigma_{3m}}{\xi_m} = 0 \Rightarrow \xi_m = \frac{-(\sigma_{3m})^2}{\sigma_{3m} + 1}$$

Thay  $\xi_m$  vào công thức (3. 85) ta được

$$\frac{\theta}{n_3} = \frac{1}{\sigma_{3m}} \exp\left(\frac{-\sigma_{3m}}{\sigma_{3m} + 1}\right) \quad (3. 86)$$

Chiều rộng vùng đẳng nhiệt  $\psi_m$  được xác định theo công thức sau:

$$\psi_m = \zeta_m = \sqrt{(\sigma_{3m})^2 - (\xi_m)^2} = \frac{\sigma_{3m}}{\sigma_{3m} + 1} \sqrt{1 + 2\sigma_{3m}} \quad (3. 87)$$

Diện tích tiết diện ngang  $\Lambda_1$  được tính theo công thức:

$$\Lambda_1 = \frac{\pi}{2} \psi_m^2 = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\sigma_{3m}}{\sigma_{3m} + 1}\right)^2 (1 + 2\sigma_{3m}) \quad (3. 88.a)$$

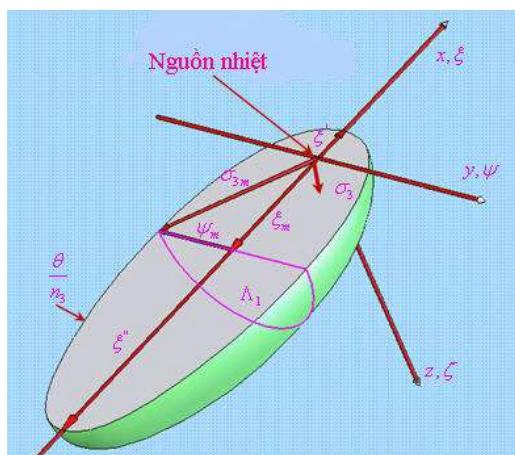
$$\Lambda_1 = A \cdot \frac{v^2}{4a^2} \quad (3. 89.b)$$

### 2. Chiều dài đường bao đẳng nhiệt

Theo Hình 3. 15, chiều dài tổng của đường bao đẳng nhiệt  $\xi$  là

$$\xi = \xi' - \xi'' \quad (3. 90)$$

$\xi'$  và  $\xi''$  là khoảng cách từ phía trước và phía sau của nguồn nhiệt



Hình 3. 15 Đường bao đẳng nhiệt

$\xi'$  và  $\xi''$  tìm được bằng cách đặt  $\sigma = \pm \xi$  trong phương trình (3. 91) Từ đó ta có:

$$\xi' = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{n_3 / \theta}{\xi'} \right) \quad (3. 92)$$

$$\text{Và } \xi'' = -\frac{n_3}{\theta} \quad (3. 93)$$

### 3. Thể tích của vùng bao đẳng nhiệt.

Từ giả thiết của nguồn nhiệt điểm bao gồm các đường đẳng nhiệt bán hình tròn trong mặt phẳng  $\psi - \zeta$ , thể tích của vùng bao đẳng nhiệt được tính bằng cách lấy tích phân qua chiều dài tổng từ  $\xi''$  đến  $\xi'$ :

$$\Gamma = \frac{\pi}{2} \int_{\xi''}^{\xi'} \psi^2 d\xi = \frac{\pi}{2} \int_{\xi''}^{\xi'} (\sigma_3)^2 d\xi - \frac{\pi}{2} \int_{\xi''}^{\xi'} \xi^2 d\xi \quad (3. 94)$$

Lấy vi phân của phương trình (3. 95), suy ra

$$d\xi = -d\sigma_3 \left( \frac{1 + \sigma_3}{\sigma_3} \right)$$

Thay biểu thức trên vào phương trình (3. 96) ta có:

$$\Gamma = -\frac{\pi}{2} \int_{\xi''}^{\xi'} (\sigma_3 + \sigma_3^2) d\sigma_3 - \frac{\pi}{2} \int_{\xi''}^{\xi'} \xi^2 d\xi \quad (3. 97)$$

Vì  $\sigma_3 = -\xi'' = \frac{n_3}{\theta}$  ở cận dưới của tích phân, ta được thể tích của vùng bao đẳng nhiệt không thứ nguyên:

$$\Gamma = -\frac{\pi}{12} \left[ 3 \left( \frac{n_3}{\theta} \right)^2 - 3(\xi')^2 - 4(\xi'')^3 \right] \quad (3. 98)$$

Thể tích thực (có thứ nguyên) của vùng bao đẳng nhiệt  $V$  ( $\text{mm}^3$ ) là:

$$V = \frac{8a^3}{v^3} \Gamma \quad (3.99)$$

4. Tốc độ nguội

$$C.R = -\frac{dT}{dt} \quad (3.100)$$

$$\Rightarrow T = T_0 + \theta(T_c - T_0)$$

$$\Rightarrow \frac{dT}{dt} = \frac{d\theta}{dt} (T_c - T_0) \quad (3.101)$$

Ta có:

$$\tau = \frac{v^2 t''}{2a} \quad (3.102)$$

$\tau$ : thời gian không thứ nguyên

$$\Rightarrow t'' = \frac{2a\tau}{v^2} d\tau \Rightarrow dt'' = \frac{2a}{v^2} d\tau \quad (3.103)$$

Thay vào công thức (3.104) ta có:

$$C.R(^{\circ}C s^{-1}) = -\frac{v^2 (T_c - T_0)}{2a} \times \frac{d\theta}{d\tau} \quad (3.105)$$

$$\text{Mà : } T_c - T_0 = \frac{q_0 v}{4\pi a^2 \rho c n_3} \quad (3.106)$$

$\sigma_3 = \sqrt{\xi^2 + \psi^2 + \zeta^2}$  với các điểm nằm gần tâm mỗi hàn phía sau nguồn nhiệt ( $\psi = 0, \zeta = 0$ ) và  $\sigma_3 = -\xi = \tau$ . Thay  $\sigma_3$  và  $\xi$  vào công thức (Error! Not a valid link.) ta có:

$$\frac{\theta}{n_3} = \frac{1}{(\tau)} \exp[-\tau + \tau] = \frac{1}{\tau} \quad (3.107)$$

Lấy vi phân phương trình (Error! Not a valid link.) ta được:

$$\frac{-d(\theta/n_3)}{d\tau} = \frac{1}{\tau^2} = \left(\frac{\theta}{n_3}\right)^2 \quad (3.108)$$

Thay các công thức trên vào (Error! Not a valid link.) ta được công thức tính tốc độ nguội:

$$\Rightarrow C.R(^{\circ}C s^{-1}) = \frac{2v\pi a \cdot \rho c (T - T_0)^2}{q_0} \quad (3.109)$$

mà  $a = \frac{k}{\rho c}$  thay vào (Error! Not a valid link.) ta có công thức tính tốc độ nguội

cho trường hợp nguồn nhiệt di động ở trạng thái giả ổn định khi hàn tấm dày.



$$C.R(^{\circ}Cs^{-1}) = \frac{2\pi k}{q_0/v} \times (T - T_0)^2 \quad (3.110)$$

Thời gian nguội từ 800 đến 500°C

Áp dụng công thức:

$$\Delta\tau_{\frac{8}{5}} = n_3 \left( \frac{1}{\theta_{500}} - \frac{1}{\theta_{800}} \right) \quad (3.111)$$

$\theta_1$ : nhiệt độ không thứ nguyên tại 800°C

$\theta_2$ : nhiệt độ không thứ nguyên tại 500°C

### 3.5.3 Nghiệm tổng quát cho trường hợp hàn tấm mỏng

#### 1. Giới thiệu

Hình 3.16 minh họa khi hàn tấm mỏng, thường khi hàn tấm mỏng nguồn nhiệt là nguồn nhiệt đường, chiều dày tấm là  $S$  và ở nhiệt độ ban đầu  $T_0$ . Tại thời gian  $t=0$ , nguồn nhiệt di chuyển với tốc độ không đổi  $v$ , theo phương  $x$ . Nhiệt độ tăng một lượng  $T-T_0$  tại điểm  $P$  với thời gian  $t$ . Giả thiết, nhiệt độ không đổi theo chiều dày tấm. Theo công thức [Error! Not a valid link.](#), nguồn nhiệt cơ bản,  $dJ=Q.dt'$  giải phóng ra ở vị trí  $v t'$  sẽ làm tăng nhiệt độ lên một lượng  $dT$  tại điểm  $P$  với thời gian  $t$ .

$$dT = \frac{Qdt'}{Sk4\pi(t-t')} \exp\left[-\frac{(r')^2}{4a(t-t')}\right]$$

$$= \frac{Qdt'}{Sk4\pi''} \exp\left[-\frac{(r')^2}{4at''}\right] \quad (3.112)$$

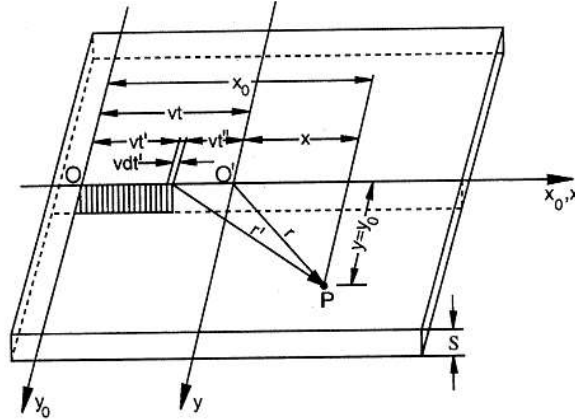
Trong đó  $t'' = t - t'$  là thời gian mà nguồn nhiệt di chuyển được một khoảng cách  $r'$  đến điểm  $P$ . Khi chúng ta quan tâm tới điểm  $P$  của nguồn nhiệt tại thời gian  $t$ , chúng ta mong chờ lời giải với thời gian độc lập. Điều này đạt được khi ta chuyển hệ trục tọa độ từ  $O$  đến  $O'$

Từ đó:

$$dT = \frac{Qdt'}{Sk4\pi''} \exp\left[-\frac{(x+vt'')^2 + y^2}{4at''}\right] = \frac{Qdt'}{Sk4\pi''} \exp\left[-\frac{vx}{2a} - \frac{r^2}{4at''} - \frac{v^2 t''}{4a}\right] \quad (3.113)$$

$$\text{Với } r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.114)$$

Lấy tích phân từ  $t'' = t$  ( $t'=0$ ) đến  $t'' = 0$  ( $t'=t$ ) ta có:  $(r^*)^2 = \frac{v^2 r^2}{4a^2}$ ;  $\omega = \frac{v^2 t''}{4a}$



Hình 3. 16 Nguồn nhiệt đường di chuyển trong tấm mỏng

Hơn nữa,

$$t'' = \frac{4a}{v^2} \omega, \quad dt'' = \frac{4a}{v^2} d\omega, \quad \frac{r^2}{4at''} = \frac{r^{*2}}{4\omega} \quad (3.115)$$

thay vào công thức **Error! Not a valid link.** ta được

$$T - T_0 = \frac{Q}{S4\pi k} \exp\left[-\frac{vx}{2a}\right] \int_{\omega=0}^{\omega=\frac{v^2 t}{4a}} \exp\left[-\frac{(r^*)^2}{4\omega} - \omega\right] \frac{d\omega}{\omega} \quad (3.116)$$

$$\text{Ta lại có: } \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(r^*)^2}{4\omega} - \omega\right] \frac{d\omega}{\omega} = 2K_0(r^*) = 2K_0\left(\frac{vr}{2a}\right)$$

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT NAM ĐỊNH

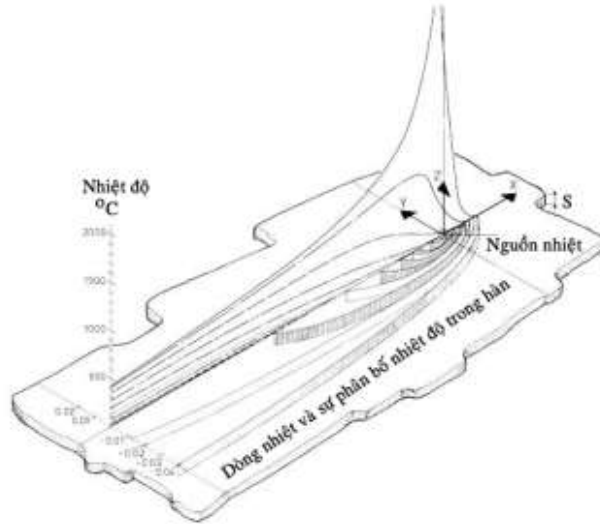
Trong đó  $K_0(r^*)$  là hàm Bessel. Lời giải cho tấm mỏng được viết như sau:

$$T - T_0 = \frac{Q}{S4\pi k} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) \left[ K_0\left(\frac{vr}{2a}\right) - \frac{1}{2} \int_\omega^\infty \exp\left[-\frac{(r^*)^2}{4\omega} - \omega\right] \frac{d\omega}{\omega} \right] \quad (3.117)$$

$$\text{Với } \omega = \frac{v^2 t''}{4a}$$

$$T - T_0 = \frac{Q}{2S\pi k} \exp\left(-\frac{vx}{2a}\right) K_0\left(\frac{vr}{2a}\right) \quad (3.118)$$

Công thức **Error! Not a valid link.** liên quan đến lời giải tấm mỏng của Rosenthal. Hình 3. 17 cho ta thấy đường bao đẳng nhiệt càng xa nguồn nhiệt càng dài.



Hình 3. 17 Sự phân bố nhiệt hàn trong tấm mỏng

## 2. Phương pháp tính

Để đơn giản trong việc tính toán sự phân bố nhiệt độ ở trạng thái giả ổn định trường hợp hàn tấm mỏng, người ta đưa các tham số không thứ nguyên vào:

$$\delta = \frac{v \cdot S}{2a} \quad (3. 119)$$

Từ công thức 3. 57 ta có

$$\frac{\theta \cdot \delta}{n_3} = \exp(-\xi) K_0(\sigma_5) \quad (3. 120)$$

S: chiều dày tấm hàn (mm);

v: vận tốc hàn (mm/s);

a: hệ số dẫn nhiệt (tùy thuộc vào từng loại vật liệu);

-  $\xi$ : tọa độ không thứ nguyên theo phương x.

-  $\psi$ : tọa độ không thứ nguyên theo phương y.

-  $K_0(\sigma_5)$ : hàm Bessel

$$K_0(\sigma_5) = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot \sigma_5}} \exp(-\sigma_5) \quad (3. 121)$$

-  $\sigma_5$ : véc tơ bán kính không thứ nguyên (tính từ điểm xét tới tâm nguồn nhiệt).

$$\sigma_5 = \sqrt{\xi^2 + \psi^2} \quad (3. 122)$$

Thay số vào công thức (3.59) ta có:

$$\frac{\theta \cdot \delta}{n_3} = \exp(-\xi) K_0\left(\sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{\xi^2 + \psi^2}}} \exp(-\sqrt{\xi^2 + \psi^2})\right) \quad (3. 123)$$

Sự phân bố nhiệt độ ở trạng thái giả ổn định phụ thuộc vào tham số  $(\theta\delta/n_3)$ . Nhưng dạng của đường đẳng nhiệt không bị ảnh hưởng của vận tốc hàn vì cả  $\sigma$  và  $n_3$  đều tỷ lệ với vận tốc hàn (v).

Chiều rộng lớn nhất của đường bao đẳng nhiệt đạt được bằng cách cho  $\partial(\theta\delta/n_3)/\partial\xi = 0$  từ đó ta có

$$\frac{\partial(\theta\delta/n_3)}{\partial\xi} = \frac{\partial(\theta\delta/n_3)}{\partial\sigma_5} \frac{\partial\sigma_5}{\partial\xi} = -\exp(\xi_m) \left[ K_0(\sigma_{5m}) + \frac{\xi_m}{\sigma_{5m}} K_1(\sigma_{5m}) \right] \quad (3.124)$$

$$\Rightarrow \xi_m = -\sigma_{5m} \frac{K_0(\sigma_{5m})}{K_1(\sigma_{5m})} \quad (3.125)$$

Thay công thức (3.121) vào công thức (3.123) ta có

$$\frac{\theta.\delta}{n_3} = \exp \left[ \sigma_{5m} \frac{K_0(\sigma_{5m})}{K_1(\sigma_{5m})} \right] K_0(\sigma_{5m}) \quad (3.126)$$

Phương trình (3.127) được sử dụng để tính chiều rộng vùng đẳng nhiệt lớn nhất  $\psi_m$  và tiết diện ngang ( $\Lambda_2$ ) khi hàn tấm mỏng.

Ta có:

$$\psi_m = \sqrt{(\sigma_{5m})^2 - (\xi_m)^2} = \sigma_{5m} \sqrt{1 - \frac{K_0(\sigma_{5m})^2}{K_1(\sigma_{5m})^2}} \quad (3.127)$$

$$\text{Và } \Lambda/\delta = 2.\psi_m = 2.\sigma_{5m} \sqrt{1 - \frac{K_0(\sigma_{5m})^2}{K_1(\sigma_{5m})^2}} \quad (3.128)$$

Khoảng cách từ tâm nguồn nhiệt tới phía trước ( $\xi'$ ) và phía sau ( $\xi''$ ) của đường bao đẳng nhiệt đạt được bằng cách thay  $\sigma_5 = \pm \xi$  vào phương trình

$$\text{Ta có } \xi' = \ln \left( \frac{n_3 \cdot K_0(\xi')}{\theta.\delta} \right), \text{ với } \xi' > 0 \quad (3.129)$$

$$\xi'' = \ln \left( \frac{n_3 \cdot K_0(-\xi'')}{\theta.\delta} \right), \text{ với } \xi'' < 0 \quad (3.130)$$

Đối với các điểm nằm gần tâm mỗi hàn phía sau nguồn nhiệt  $\sigma_5 = -\xi = \tau$

Khi  $\tau > 1$  (nghĩa là  $t > 2a/v^2$ ), ta có  $K_0(\tau) = \exp(-\tau)\sqrt{\pi/2\tau}$

$$\text{Từ đó phương trình (3.59) trở thành } \frac{\theta.\delta}{n_3} = \sqrt{\pi/2\tau} \quad (3.131)$$

Phương trình (3.132) cũng là cơ sở để tính thời gian nguội trong khoảng thời gian xác định nào đó (ví dụ từ 275°C xuống nhiệt độ ban đầu của vật liệu).

$$\Delta\tau = \frac{\pi}{2} (n_3/\delta)^2 \left[ \frac{1}{(\theta_2)^2} - \frac{1}{(\theta_1)^2} \right] \quad (3.132)$$

Ví dụ khảo sát thời gian nguội từ 800 đến 500°C là

$$\Delta\tau_{8/5} = \frac{\pi}{2} (n_3/\delta)^2 \left[ \frac{1}{(\theta_{500})^2} - \frac{1}{(\theta_{800})^2} \right] \quad (3.133)$$

Thời gian nguội thực được xác định theo:

$$\Delta t_{8/5} = \left[ \frac{1}{4.\pi.k.\rho.c} \right] \left[ \frac{1}{(500-T_0)^2} - \frac{1}{(800-T_0)^2} \right] \left[ \frac{q_0}{v.S} \right]^2 \quad (3.134)$$

Như chúng ta đã biết, hầu hết thép kết cấu sử dụng trong chế tạo kết cấu hàn, quá trình phân hủy austenit xảy ra dưới nhiệt độ  $A_{r1}$ . Đặc biệt trong dải nhiệt độ chuyển biến  $800 \div 500^{\circ}\text{C}$  của austenit rất dễ hình thành các tổ chức kim loại có độ cứng cao và nhạy cảm với nứt. Vì vậy các nhà nghiên cứu đã đề nghị sử dụng thông số thời gian nguội (tính bằng giây), trong khoảng nhiệt độ đó, gọi là  $\Delta t_{8/5}$  làm đặc trưng cho quá trình nguội (trong khoảng thời gian này, đường cong nguội thường không tuyến tính).

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT NAM ĐỊNH

### **Kết luận chương 3**

Trong chương này tác giả đã:

- Nghiên cứu các vấn đề truyền nhiệt trong hàn.
- Nghiên cứu các loại nguồn nhiệt trong hàn hồ quang và nguồn nhiệt khi hàn tấm mỏng.
- Nghiên cứu sự phân bố nhiệt độ ở trạng thái giả ổn định khi hàn tấm mỏng.

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT NAM ĐỊNH

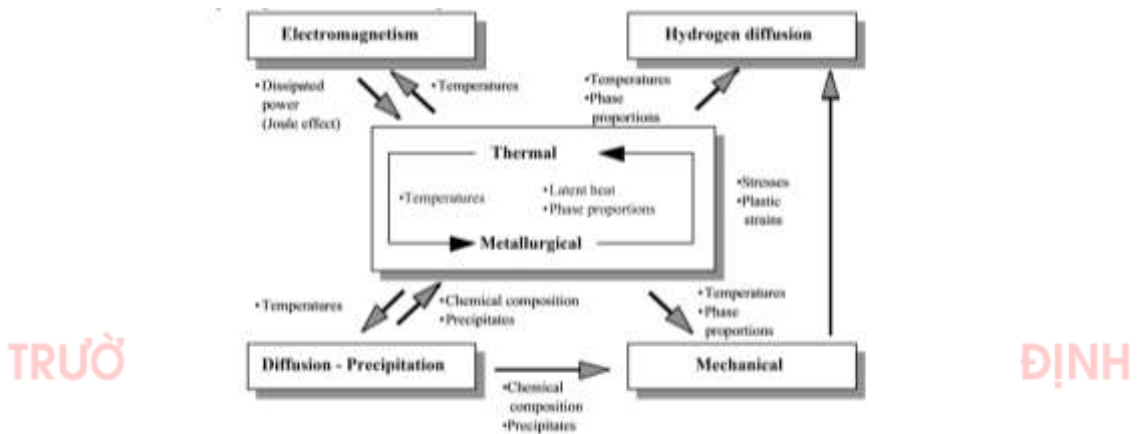
## CHƯƠNG 4

### MÔ PHỎNG SỐ LIÊN KẾT HÀN GÓC CHỮ T BẰNG PHẦN MỀM SYSWELD

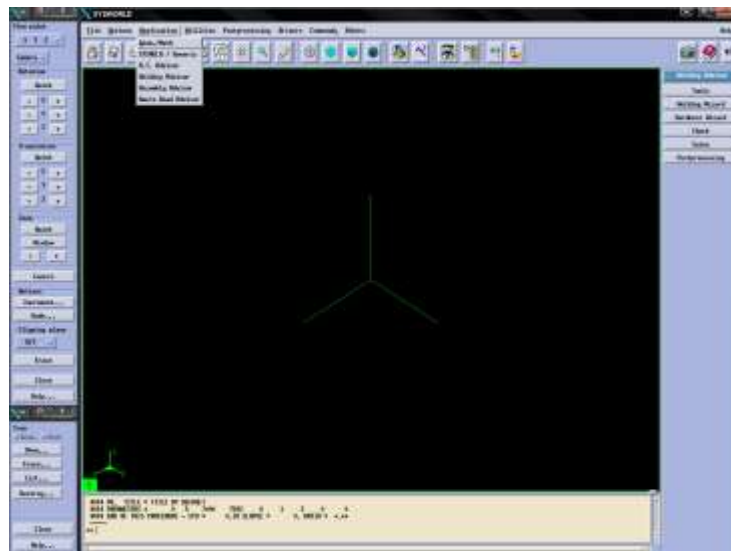
#### 4.1 Giới thiệu Sysweld

Được tạo ra năm 1979 nhằm để mô phỏng số quá trình hàn với sự giúp sức của phương pháp phần tử hữu hạn [8]. Năm 1980 các nghiên cứu và tính toán mô phỏng liên quan đến các vấn đề xử lý nhiệt như nứt nguội, khuếch tán hydro được nhúng vào trong bộ code của của nó. Năm 1981 phần mềm chính thức được vận hành, tuy nhiên qua hàng năm nó ngày càng được phát triển và giải quyết được ngày càng nhiều hơn vấn đề khó hơn xảy ra trước, trong và sau quá trình hàn.

Về cấu trúc tính toán, Sysweld có cấu trúc tính toán dạng module ghép nối nhiều bộ tính toán lại với nhau.



Hình 4. 1 Cấu trúc của Sysweld



Hình 4. 2 Giao diện khởi động của Sysweld

Trong bản thân Sysweld có hai module chính là module xử lý nhiệt và module hàn. Để mô phỏng một quá trình hàn trong Sysweld với module hàn (Welding Advisor)

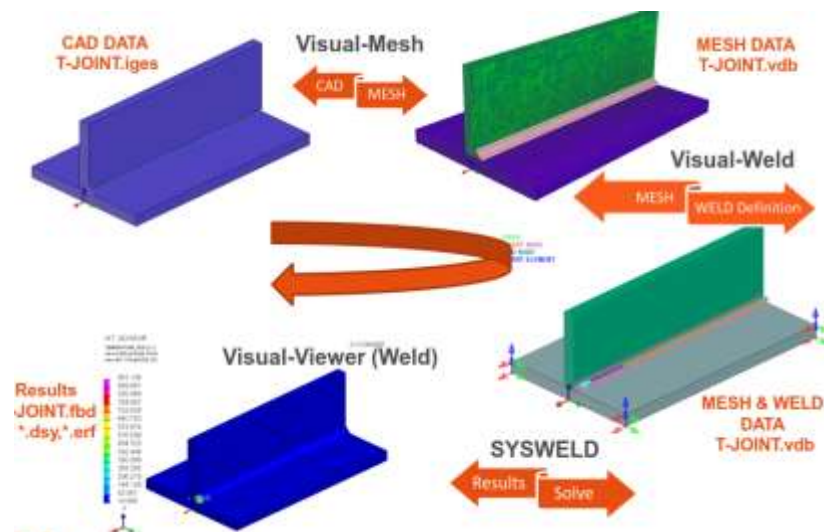




Hình 4. 3 Khởi động vào module Welding Advisor và các công cụ chính

Xây dựng mô hình và chia lưới là các bước đầu tiên cần thiết cho giải một bài toán mô phỏng hàn. Trong quá trình chia lưới, các phần tử được chia phải đảm bảo các yêu cầu về phần tử, không được có các nút tự do và không có các phần tử trùng nhau, tất cả các nút của lưới cần phải được liên kết với nhau (kiểm tra các cạnh biên và các mặt biên). Hiện tại có thể nhập lưới từ các định dạng NASTRAN (\*.nas) và PAMCRASH (\*.pc) ngoài ra cũng có thể nhập lưới từ HYPERMESH (với HYPERMESH có thể xuất nhập trực tiếp ra định dạng SYSWELD ASCII (\*.ASC)). Từ tháng 1 năm 2006, VISUAL MESH có thể dùng như là một công cụ chia lưới hữu hiệu cho SYSWELD được phát triển bởi tập đoàn ESI. Nó có đầy đủ tính năng của một công cụ chia lưới tốt nhất có thể chia lưới được trong tất cả các trường 1D, 2D hay 3D.

Đồng thời nhằm đơn giản hóa giao diện của Sysweld, ESI đã phát triển phần mềm Visual-Weld [8] nhằm làm việc mô phỏng quá trình hàn trở nên trực quan và dễ dàng hơn rất nhiều. Sysweld lúc này chỉ còn đóng vai trò như bộ giải của Visual-Weld. Để biểu diễn kết quả sau khi mô phỏng xong, ESI cũng phát triển một phần mềm riêng chuyên dụng để biểu diễn các kết quả là Visual Viewer.



Hình 4. 4 Quá trình mô phỏng một bài toán hàn

Như vậy để mô phỏng một quá trình hàn với kết cấu cụ thể, ngoài cách dùng toàn bộ Sysweld như ban đầu, hiện tại chúng ta có thể thực hiện xây dựng mô hình sơ bộ với CAD (như Catia, Solidworks, NX, Autodesk Inventor...) rồi nhập mô hình vào Visual-Mesh (cũng có thể xây dựng toàn bộ mô hình từ đầu trên Visual-Mesh) sau đó chia lưới, tiếp tục nhập mô hình sau chia lưới vào Visual-Weld và đặt các thông số chế độ hàn trong đó để giải. Cuối cùng là xử lý kết quả trên Visual-Viewer.

## **4.2 Tính toán, mô phỏng ứng suất, biến dạng trong liên kết hàn nhôm A5083 bằng PP.PTHH**

### **4.2.1 Tính toán mô phỏng bài toán nhiệt - đàn hồi - dẻo bằng PP.PTHH**

Phương pháp phần tử hữu hạn - PTHH [5] được biết như là một công cụ hữu hiệu hỗ trợ kỹ thuật nghiên cứu, thử nghiệm để xác định hành vi và tương tác giữa các hiện tượng vật lý phức tạp trong quá trình hàn.

Mô phỏng của quá trình hàn không phải là một nhiệm vụ dễ dàng do nó liên quan đến sự tương tác của nhiệt, cơ học và luyện kim [8]. Đối với quá trình hàn nóng chảy, đã thiết lập trên gói phần mềm mô phỏng chuyên dụng SYSWELD 2015 có thể thực hiện sự tính toán nhiệt và quá trình luyện kim, nó cũng có thể kiểm soát nhiệt độ, tỷ lệ pha và tính toán ứng xử cơ học (phụ thuộc không chỉ vào nhiệt độ mà còn vào tổ chức kim loại của phần tử).

#### **1. Mô hình toán học của nguồn nhiệt hàn**

Năng lượng nhiệt có thể truyền từ một hệ thống này tới một hệ thống khác giống như là kết quả của sự chênh lệch nhiệt độ khác nhau [6][7]. Tổng lượng nhiệt cấp vào ( $Q$ ,  $W/m^3$ ) trong hàn hồ quang biểu thị qua năng lượng hồ quang ( $W$ ) và hiệu suất quá trình hàn ( $\eta$ ).

$$Q = \eta \cdot VI \quad (4.1)$$

Đối với quá trình hàn GMAW [1][7], phạm vi hiệu suất của nguồn nhiệt  $\eta=0,65\div 0,85$ . Nhiệt cấp từ nguồn hàn (nguồn nhiệt) vào vùng hàn sẽ truyền vào kim loại cơ bản bằng dẫn nhiệt và truyền ra môi trường xung quanh bằng sự đối lưu và bức xạ (Parmar 2005).

Khuếch tán nhiệt do sự dẫn nhiệt được dựa trên định luật Fourier, đó là nguồn nhiệt ( $Q$ ,  $W/m^3$ ) truyền từ vùng có nhiệt độ cao sang vùng nguội hơn và phụ thuộc tuyến tính trên gradient nhiệt độ, trong đó  $k$  là hệ số dẫn nhiệt -  $W/(mK)$ .

$$q = -k(\text{grad}T) \quad (4.2)$$

Đối với một đơn vị diện tích bề mặt tương ứng với một vector đơn vị  $n$ , giá trị nhiệt được truyền qua mỗi đơn vị diện tích bề mặt theo hướng  $n$  được xác định theo công thức sau (Lewis et al. 2004):

$$q = -k(\text{grad}T) \cdot n = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (4.3)$$

Khi sự truyền nhiệt được xét theo công thức enthalpy cơ bản để giải vấn đề thuộc lĩnh vực lỏng và rắn, và nếu k là hệ số được cài vào phương trình bảo toàn năng lượng, phương trình truyền nhiệt trong trường hợp tốc độ nhanh có thể được viết như sau:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\text{grad}T) + Q \quad (4.4)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (4.5)$$

Trong công thức này  $\rho$ ,  $c_p$  và  $Q$  lần lượt là: Mối tương quan giữa trọng lượng và khối lượng ( $\text{kg/m}^3$ ), nhiệt dung riêng ( $\text{J/kg K}$ ), và nguồn nhiệt bên trong ( $\text{W/m}^3$ ). Tích số của  $\rho c_p$  tương ứng với khả năng tích trữ năng lượng của vật liệu. Tốc độ truyền nhiệt bằng sự đối lưu được tuân theo tỷ lệ tương ứng với nhiệt độ khác nhau và được cho bởi định luật Newton ở chỗ nguội  $q_{\text{conv}}$  là dòng nhiệt đối lưu ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ),  $h_{\text{conv}}$  là hệ số truyền nhiệt đối lưu và  $(T_s - T_\infty)$ :

$$q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}}(T_s - T_\infty) \quad (4.6)$$

Nhiệt lượng tỏa ra của sự truyền nhiệt được cho bởi định luật Stefan-Boltzmann ở đó  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  và  $h_{\text{rad}}$  lần lượt là hằng số Stefan Bokltzmann, nhiệt tỏa ra và hệ số bức xạ truyền nhiệt:

$$\frac{q_{\text{rad}}}{(T_s - T_\infty)} = \varepsilon \sigma (T_s^2 - T_\infty^2) = h_{\text{rad}}(T_s - T_\infty) \quad (4.7)$$

Các điều kiện của đường bao nhiệt được kết luận như sau, ở đó n đại diện cho pháp tuyến mặt ngoài với cạnh của thành (vách):

(a) mật độ dòng nhiệt q, lợi dụng vào cạnh thành:

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (4.8)$$

(b) Lợi dụng vào hệ số của sự thay đổi nhiệt:

Đường bao các điều kiện cho hệ số truyền nhiệt được chia thành sự đối lưu và sự phát xạ. Điều kiện của đường bao đối lưu là dựa trên sự cân bằng của năng lượng bề mặt như diễn đạt dưới đây:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\text{conv}}(T_s - T_\infty) \quad (4.9)$$

Tương tự như vậy, sử dụng năng lượng cân bằng, điều kiện đường bao bức xạ trên bề mặt được diễn đạt như sau:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon \sigma (T_s - T_\infty) \quad (4.10)$$

Hoặc

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\text{conv}}(T_s - T_\infty) \quad (4.11)$$

Bao gồm tất cả các điều kiện đường bao nhiệt có thể được xác định như sau:

$$Q - k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{\text{conv}}(T_s - T_\infty) + \varepsilon \sigma (T_s - T_\infty) = 0 \quad (4.12)$$

Đối với nhiều môi hàn hồ quang, thu được giá trị xấp xỉ của nhiệt cấp vào (Q) bằng cách sử dụng hai hình elip như đề xuất bởi Goldak và Akhlaghi (2005) [7] bằng cách sử dụng công thức sau đây:

$$q_{f,r}(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}}{abc} \frac{f_{f,r}Q}{\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3[z+v(\tau-t)]^2}{c^2}} \quad (4.13)$$

Trong mô hình này,  $f_f$  và  $f_r$  lần lượt là phân số của nhiệt lưu ở góc phần tư phía trước và phía sau, ở đó  $f_f + f_r = 2$ , và a, b, c là thông số kích thước của nguồn nhiệt, v là vận tốc hàn, t là thời gian,  $\tau$  là hệ số trễ của nhiệt lưu ban đầu ở  $t=0$ .

## 2. Tính toán ứng suất – biến dạng trong liên kết hàn

Việc tính toán nhiệt dựa trên sự giải các phương trình nhiệt [6][7], có tính đến nhiệt ẩn của sự nóng chảy và sự đông đặc và nhiệt chuyển pha trong trạng thái đặc. Việc tính toán quá trình luyện kim và nhiệt là một cặp đầy đủ ở mỗi nhiệt độ. Có 3 loại của sự tương tác với nhau giữa sự phân tích nhiệt và luyện kim, sự biến đổi trong luyện kim phụ thuộc trực tiếp vào lịch sử nhiệt của phần tử, sự biến đổi trong luyện kim được tác động thêm bởi sự ảnh hưởng nhiệt ẩn được sửa đổi phân bố nhiệt độ, và pha phụ thuộc vào tính chất lý nhiệt [8]. Ảnh hưởng nhiệt ẩn do sự biến đổi luyện kim được cho bởi phương trình (4.14) trong đó  $H$  là giá số enthalpy,  $P_1$  là pha ban đầu,  $P_2$  là pha cuối cùng và T là nhiệt độ:

$$H(P_1, P_2, T) = P_1 H_1(T) + P_2 H_2(T) \quad (4.14)$$

Trong khi nhiệt dung riêng ở áp suất không đổi bằng một sự thay đổi enthalpy trong một phạm vi nhiệt độ, xử lý sự khuếch tán nhiệt với một công thức enthalpy cơ sở để giải quyết các vấn đề trong phạm vi lỏng và rắn cung cấp cho các phương trình sau đây:

$$\rho c_p \frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{k(T)}{\rho c_p} \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{k(T)}{\rho c_p} \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{k(T)}{\rho c_p} \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q \quad (4.15)$$

Trong đó:

$$H_1 - H_2 = \int_{T_1}^{T_2} \rho c_p dT \quad (4.16)$$

Việc tính toán nhiệt luyện kim được cung cấp bởi chu kỳ nhiệt, tỷ số nhiệt, dòng nhiệt và sự thay đổi trong tỷ lệ pha và kích thước hạt austenit từ các tính chất nhiệt của vật liệu (hệ số dẫn nhiệt k, nhiệt dung khối  $c_p$  hoặc enthalpy H), các thông số quá trình hàn và đồ thị biến đổi luyện kim, đều được biểu diễn bằng toán học [2][7].

Loại biến đổi khuếch tán được miêu tả bởi Johnson-Mehl-Avrami theo điều kiện đẳng nhiệt được đưa ra như sau, ở đó tỷ lệ pha thu được xuất hiện trước và sau một thời gian vô hạn ở nhiệt độ T,  $\tau_R$  là thời gian trễ, và n là một số mũ được kết hợp với tốc độ phản ứng:

$$P(T, t) = \bar{P}(T) \left( 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{\tau_R(T)}\right)^n\right) \right) \quad (4.17)$$

Đối với các điều kiện nhiệt không đẳng hướng, động lực học biến đổi được đề xuất bởi LEBLOND, do nó đơn giản và có thể được sử dụng để đại diện cho bất kỳ loại hình biến đổi nào bằng cách nung nóng hoặc làm nguội. Phương trình cơ bản được diễn đạt như sau:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\bar{P}-P}{\tau} \quad (4.18)$$

Trong đó: P tỷ lệ pha kết tinh,  $\bar{P}$  là tỷ lệ pha ở trạng thái cân bằng và  $\tau$  là thời gian chờ. Ở mô hình trên không thể tái sinh chính xác loại động lực học Johnson-Mehl-Avrami; do sự phổ biến của mô hình Leblond (Johnson-Mehl-Avrami) cho sự biến đổi giữa hai pha (1→2) được hình thành bởi phương trình sau:

$$\dot{P}_2 = n_{1 \rightarrow 2}(T) \frac{\bar{P}_2(T) - P_2}{\tau_{1 \rightarrow 2}(T)} \left\{ \ln \left( \frac{\bar{P}_2(T)}{\bar{P}_2(T) - P_2} \right)^{\frac{n_{1 \rightarrow 2}(T) - 1}{n_{1 \rightarrow 2}(T)}} \right\} \quad (4.19)$$

Đối với định luật biến đổi này, thu được các thông số yêu cầu từ sơ đồ làm mát liên tục.

Quá trình hàn gây ra ứng suất do sự thay đổi nhiệt độ không đồng đều, kết quả là có thể dẫn đến sự biến dạng. Ứng suất là các lực tác dụng lên các vật liệu có khuynh hướng thay đổi kích thước của các vật liệu (sự biến dạng). Khi một vật liệu bị biến dạng do ứng suất nó được gọi là bị cong vênh.

**TR** Các tính toán dựa trên cơ sở quá trình của nhiệt và luyện kim. Các kết quả ảnh hưởng của quá trình nhiệt vào quá trình cơ học đồng thời do bởi sự biến thiên của các tính chất cơ học (module đàn hồi, ứng suất kéo) liên quan đến nhiệt độ và do bởi sự giãn nở hoặc sự co ngót do nhiệt. Việc phân tích cơ học trong quá trình luyện kim là rất phức tạp, chủ yếu thông qua sự thay đổi thể tích được tạo ra bởi sự thay đổi cấu trúc tinh thể của vật liệu chuyển biến trong quá trình luyện kim. Các thay đổi này được đưa vào thành các quy ước ứng suất nhiệt và được mô hình hóa bởi biến dạng nhiệt luyện kim [[9]:

$$\varepsilon^{th} = \sum_{phase} P_i \varepsilon_i^{th} \quad (4.20)$$

Trong phương trình này  $\varepsilon_i^{th}$  đặc trưng cho mối quan hệ giữa nhiệt độ với biến dạng nhiệt của sự kết tinh pha thứ i. Biến dạng nhiệt của mỗi pha không chỉ khác nhau trong các giai đoạn gradient của nó đặc trưng cho hệ số giãn nở, nhưng cũng có thể phản ánh sự thay đổi của thể tích trong quá trình chuyển biến, là sự góp phần chính gây ra ứng suất dư và biến dạng.

Ngoài ra, sự luyện kim cũng trở thành một sự xem xét trong sự phân tích cơ học thông qua hành vi liên kết đặc biệt nhiều pha của vật liệu. Các thuộc tính của vật liệu sử dụng cho việc tính toán ứng xử cơ học, phụ thuộc vào nhiệt độ, có sự kết hợp của các giai đoạn cần xem xét và cũng bao gồm cả hiện tượng biến dạng dẻo.



Sự ứng xử của vật liệu trong sự chuyển biến của các giai đoạn đó chính là đàn hồi – dẻo. Trong mô hình hóa vật liệu này, biến dạng tổng được chia thành biến dạng đàn hồi, biến dạng dẻo và ứng suất nhiệt viết dưới dạng biểu thức sau:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \Delta\varepsilon_{ij}^e + \Delta\varepsilon_{ij}^p + \Delta\varepsilon_{ij}^{th} \quad (4.21)$$

Giá trị biến dạng tổng ( $\Delta\varepsilon_y^p$ ) được diễn đạt như là tổng của khoảng biến thiên ứng suất ( $\Delta\sigma$ ), khoảng biến thiên nhiệt độ ( $\Delta T$ ) và tỷ lệ biến đổi pha ( $\Delta p$ ). Hai thuật ngữ đầu tiên đại diện cho giá trị biến dạng dẻo quy ước trong khi thuật ngữ thứ ba đại diện cho sự gây ra biến dạng dẻo. Trong một lớp rộng của hành vi ứng xử của vật liệu, giá trị biến dạng dẻo có thể mô hình hóa bằng cách sử dụng khả năng dẻo được viết như sau:

$$\Delta\varepsilon_{ij}^p = \Delta\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4.22)$$

Trong đó:  $g$  là hàm vi phân vô hướng đối với biến dạng đàn hồi dẻo, trong đó  $\sigma_{ij}$  đặc trưng cho sự đàn hồi dẻo,  $\Delta\lambda$  là tham số không đổi đặc trưng cho biến dạng đàn hồi dẻo. Khi tốc độ biến dạng dẻo bằng hàm đàn hồi hoặc tiêu chuẩn dẻo ( $F$ ), công thức 3.23 trở thành công thức 3.27:

$$\Delta\varepsilon_{ij}^p = \Delta\lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (4.23)$$

**TR** Mẫu tổng quát của phương trình 3.24 cũng được biết là sự liên kết theo quy luật do sự liên kết của nó với tiêu chuẩn bền riêng. Sự lựa chọn tiêu chuẩn tính dẻo được dựa vào tiêu chuẩn Von Mises, tiêu chuẩn này thường được sử dụng, đặc biệt vì nó rất phù hợp trong sự phân tích ứng xử của kim loại. Phân tích cơ học được thực hiện bằng phương pháp nhiệt - đàn hồi - dẻo, sự thiết lập công thức vật liệu bằng tiêu chuẩn Von Mises yield như dưới đây: Trong đó  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  và  $\sigma_3$  là các ứng suất chính kết hợp với quy tắc biến dạng cứng.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (4.24)$$

Trong nghiên cứu mô phỏng này, trạng thái đông đặc (hardening) đẳng hướng được lựa chọn do tải biến đổi không theo chu kỳ, trong khi đó động học trạng thái đông đặc (hardening) được giới thiệu cho sự biến đổi theo chu kỳ. Hai loại mô hình đông đặc này được cung cấp bởi SYSWELD [8]. Đối với vật liệu đông đặc đẳng hướng, việc tính toán cơ học dựa trên lịch sử (quá trình) luyện kim chủ yếu theo phương trình được xây dựng bởi Leblond, nhờ đó mà trạng thái biến dạng dẻo  $\Delta\varepsilon_{ij}^{tp}$

miêu tả sự biến dạng dẻo diễn ra trong sự chuyển pha và được tính toán từ định luật tiến hóa.

$$\Delta\varepsilon_{ij}^{tp} = -\frac{3}{2}K(\ln p_\alpha)h\left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_y}\right)\dot{p}_\alpha s_{ij} \quad (4.25)$$

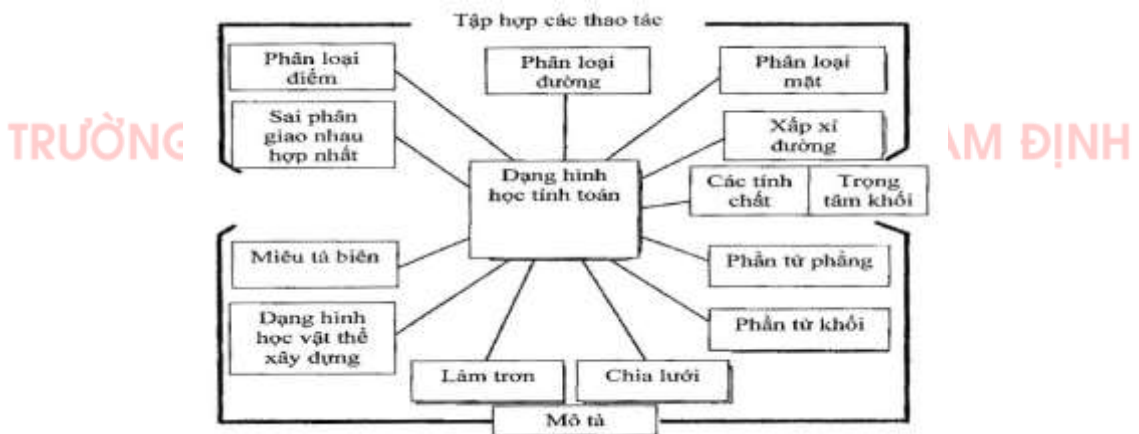
Trong đó:  $K$  là hệ số biến dạng dẻo,  $\lambda$  tỷ lệ ferrite (số lượng ferrite),  $\sigma_{\epsilon q}$  ứng suất tương đương Von Mises,  $s_{ij}$  ứng suất lệch thành phần và  $h$  là chức năng hiệu chỉnh. Ứng suất đàn hồi ( $\sigma^y$ ) được tính bằng định luật không tuyến tính cho sự pha trộn austenit – ferrit sử dụng theo phương trình: Ở đó  $\sigma_\gamma^y$  là ứng suất kéo của austenite và  $\sigma_\alpha^y$  là ứng suất kéo của pha trộn ferritic.

$$\sigma^y(T) = (1 - f(p_\alpha)) \cdot \sigma_\gamma^y(T) + f(p_\alpha) \cdot \sigma_\alpha^y(T) \quad (4.26)$$

Vì vậy, giá trị biến dạng tổng ( $\Delta \epsilon_{ij}^{total}$ ) có thể xác định bằng tổng của giá trị biến dạng đàn hồi ( $\Delta \epsilon_{ij}^e$ ), giá trị biến dạng chảy dẻo ( $\Delta \epsilon_{ij}^p$ ), giá trị biến dạng dẻo ( $\Delta \epsilon_{ij}^{tp}$ ) và biến dạng nhiệt kết tinh ( $\Delta \epsilon_{ij}^{th}$ ):

$$\Delta \epsilon_{ij}^{total} = \Delta \epsilon_{ij}^e + \Delta \epsilon_{ij}^p + \Delta \epsilon_{ij}^{tp} + \Delta \epsilon_{ij}^{th} \quad (4.27)$$

#### 4.2.2 Ứng dụng PP. PTHH trong mô phỏng tính toán liên kết hàn



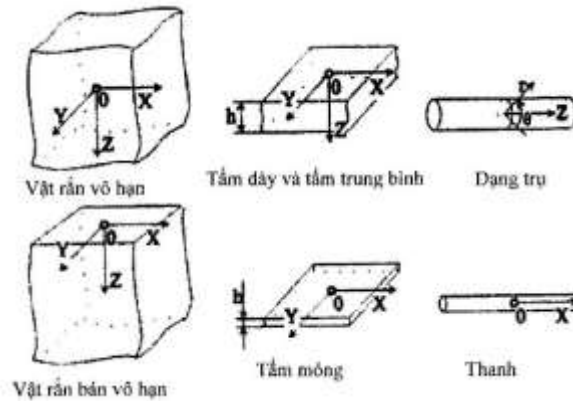
Hình 4.5 Các bước xây dựng dạng hình học tính toán

Mô hình vật rắn đã được xây dựng để cung cấp sự mô tả toàn diện toán học của hình dạng hình học vật thể [5][6][7], hình 4.5. Mô hình hóa là một quá trình chuẩn bị cho mô phỏng tính toán. Để bắt đầu tạo ra mô hình phân tích trước hết chúng ta cần quyết định loại hàm dạng nào sẽ phù hợp với mục đích của ta. Hình 4.6 cho ta biết các dạng mô hình vật thể lý tưởng.

Bước tiếp theo hướng tới việc tạo ra mô hình phân tích là lựa chọn xấp xỉ liên quan tới hàn. Pilipenko đề xuất bài toán nghiên cứu có thể phân loại theo: Thời gian tác động, sự chuyển động và kích thước (số chiều). Thời gian tác động có thể tức thời hoặc liên tục và sự chuyển động, trạng thái dừng hoặc di động.

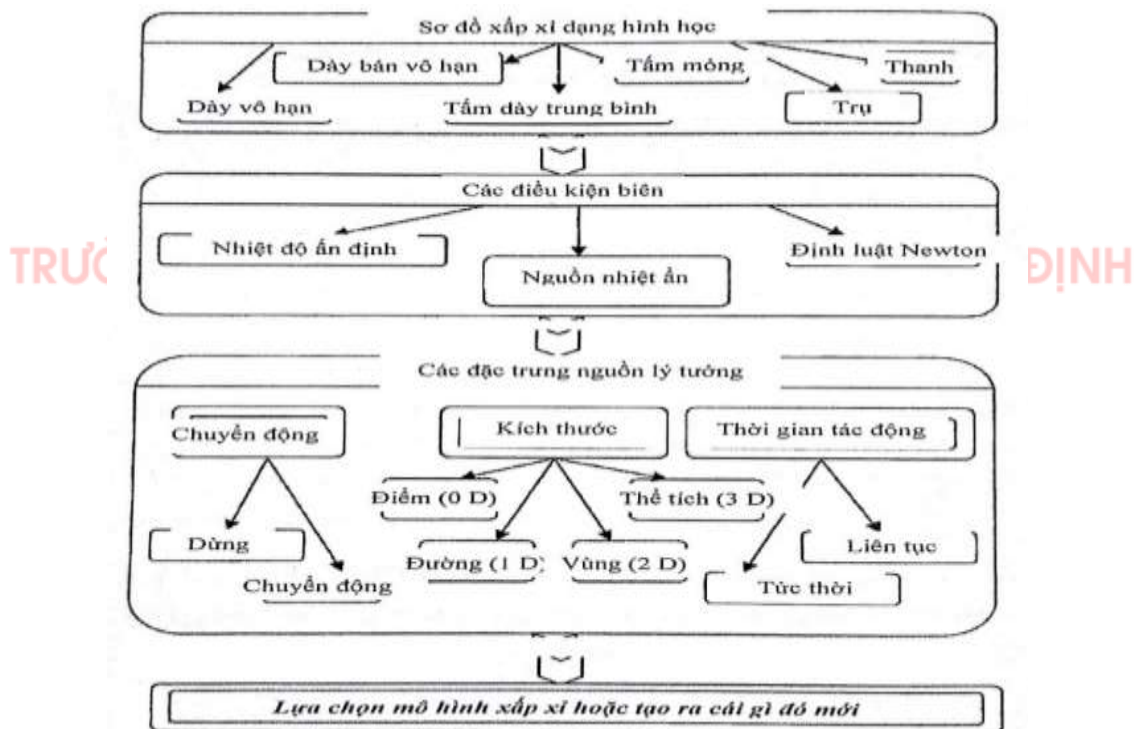
Theo phạm vi phân bố, có thể biểu thị như một điểm (0 chiều), đường (1 chiều), mặt (2 chiều) và thể tích (3 chiều).





Hình 4.6 Một số mô hình vật thể lý tưởng

Phân tích cơ học chủ yếu là một chiều, mặc dù lời giải giải tích cho nhiệt độ là 2 chiều. Trong hàn thường đòi hỏi thực hiện phân tích 3D và giả ổn định, và hầu hết các công thức đều xây dựng cho 3D, tuy nhiên để giảm chi phí tính toán nhiều phân tích chỉ sử dụng mô hình có số chiều thấp.



Hình 4.7 Trình tự lựa chọn quá trình mô phỏng

### 4.2.3 Mô phỏng số liên kết hàn góc chữ T hợp kim nhôm A5083

Quá trình mô phỏng bằng phương pháp PTHH [5][8][15] bao gồm ba giai đoạn chính:

- Giai đoạn 1: Xây dựng mô hình nghiên cứu;
- Giai đoạn 2: Mô hình hóa PTHH và thiết lập các điều kiện tính toán;
- Giai đoạn 3: Phân tích, xử lý số liệu và giải bài toán cơ nhiệt;
- Giai đoạn 4: Hiện thị và phân tích kết quả tính toán.

Giai đoạn một gồm các thông số vật liệu, mô hình hình học liên kết hàn và mô hình nguồn nhiệt cấp vào. Giai đoạn hai phân tích sự truyền nhiệt để giải quyết các vấn đề về nhiệt để thu được lịch sử quá trình nhiệt, và sau đó giải quyết các vấn đề cơ học. Giai đoạn cuối cùng là hiển thị các kết quả thu được từ sự phân tích.

Mô phỏng số quá trình hàn có thể đưa ra các mục đích khác nhau. Quá trình mô phỏng này gồm 3 chương trình mô phỏng con (subdomains):

### 1. Mô phỏng quá trình

Phần này liên quan đến việc phân tích quá trình đang xảy ra tại vùng nóng chảy (FZ – fusion zone) [7], xác định đặc tính cũng như hình dạng kích thước vùng nóng chảy (như là: hiệu suất hồ quang, chiều rộng vũng hàn, chiều sâu ngấu, sức căng bề mặt, hình dáng vũng hàn,..)

### 2. Mô phỏng cấu trúc

Đánh giá ứng suất dư và biến dạng và những ảnh hưởng của chúng đến độ bền và độ cứng của bộ phận hoặc toàn kết cấu.

### 3. Mô phỏng vật liệu

Mô hình hóa sự phát triển của các trạng thái tổ chức tế vi tại vùng nóng chảy và vùng HAZ với sự thay đổi về độ cứng, sự khuếch tán hydro và xu hướng nứt nóng hay nguội [8][9].



Hình 4. 8 Các chương trình con trong mô phỏng hàn

Hình 4.8 mô tả 3 chương trình con dùng trong mô phỏng hàn. Trong đó, lời giải nhiệt hàn được áp dụng cho bài toán cơ sau này như là tải nhiệt.

Joseph Fourier đã đưa ra các giả thuyết cơ bản về sự truyền nhiệt. Rosenthal và Rykalin đã ứng dụng giả thuyết này để dự đoán trường nhiệt độ đối với nguồn nhiệt di động từ năm 1930. Cùng với sự phát triển mạnh mẽ của ngành công nghệ thông tin việc phân tích ứng suất nhiệt sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn được Ueda nghiên cứu từ năm 1972, Goldak và Akhlaghi năm 2005. Các thành tựu này

được áp dụng trong nhiều thập kỷ tiếp theo để nghiên cứu các mô hình phức tạp như: Thay đổi mô hình vật liệu, mô hình khi hàn nhiều lớp, sử dụng mô hình 3D thay cho mô hình 2D và sự chuyển biến pha trong mô hình,... Macherauch và Wohlfahrt (1978) giải thích rằng sự hình thành ứng suất dư giống 3 quá trình riêng biệt: Biến dạng đường hàn và vùng HAZ, ứng suất dư do làm nguội nhanh bề mặt (tương tự như tôi) và ứng suất dư do chuyển biến pha. Sau đó, Nitschke-Pagel và Wohlfahrt (1992) và Voss cùng cộng sự (1997) đã làm nổi bật vai trò của biến dạng trong việc hình thành ứng suất dư. Ứng suất co ngót xảy ra vì, trong quá trình làm nguội, sự co ngót tại khu vực nhiệt độ cao tại đường hàn thường chậm hơn bởi khu vực xung quanh nguội hơn. Điều này như là ngoại lực làm biến dạng [11][12][13].

Như đã trình bày ở trên, quá trình hàn là một quá trình liên tục còn về bản chất PP - PTHH lại cần “rời rạc hóa” các quá trình đó để có thể tính toán và đưa ra kết quả mô phỏng phù hợp [5][7]. Do đó tải nhiệt đưa vào cần phải được rời rạc hóa. Ngoài ra, một thách thức rất lớn khi mô phỏng số quá trình hàn đó là thông thường khi mô phỏng bằng phương pháp PTHH thì số lượng phần tử, kiểu phần tử là có sẵn từ sau khi chia lưới, tức là mô hình phôi hàn, đường hàn, vũng hàn, kim loại hàn phải có sẵn từ khi chia lưới xong, nhưng thực tế thì kim loại nóng chảy sinh ra trong quá trình hàn, tức là hàn tới đâu thì phần tử mới sinh ra tới đó. Để giải quyết hai vấn đề quan trọng này (rời rạc hóa tải nhiệt đầu vào và chỉ tính toán và hiển thị trên các phần tử đã có – không hiển thị và tính toán trên các phần tử chưa xuất hiện–chưa sinh), các phần mềm mô phỏng mạnh hiện nay như ANSYS, SIMUFACT WELDING, hay mới nhất là SYSWELD 2016 đã đưa ra kỹ thuật xử lý tiêu diệt và tái sinh phần tử - “Element death and born”. Kỹ thuật này được trình bày cụ thể qua các bước như sau:

Bước 1: Xây dựng mô hình đầy đủ của toàn bộ mô hình liên kết hàn sau khi đã hàn xong, bao gồm phôi hàn và mối hàn dự kiến.

Bước 2: Chia lưới cho mô hình theo kiểu phần tử hợp lý với môi trường tính toán.

Bước 3: Tiêu diệt tất cả các phần tử thuộc mối hàn chưa hàn đến – Thực chất là gán ma trận 0 cho tất cả các phần tử thuộc mối hàn mà chưa hàn đến – nhân ma trận với hệ số vô cùng bé (trong ANSYS thì mặc định hệ số này là 1.0E-6), để khi tính toán và hiển thị sẽ không tác động tới vùng này.

Bước 4: Chia đường hàn thành n đoạn, từ 1 tới n, căn cứ vào độ dài đường hàn và tốc độ hàn mà đoạn hàn có độ dài ngắn phù hợp.

Bước 5: Bỏ việc gán ma trận 0 cho tất cả các phần tử thuộc liên kết và các phần tử thuộc đoạn hàn thứ nhất, đặt tải nhiệt, lực cho các phần tử thuộc đoạn này và tính toán quá trình truyền nhiệt, tính toán ứng xử kết cấu trong thời gian tương

ứng  $t_1$  – thời gian khi hàn xong đoạn 1.

Bước 6: Tiếp tục bỏ việc gán ma trận 0 cho các phần tử thuộc đoạn 2, đồng thời bỏ tải nhiệt cho đoạn 1, đặt tải nhiệt lên đoạn 2, tiếp tục tính toán quá trình truyền nhiệt, tính toán ứng xử kết cấu từ kết quả của bước thứ 5 trong thời gian tương ứng  $t_2$  – thời gian hàn đoạn thứ 2.

...

Lặp lại các bước 5, 6 cho đến khi hàn hết toàn bộ chiều dài mối hàn.

Bước 7: Xuất ra các kết quả cần thiết.

### **4.3 Mô phỏng quá trình hàn trên phần mềm Sysweld**

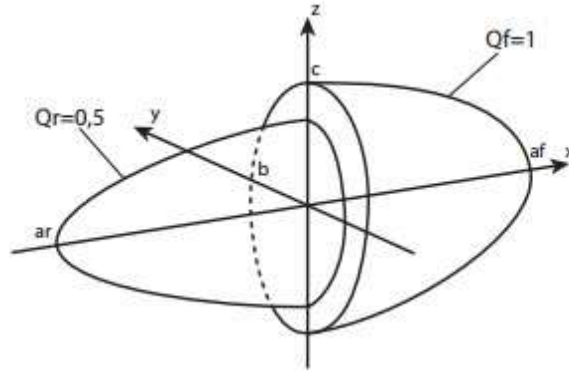
#### **4.3.1 Giới thiệu**

Phân tích trường nhiệt hàn [6][7] đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá ứng suất biến dạng dư hàn và mô phỏng cấu trúc tế vi kim loại mối hàn. Đây là một quy trình đầu tiên phải làm trong việc đánh giá khả năng làm việc của các chi tiết kết cấu hàn trong ngành công nghiệp chế tạo tàu biển, máy bay, cầu thép, tháp cao hay các đường ống cao áp dẫn hơi nước, dẫn khí dầu trong công nghiệp năng lượng hóa chất và dầu khí. Đặc biệt các thông tin chính xác về quá trình thay đổi nhiệt độ của các chi tiết hàn trong quy trình chế tạo và vận hành là những căn cứ mang tính quyết định tới kết quả đánh giá tuổi thọ, khả năng làm việc của kết cấu hàn.

Trong những năm gần đây, việc kiểm soát trường nhiệt độ, sự phân bố ứng suất dư, ứng suất tập trung cục bộ và biến dạng hàn không còn là vấn đề phức tạp như trước đây nhờ sự phát triển vượt bậc của ngành kỹ thuật máy tính. Dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn bằng các phần mềm như SYSWELD, ANSYS, ABAQUS, COSMOS, NASTRAN... ta có thể dễ dàng dự đoán được ảnh hưởng của các thông số công nghệ hàn đến sự phân bố ứng suất dư và biến dạng. Đồng thời ta cũng có thể kiểm soát được lượng nhiệt cấp vào bể hàn với mục đích làm giảm sự ảnh hưởng cả nhiệt độ tính chất cơ nhiệt của KLCB đặc biệt là vùng HAZ.

Với nguồn nhiệt hàn hồ quang trong môi trường khí bảo vệ điện cực nóng chảy, tổng công suất hiệu dụng  $P = \eta \cdot U_h \cdot I_h$  (W), trong đó  $U_h$  - là điện áp hồ quang (V);  $I_h$  - là cường độ dòng điện hàn (A) và  $\eta$  là hiệu suất hồ quang hàn 85% [1][13][7][20][21].

Goldak và cộng sự [7][15] đã đưa ra mô hình nguồn nhiệt có mật độ phân bố ellipsoid kép được xác định bằng cách phối hợp hai khối bán ellipsoid khác nhau để tạo thành một nguồn nhiệt. Mật độ nhiệt bên trong từng khối bán ellipsoid được mô tả bằng 2 phương trình riêng như sau:



Hình 4. 9 Mô hình nguồn nhiệt hàn MIG

Với một điểm bất kỳ  $(x,y,z)$  bên trong khối bán ellipsoid đầu tiên (phía trước hồ quang hàn), mật độ nguồn nhiệt được biểu diễn bởi phương trình 4.28.

$$Q_R(x, y, z) = Q_f \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{a_f^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2}\right) \quad (4. 28)$$

Với một điểm bất kỳ  $(x,y,z)$  bên trong khối bán ellipsoid thứ hai (phía sau hồ quang hàn), mật độ nguồn nhiệt được biểu diễn bởi phương trình 4.29.

$$Q_R(x, y, z) = Q_r \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{a_r^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2}\right) \quad (4. 29)$$

Trong hai công thức trên  $a_f$ ,  $a_r$ ,  $b$  và  $c$  là các thông số hình học của nguồn nhiệt khối ellipsoid kép, hình 4.9;  $Q_R$  là hàm mật độ nguồn nhiệt.

Như vậy có thể thấy rằng nguồn nhiệt khối ellipsoid kép phân bố Gauss [7][14][15] có thể được biểu diễn bằng 5 thông số. Đó là: hiệu suất hồ quang  $\eta$  và 4 thông số hình học của nguồn nhiệt  $a_f$ ,  $a_r$ ,  $b$  và  $c$ .

Bảng 4. 1 Mô hình nguồn nhiệt theo Goldak

| b (mm) | c (mm) | $a_f$ (mm) | $a_r$ (mm) |
|--------|--------|------------|------------|
| 5      | 4,5    | 5          | 7          |

#### 4.3.2 Thông số quá trình hàn và mô phỏng

Thông số mô phỏng bằng phương pháp hàn MIG được cho trong bảng 3.3.

Bảng 4. 2 Thông số mô phỏng hàn

| Năng lượng đường (J/mm) | Vận tốc hàn (mm/s) |
|-------------------------|--------------------|
| 750                     | 5                  |
| 800                     | 5                  |

#### 4.3.3 Tính chất cơ lý hóa của hợp kim nhôm A5083

##### 1. Cơ tính và thành phần hóa học của hợp kim nhôm A5083

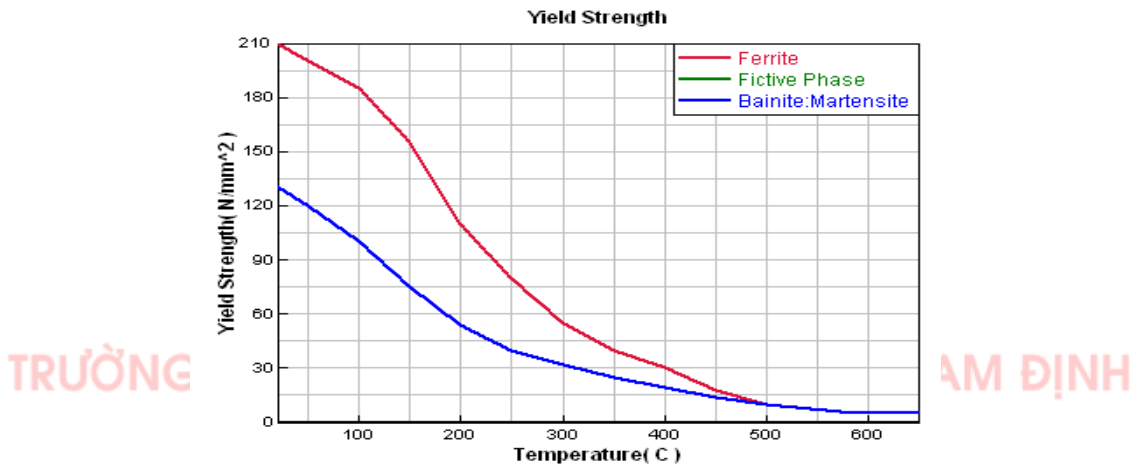
Bảng 4. 3 Cơ tính hợp kim nhôm A5083

| Cấp vật liệu | Giới hạn chảy (MPa) | Giới hạn bền kéo (MPa) | Độ giãn dài tương đối, % |
|--------------|---------------------|------------------------|--------------------------|
| A5083        | ≥195                | 275 ÷ 345              | 11                       |

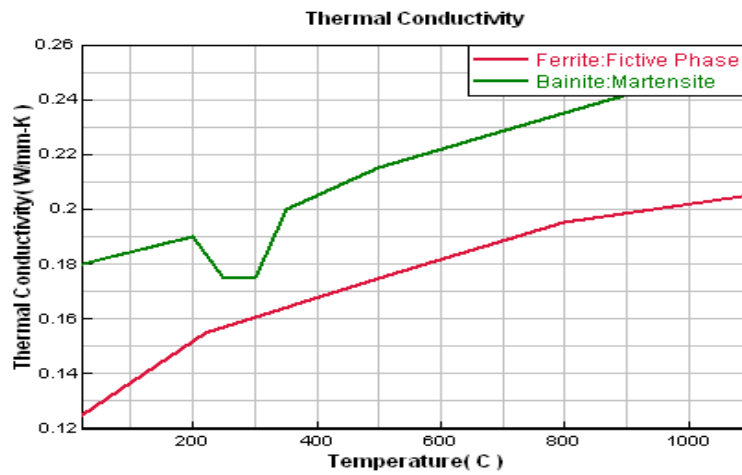
Bảng 4. 4 Thành phần hóa học hợp kim nhôm A5083

| Thành phần hóa học (%) |     |      |     |     |     |     |     |         |
|------------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|---------|
| Mn                     | Si  | Cr   | Fe  | Mg  | Ti  | Cu  | Zn  | Al      |
| 0,5                    | 0,6 | 0,25 | 0,5 | 2,6 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | Còn lại |

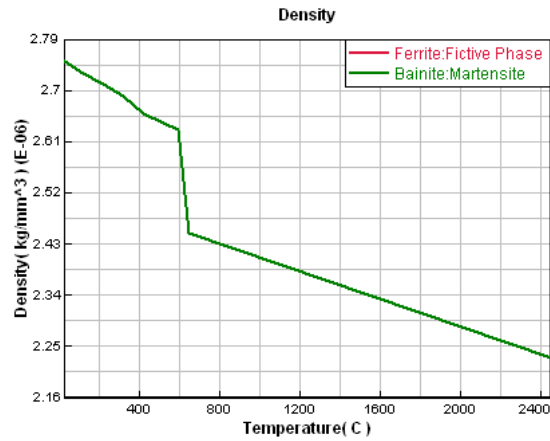
2. Tính chất hóa-lý-tổ chức pha của hợp kim nhôm A5083



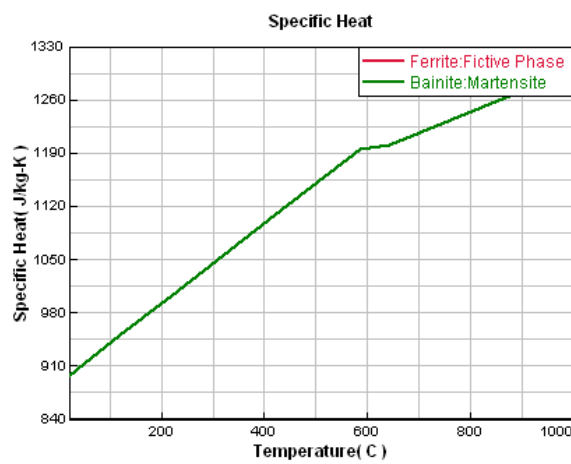
Hình 4. 10 Giới hạn chảy theo các pha của hợp kim nhôm A5083



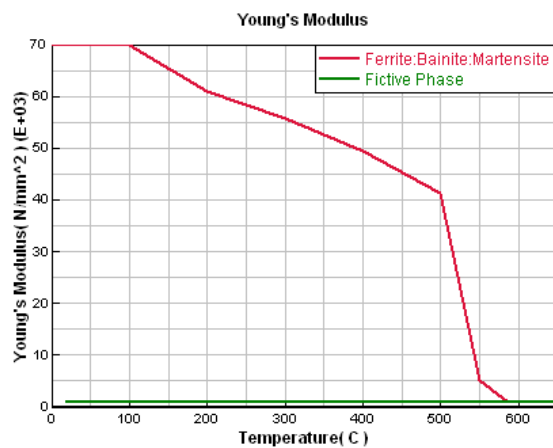
Hình 4. 11 Hệ số dẫn nhiệt của hợp kim nhôm A5083



Hình 4. 12 Khối lượng riêng của hợp kim nhôm A5083



Hình 4. 13 Nhiệt dung riêng của hợp kim nhôm A5083



Hình 4. 14 Mô đun Young của hợp kim nhôm A5083

Trên các hình 4.10 đến hình 4.14 mô tả các tính chất hóa lý, cơ-nhiệt của hợp kim nhôm A5083 theo nhiệt độ [8]. Ta thấy rằng khi nhiệt độ tăng thì giới hạn chảy của hợp kim nhôm A5083 giảm và hệ số dẫn nhiệt tăng,...

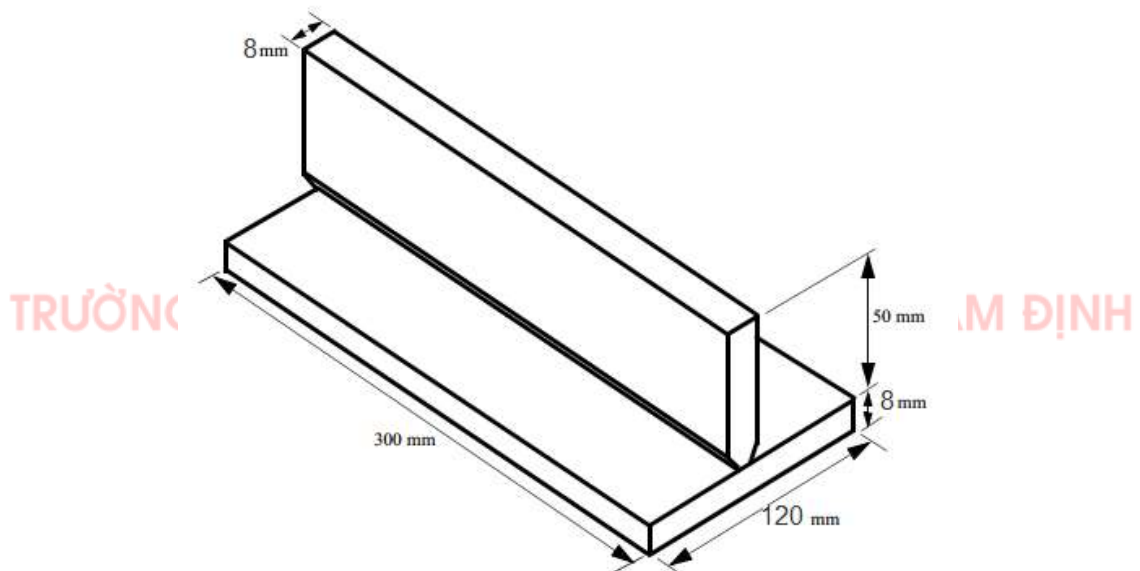


## 4.4 Mô hình hóa và mô phỏng số

### 4.4.1 Mô hình hóa

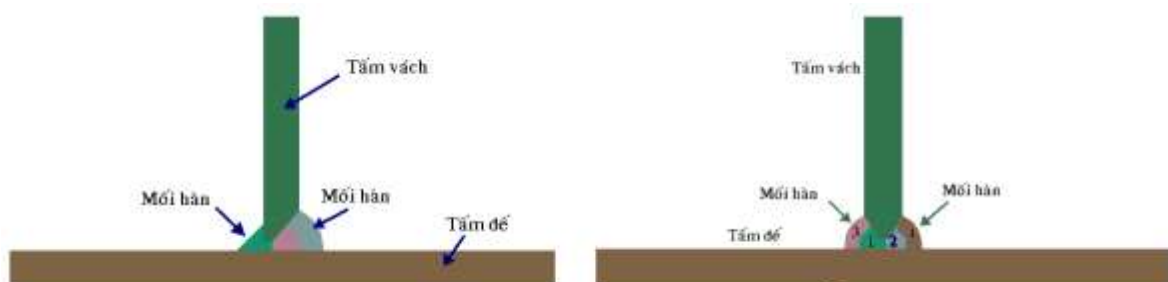
Thiết kế liên kết hàn hàn góc chữ T từ hợp kim nhôm A5083 theo tiêu chuẩn AWS D1.2:2014 [16], xem hình 4.15. Trong đó:

- Chiều dày:  $T = 8 \text{ mm}$ ;
- Kiểu liên kết hàn: Góc chữ T
- Góc vát:  $\alpha = 60^\circ \pm 5^\circ$
- Khe hở lắp ghép:  $R \leq 2$
- Lượng dư gia công:  $f = 1,5 \div 2$
- Bề rộng tấm hàn: 120mm
- Chiều dài đường hàn: 300mm



Hình 4. 15 Thiết kế mối ghép hàn hợp kim nhôm A5083

Trên cơ sở đó tác giả sử dụng phần mềm VisualMesh [8] để thiết kế mối ghép hàn hàn góc chữ T có vát mép hợp kim nhôm A5083 có kích thước như đã chọn hình 4.15, tấm vách được thiết kế như hình 4.16.



Hình 4. 16 Bố trí các mối hàn



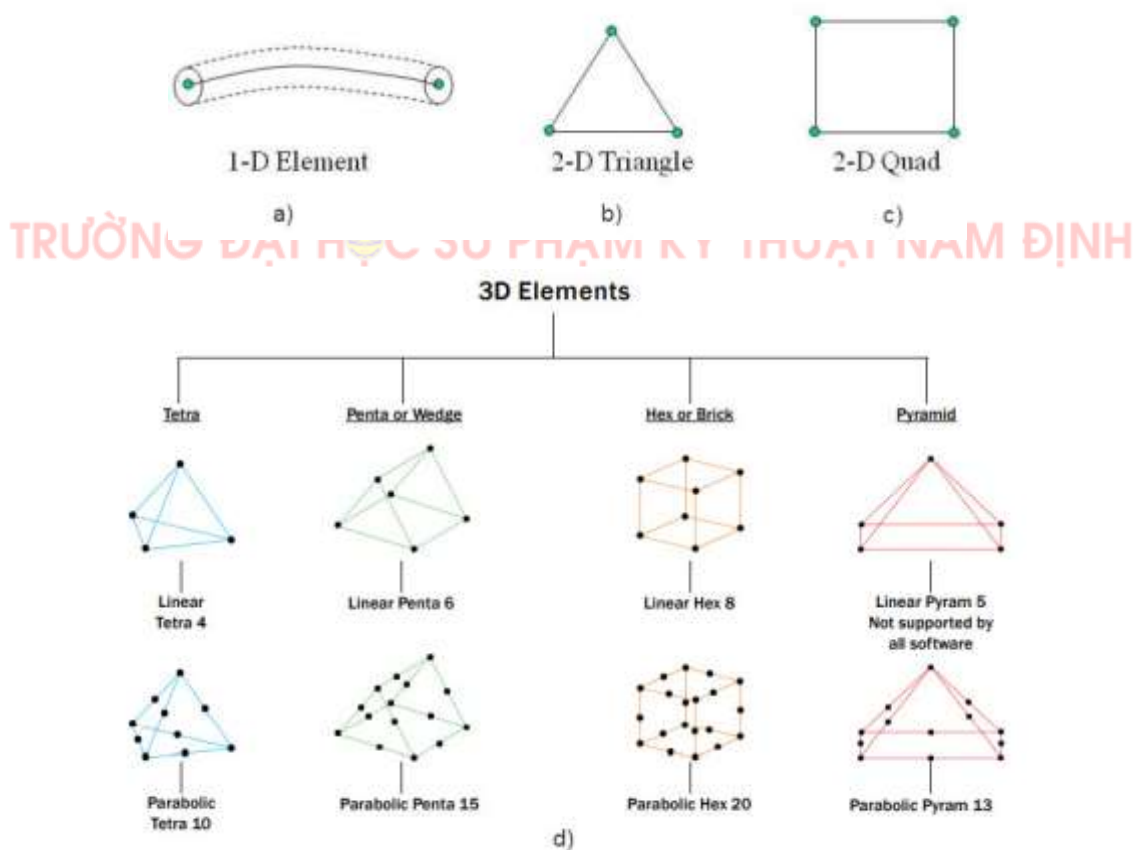
#### 4.4.2 Xây dựng mô hình phần tử hữu hạn (FEM)

Việc chia lưới mô hình được tác giả thực hiện trên phần mềm VISUALMESH® [8]. Việc tạo các mối hàn và điểm bắt đầu hàn và kết thúc hàn được thực hiện đúng như trong thực nghiệm.

Kích thước lưới có ảnh hưởng trực tiếp đến thời gian mô phỏng []. Kích thước lưới càng nhỏ thì thời gian từng bước giải sẽ rất nhỏ dẫn đến thời gian mô phỏng của cả liên kết là rất lâu. Chính vì vậy việc chọn thời gian để giải từng bước là rất quan trọng hay nói cách khác kích thước lưới phải chọn sao cho vẫn đảm bảo độ chính xác mà thời gian mô phỏng là ít nhất.

Để mô hình hóa liên kết hàn với các vùng có kích thước lưới khác nhau, tác giả thực hiện như sau:

Dưới đây là một số kiểu lưới phần tử sử dụng trong phân tích và tính toán các bài toán cơ nhiệt (Hình 4.17).

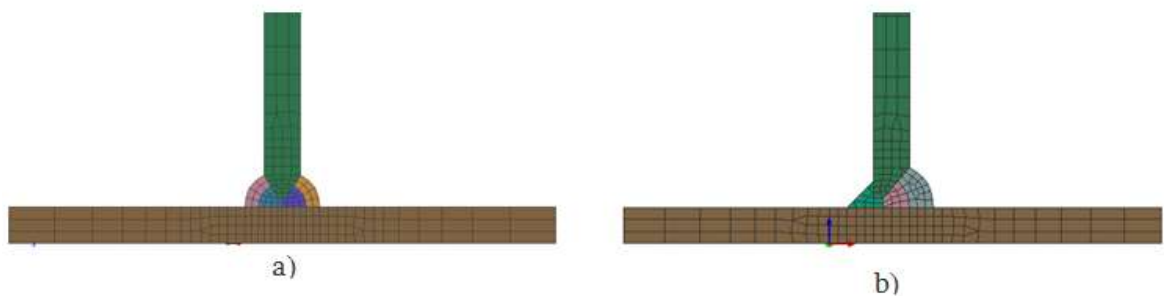


Hình 4. 17 Kiểu lưới phần tử

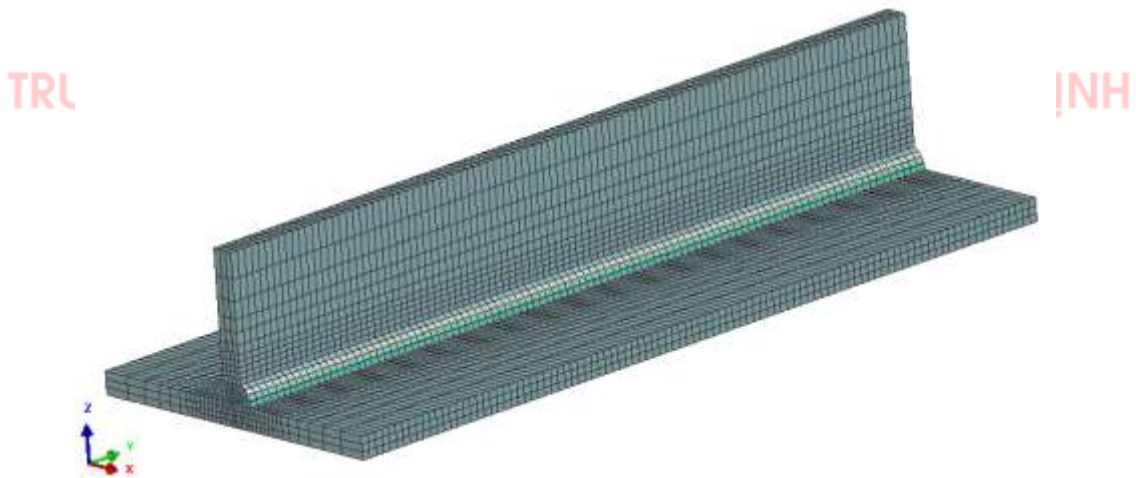
a) Phần tử 1-D; (b, c) Phần tử 2-D; d) Phần tử 3-D

Tuy nhiên, trong mô phỏng số trường ứng suất và biến dạng với phần tử khối (3D element) theo khuyến cáo [5][8] nên sử dụng các loại phần tử HEXA/PENTA hạn chế sử dụng phần tử TETRA và PYRAMID.

Để kết quả tính toán được chính xác cũng như thời gian xử lý bài toán mô phỏng nhanh tác giả chọn mô hình chia lưới như 4.18. Sau đó, mô hình hình học (3D) liên kết hàn góc chữ T được mô hình hóa với 28.531 node. Trong đó, phần tử (HEXA, PENTA, TETRA) là 40.369 phần tử. Khu vực mối hàn và vùng HAZ được chia mịn; khu vực ở xa vùng chịu tác động của nhiệt độ cao lưới được chia thưa hình . Dạng lưới phần tử sử dụng trong mô hình này là kiểu Linear Hex 8 và Linear Penta 6 (Hình 4.17.d). Kích thước lưới mịn vào khoảng từ 1÷3mm, vùng lưới thưa kích thước tăng dần và vùng ít hoặc gần như không chịu tác động bởi nhiệt độ, kích thước lưới đạt tới 10mm.



Hình 4.18 Vùng chia lưới và kiểu lưới



Hình 4.19 Lớp vỏ trao đổi nhiệt

Trong mô phỏng số hàn để kết quả sát với thực tế ta phải tạo lớp vỏ. Mục đích là tạo bề mặt trao đổi nhiệt, tỏa nhiệt, bức xạ ra môi trường xung quanh gần giống như trong quá trình hàn thực nghiệm.

#### 4.4.2 Mô phỏng số

##### 1. Tính toán thời gian của một bước mô phỏng

Liên quan đến sự dẫn nhiệt, đối với vật liệu đẳng hướng không phụ thuộc nhiệt độ và hệ số dẫn nhiệt, không có sự phát sinh nhiệt từ bên trong và nhiệt truyền theo một hướng, thường theo phương X [9][17][18].

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \quad (4.30)$$

Đối với sự thay đổi nhiệt độ như nhau, công thức 3.31 có thể được sử dụng để ước tính mối quan hệ giữa không gian và thời gian như sau:

$$\Delta t = (\Delta X)^2 / k \quad (4.31)$$

Trong đó: k là hệ số dẫn nhiệt

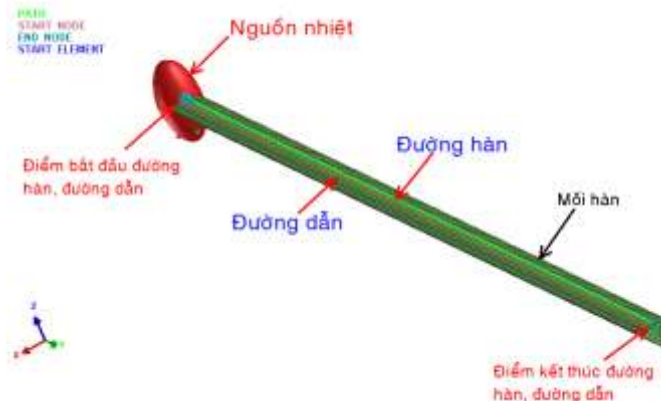
Với kích thước lưới tác giả sử dụng trong nghiên cứu này 2 ÷ 3 mm, như vậy ước tính thời gian mô phỏng của mỗi bước là

$$\Delta t = \frac{(3mm)^2}{2,09 \times 10^{-5} m^2 / s} \left( \frac{m}{1000mm} \right)^2 = 0,45s$$

Như vậy với kích thước lưới đặc trưng là 3 mm tại vùng hàn và HAZ thì thời gian giải mỗi bước là 0,45s có thể chấp nhận được. Nếu chia lưới mịn quá thì sẽ mất nhiều thời gian giải bài toán cơ nhiệt. Theo thuật toán tối ưu của phần mềm thì thời gian để giải mỗi bước là 0,44s gần với tính toán là có thể chấp nhận được.

### 2. Xây dựng đường hàn, đường dẫn

- Khai báo;
- Khai báo kiểu phần tử sử dụng trong mô hình mô phỏng: Solid;
- Khai báo thông số vật liệu;
- Xây dựng quỹ đạo đường hàn, đường dẫn xem Hình 4. 20.

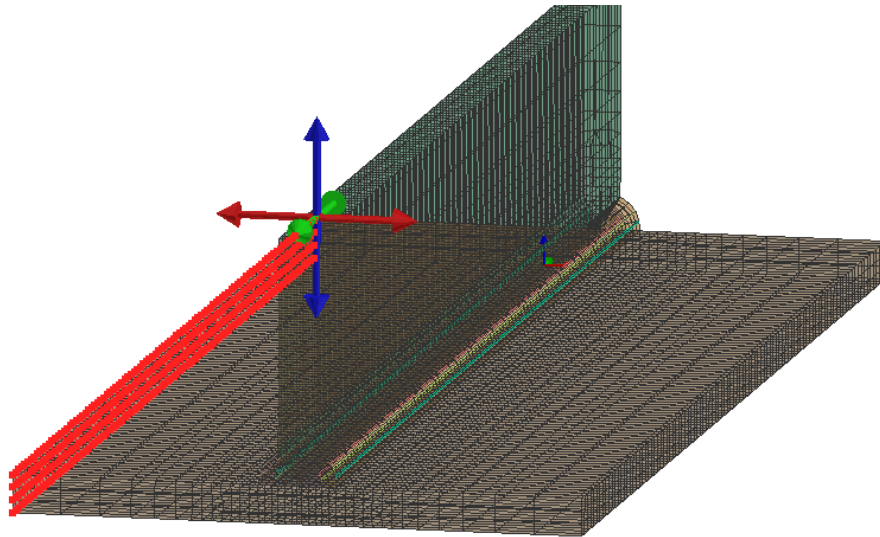


Hình 4. 20 Quỹ đạo đường hàn và đường dẫn

- Khai báo điều kiện về thông số chế độ hàn (vận tốc hàn, công suất nguồn nhiệt, slop-up, slop-down,...).

### 3. Khai báo điều kiện gá kẹp

Trong nghiên cứu của mình tác giả lựa chọn điều kiện gá kẹp như hình 4.21, kẹp chặt một phía tấm để theo cả 3 phương X, Y, Z; tấm vách và phía kia của tấm để để tự do.



Hình 4. 21 Mô hình gá kẹp

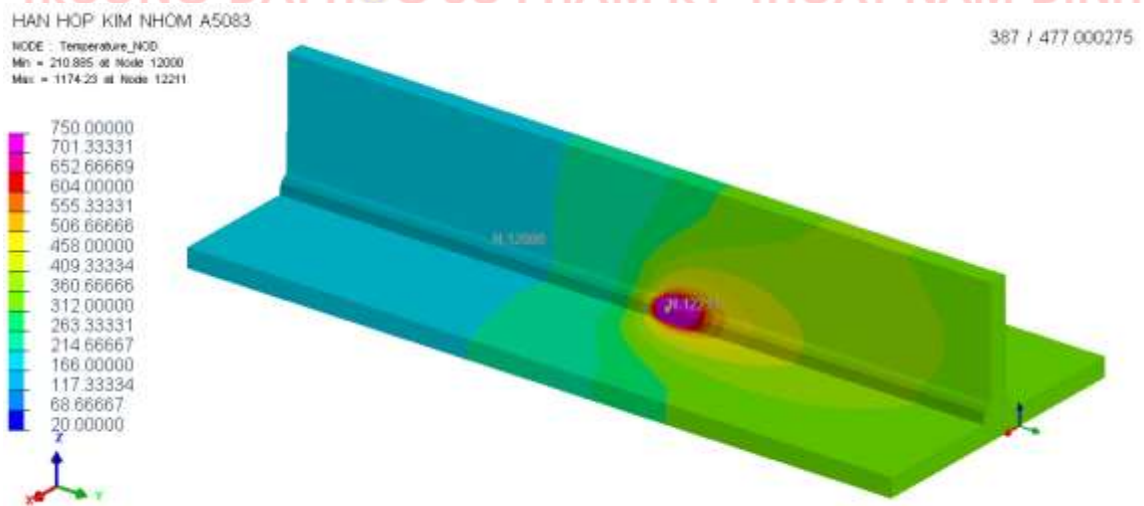
Giải bài toán bằng phần mềm VisualWeld.

Chọn nhiệt độ ban đầu: 20°C.

Thời gian mô phỏng và làm nguội mô hình xuống nhiệt độ dưới 100°C khoảng 1000s.

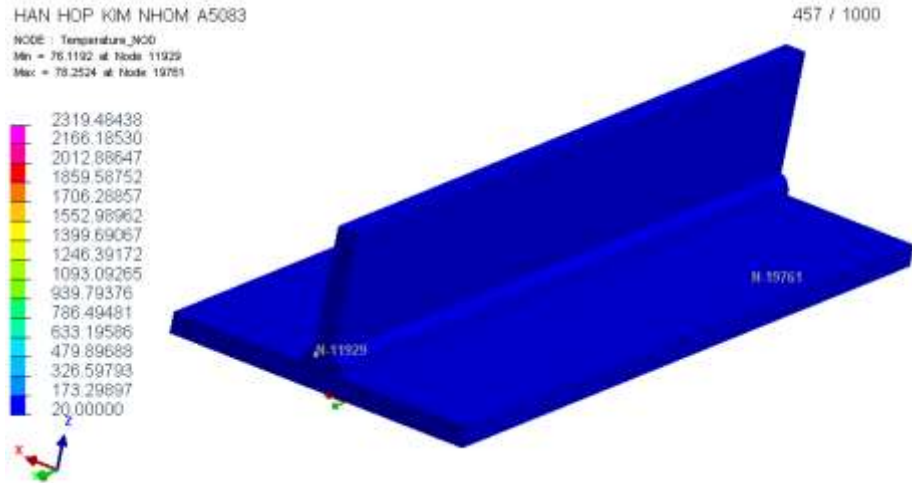
#### 4.5 Kế quả mô phỏng

##### 4.5.1. Trường nhiệt độ

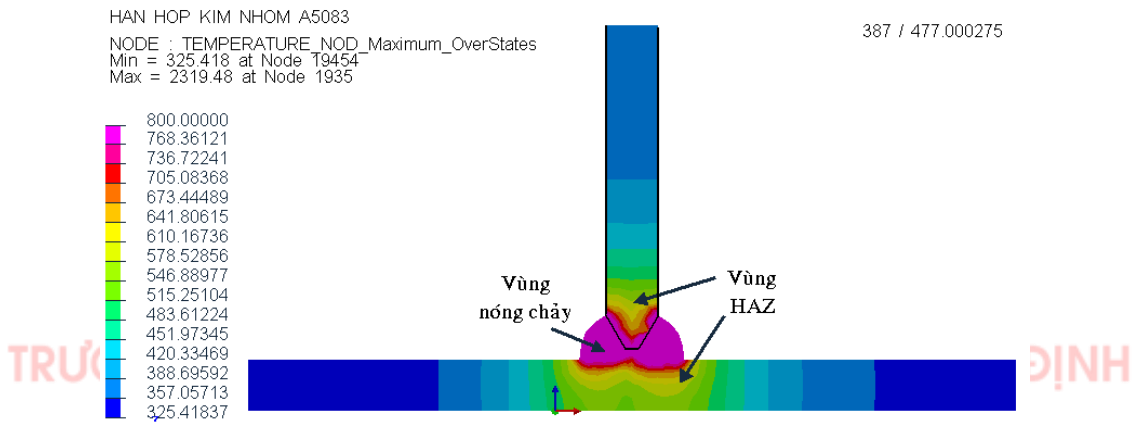


Hình 4. 22 Hình dạng bề hàn

Hình 4.22, mô tả hình dáng kích thước bề hàn với thông số chế độ mô phỏng được cho như bảng 3. Nhiệt độ lớn nhất tại nút 12211 xấp xỉ 1174°C. Sau thời gian mô phỏng 1000s nhiệt độ vật hàn giảm xuống 76°C, xem hình 4.23.

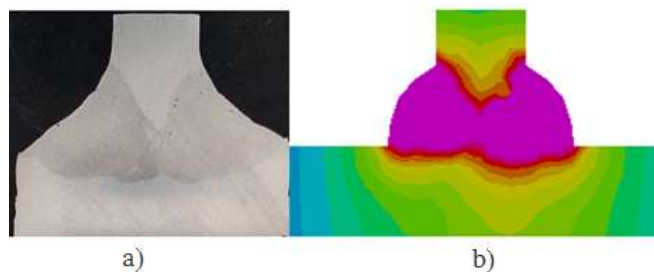


Hình 4. 23 Phân bố nhiệt độ sau 1000s



Hình 4. 24 Chiều sâu ngấu hàn

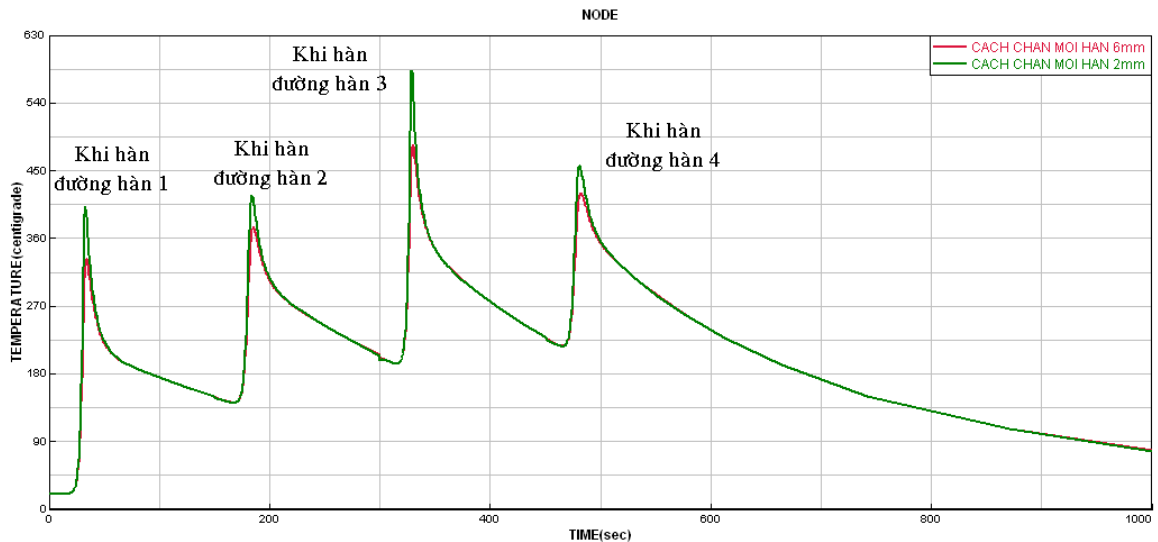
Hình 4.24 mô tả chiều sâu ngấu liên kết hàn hợp kim nhôm A5083 với các thông số mô phỏng cho trong bảng 3.2. Nhận thấy rằng, khi hàn lớp lót với nguồn nhiệt (năng lượng đường 750J/mm) là hoàn toàn phù hợp, chiều sâu ngấu vừa đủ. Khi hàn lớp phủ, nguồn nhiệt (năng lượng đường 800J/mm) cũng vừa đủ để làm nóng chảy chân mỗi hàn và một phần kim loại của mỗi hàn lót.



Hình 4. 25 So sánh chiều sâu ngấu giữa thực nghiệm và mô phỏng

Hình 4.25 thể hiện chiều sâu ngấu giữa thực nghiệm hàn góc chữ T hợp kim nhôm A5083 bằng phương pháp hàn MIG và mô phỏng số bằng phần mềm Sysweld. Nhận thấy rằng, thông số chế độ hàn giữa thực nghiệm và mô phỏng là hoàn toàn phù hợp.



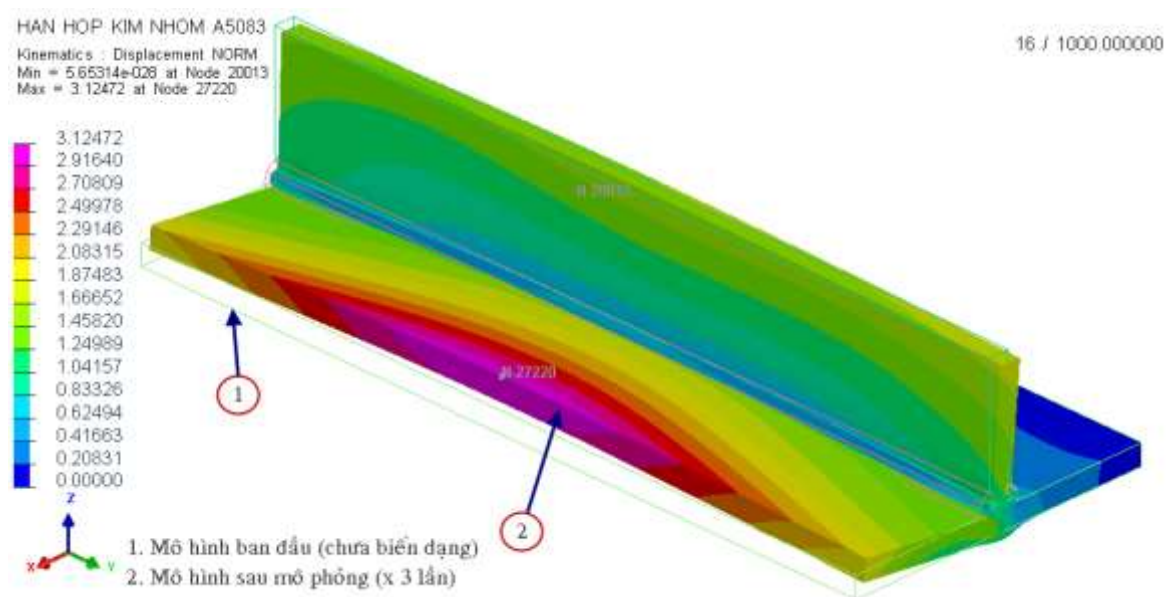


Hình 4. 26 Sự biến thiên nhiệt độ tại nút 18536 và 4786

Hình 4.26 mô tả sự biến thiên nhiệt độ tại nút 4786 cách chân mỗi hàn phủ 2mm và nút 18536 cách chân mỗi hàn phủ 6mm. Nhận thấy rằng khi nguồn nhiệt đi qua nút 4786 nhiệt độ cao nhất khoảng 585°C, trong khi đó do nút 18536 các nguồn nhiệt 6mm nên nhiệt độ đạt khoảng 475 °C. Khi hàn đường hàn thứ 4, nhiệt độ của các nút này thấp hơn khoảng 455 °C.

#### 4.5.2. Biến dạng hàn

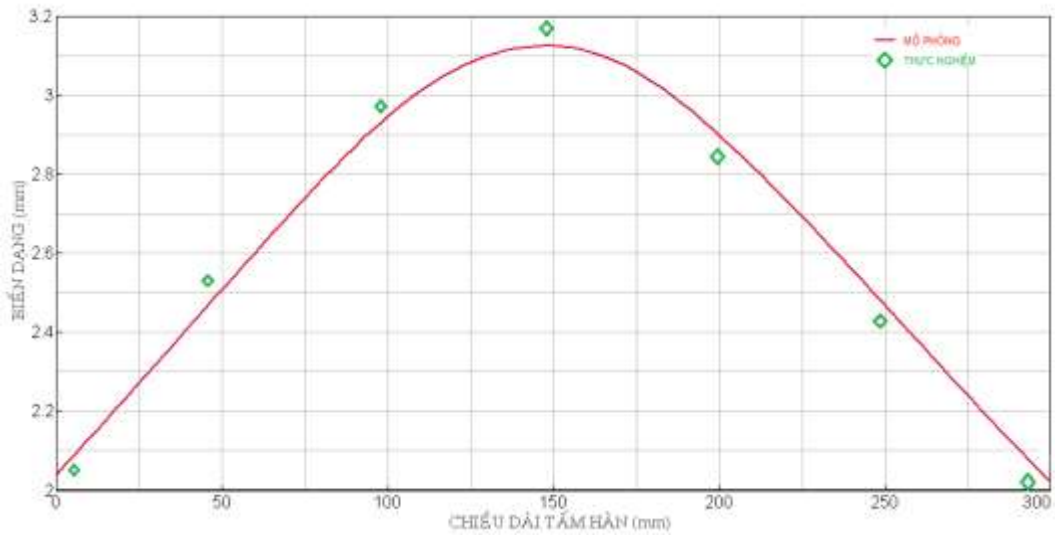
Hình 4.27 thể hiện biến dạng tổng khi hàn góc chữ T hợp kim nhôm A5083 vát mép 2 phía, dựa vào phổ màu ta thấy rằng mức độ biến dạng cao nhất tại vùng giữa tấm không kẹp, tương ứng với nút 27220 cách đầu và cuối đường hàn khoảng 150mm.



Hình 4. 27 Biến dạng tổng

Ta nhận thấy rằng biến dạng ở tấm vách là tương đối nhỏ. Điều đó cho thấy

rằng khi hàn đối xứng thì biến dạng không đáng kể, điều này hoàn toàn phù hợp với lý thuyết về ứng suất và biến dạng hàn.



Hình 4. 28 Biến dạng cạnh tấm không kẹp (mô phỏng và thực nghiệm)

Dựa vào đồ thị nhận thấy rằng biến dạng tăng dần từ đầu đường hàn đến cuối đường hàn và đạt giá trị đỉnh tại giữa tấm hàn khoảng 3,12mm.

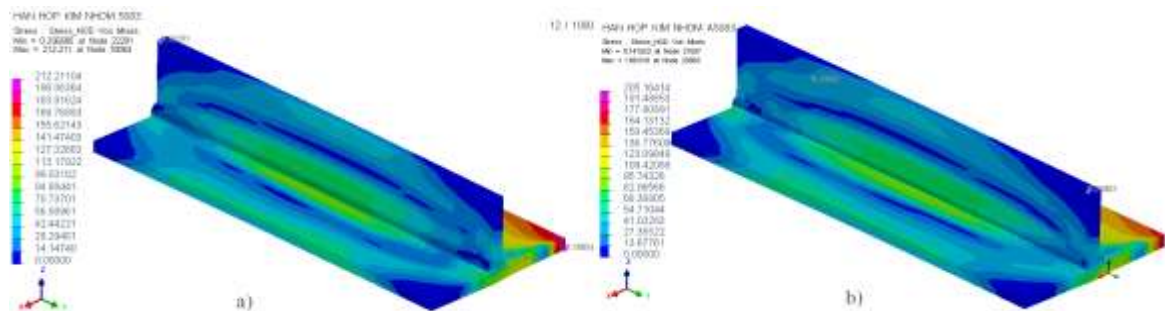
Bảng 4. 5 Kết quả biến dạng mô phỏng và thực nghiệm

| Khoảng cách | 0    | 50  | 100 | 150  | 200  | 250  | 300  |
|-------------|------|-----|-----|------|------|------|------|
| Thực nghiệm | 1,9  | 2,6 | 3,0 | 3,3  | 2,7  | 2,3  | 1,5  |
| Mô phỏng    | 2,03 | 2,5 | 2,9 | 3,12 | 2,89 | 2,45 | 2,02 |

Bảng 4.5 Cho ta biết kết quả kết quả tại các vị trí đo được trên tấm hàn giữa thực nghiệm và mô phỏng, nhận thấy rằng cùng một điều kiện gá kẹp biến dạng sự sai số giữa mô phỏng và hàn thực nghiệm tương đối nhỏ và hoàn toàn có thể chấp nhận được.

### 4.5.3. Ứng suất dư

#### 1. Ứng suất dư Von mises



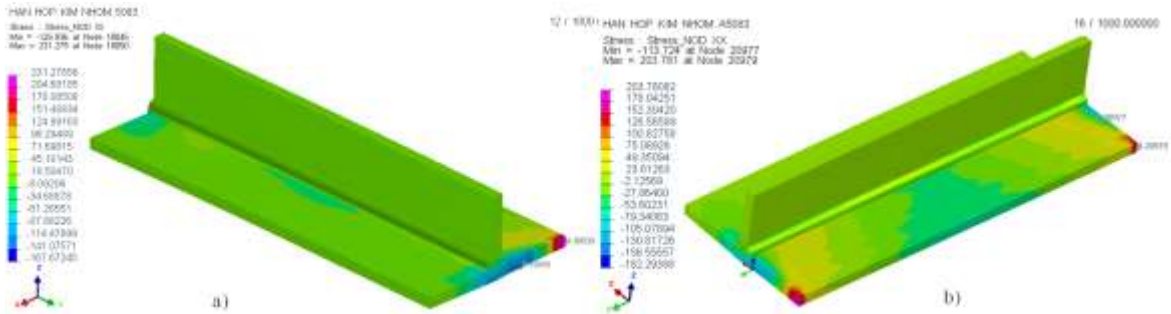
Hình 4. 29 Phân bố ứng suất Von mises

Trên hình 4.29 thể hiện sự phân bố ứng suất Von mises khi hàn góc chữ T hợp



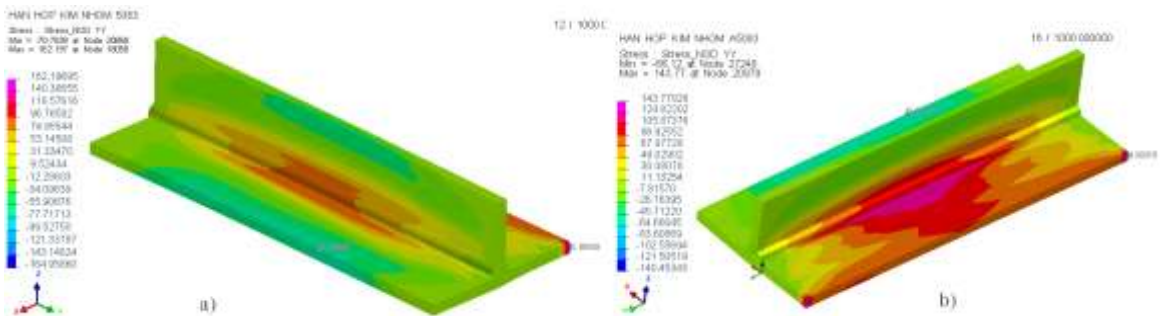
kim nhôm A5083 khi vát mép 1 phía (hình 4.29a) và vát mép 2 phía (hình 4.29b). Nhìn trên phổ màu ta nhận thấy ứng suất dư tập trung tại các vị trí gá kẹp đạt giá trị cao lần lượt là 212,2MPa và 205MPa. Trong khi đó ở vùng không gá kẹp, ứng suất dư rất nhỏ, chỉ vào khoảng dưới 100MPa. Với cả 2 trường hợp này, ứng suất dư đều nằm trong phạm vi cho phép (nhỏ hơn ứng suất chảy).

## 2. Ứng suất pháp



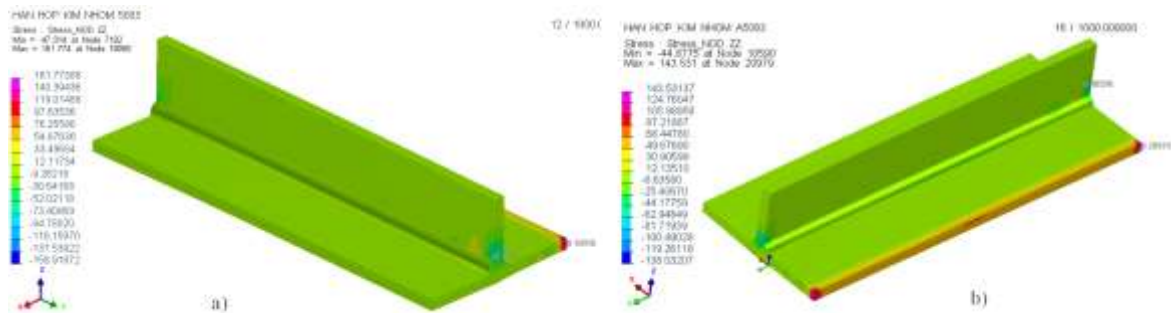
Hình 4. 30 Phân bố ứng suất pháp theo X

Trên hình 4.30 mô tả sự phân bố ứng suất pháp theo phương X, dựa vào phổ màu ta nhận thấy ứng suất cao nhất tại phía tấm bị ngàm, ứng suất kéo cao nhất 231,27MPa ứng với trường hợp vát mép 1 phía và  $\approx 203,78$ MPa với trường hợp vát mép 2 phía. Tại các điểm bắt đầu và kết thúc đường hàn xuất hiện ứng suất dư nén có giá trị vào khoảng 130MPa. Ứng suất kéo trường hợp vát 1 phía cao hơn trường hợp còn lại là 29MPa, trong khi đó ứng suất nén trường hợp 2 lại cao hơn trường hợp 1 là 15MPa.



Hình 4. 31 Phân bố ứng suất pháp theo Y

Hình 4.31 mô tả sự phân bố ứng suất dư dọc trục đường hàn (theo phương Y), dựa vào phổ màu nhận thấy rằng ứng suất dư phân bố tập trung ở vùng giữa mỗi hàn và ở phía tấm kẹp. Ứng suất cao nhất (ứng suất kéo) tại nút 20979 là 143,8MPa. Ứng suất nhỏ nhất (ứng suất nén) đạt giá trị 66,12MPa tại nút 27248.

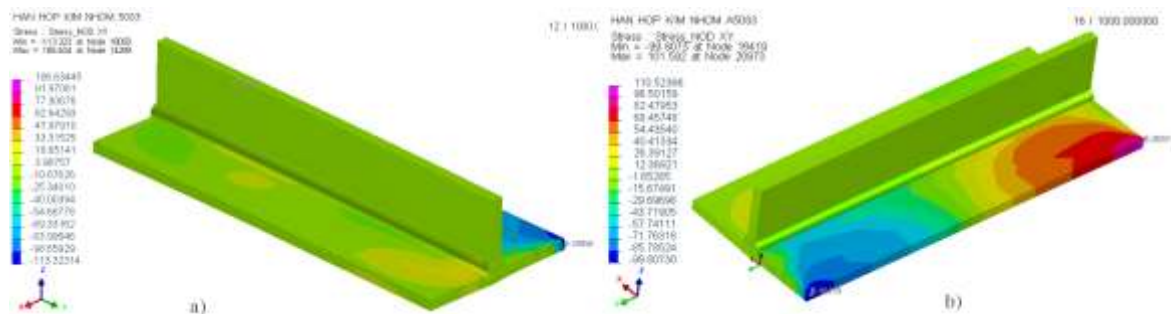


Hình 4.32 Phân bố ứng suất pháp theo Z

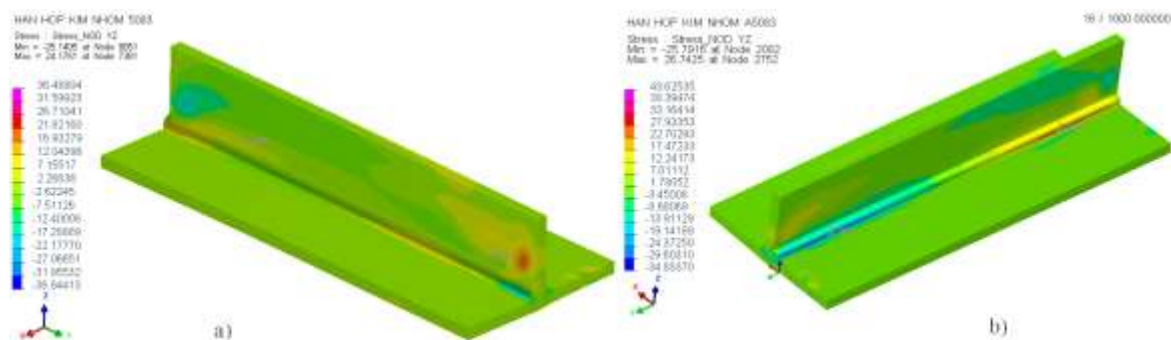
Sự phân bố ứng suất pháp theo phương Z được thể hiện trên hình 4.32, nhận thấy rằng ứng suất dư kéo và nén trong liên kết hàn có giá trị tương đối gần nhau.

### 3. Ứng suất tiếp

Hình 4.33 là sự phân bố ứng suất tiếp theo phương X, ta thấy rằng sau thời gian mô phỏng hàn (1000s) ứng suất dư (kéo và nén) có giá trị tương đối thấp (ứng suất dư kéo là 110,5MPa, ứng suất dư nén là 99,8 MPa).

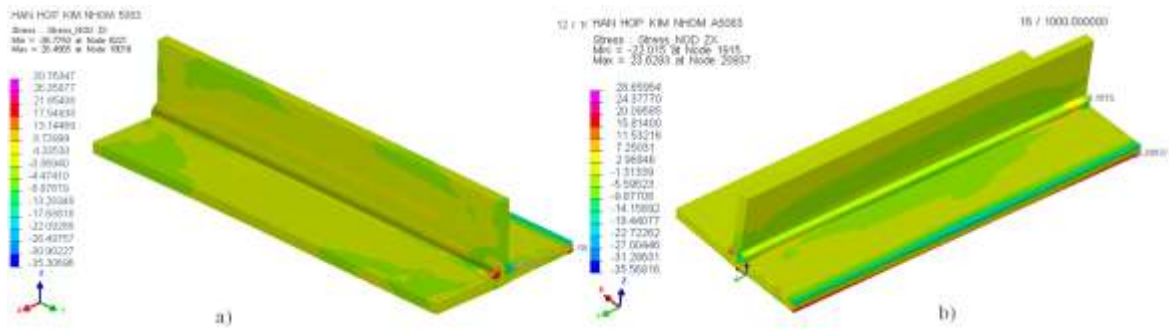


Hình 4.33 Phân bố ứng suất tiếp theo phương X



Hình 4.34 Phân bố ứng suất dư dọc đường hàn theo Y

Sự phân bố ứng suất tiếp theo phương Y được thể hiện trên Hình 4.34, dựa vào phổ màu ta nhận thấy ứng suất dư phân bố dọc trục đường hàn (kéo  $\approx 43,6$ MPa và nén  $\approx 34,8$ MPa). Với giá trị ứng suất dư trong liên kết hàn như mô phỏng thì không thể phá hủy liên kết.



Hình 4. 35 Phân bố ứng suất dư theo phương Z

Hình 4. 35 thể hiện sự phân bố ứng suất tiếp theo phương Z sau thời gian 1000s, ứng suất dư kéo và nén tại vùng mối hàn và vùng HAZ tương đối nhỏ so với giới hạn bền chảy của hợp kim nhôm A5083.

#### **Kết luận chương 4:**

Thông qua mô phỏng số tác giả đã:

- Mô hình hóa và mô phỏng số trường nhiệt độ của liên kết hàn hàn góc chữ T hợp kim nhôm A5083 bằng phần mềm SYSWELD. Đồng thời có thể biết chính xác nhiệt độ tại một điểm (node) trên mô hình mô phỏng; và có thể xuất ra chu trình nhiệt tại node đó;

- Dự đoán được sự phân bố ứng suất dư sau hàn, ứng suất dư cục bộ phân bố trong liên kết hàn. Để từ đó có thể thay đổi thông số chế độ hàn, điều kiện biên (gá kẹp, trình tự thực hiện các đường, lớp hàn,..) nhằm mục đích giảm ứng suất dư và biến dạng hàn;

- Dự đoán và đánh giá được mức độ biến dạng của liên kết hàn theo các phương X, Y, Z,... Có thể dự đoán được ảnh hưởng của thông số chế độ hàn đến phương và chiều biến dạng của tấm hàn.

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT NAM ĐỊNH

## KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

### 1. Kết luận:

Qua việc ứng dụng phần mềm SYSWELD để mô phỏng trường nhiệt độ, ứng suất và biến dạng liên kết hàn góc chữ T hợp kim nhôm A5083 có chiều dày 8mm bằng phương pháp hàn MIG.

Trong luận văn này tác giả đã nghiên cứu tổng quan về công nghệ hàn MIG khi hàn nhôm và hợp kim nhôm. Đồng thời tác giả cũng nghiên cứu các phương pháp hàn nhôm và hợp kim nhôm.

Tác giả đã nghiên cứu công nghệ và quá trình luyện kim trong hàn nhôm và hợp kim nhôm.

Cũng trong luận văn này tác giả đã nghiên cứu các vấn đề về nhiệt và truyền nhiệt trong các quá trình hàn và truyền nhiệt trong hàn tấm mỏng.

Qua mô phỏng tác giả đã đánh giá được sự phân bố nhiệt độ khi hàn liên kết góc chữ T, hợp kim nhôm A5083. Từ đó, có các cơ sở dữ liệu về trường nhiệt để có thể làm các nghiên cứu chuyên sâu.

Tác giả đã so sánh được mức độ biến dạng giữa thực nghiệm và mô phỏng khi hàn liên kết góc chữ T, hợp kim nhôm A5083. Từ cơ sở này, tác giả có thể khuyến cáo các công ty sản xuất có liên quan đến vật liệu nhôm và hợp kim nhôm trình tự hàn, công nghệ hàn phù hợp với điều kiện sản xuất tại Việt Nam. Đồng thời có thể sử dụng các phương tiện, thiết bị khử ứng suất dư tại các vị trí tập trung ứng suất lớn nhất trong kết cấu.

### 2. Kiến nghị:

Do thời gian thực hiện đề tài có hạn, kiến thức và kinh nghiệm thực tế còn hạn chế vì vậy nên sẽ không tránh khỏi thiết sót. Rất mong sự đóng góp của các Thầy, Cô và các bạn đồng nghiệp.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### Tiếng Việt:

- [1]. TS Ngô Lê Thông, Công nghệ Hàn nóng chảy (tập I, II), Nhà xuất bản Bách khoa – Hà Nội, 2007.
- [2]. Vũ Đình Toại, luận án tiến sĩ kỹ thuật, Hà Nội, 2014
- [3]. Nguyễn Văn Thông, Vật liệu và công nghệ hàn, Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật – Hà nội, 2004
- [4]. Vũ Huy Lân, Vật liệu hàn, Nhà xuất bản Bách khoa – Hà Nội, 2015.
- [5]. Trần Ích Thịnh (2007), Phương pháp phần tử hữu hạn, NXB KHKT, Hà Nội.
- [6]. TS Nguyễn Tiến Dương, Mô phỏng quá trình truyền nhiệt trong hàn – Hà Nội, 2008.

### Tiếng nước ngoài:

- [7]. Nguyen The Ninh, Thermal Analysis of Welds, ETRS Pty Ltd, HRL Services Mulgrave, Australia
- [8]. ESI Group, 99 Rue Des, Solets Silic 112 94513 Rungis Cedex FRANCE.
- [9]. Sindo Kou, Welding Metallurgy, Second Edition – Copy right 2003.
- [10]. Kumar, S.(2010) Experimental investigation on pulsed TIG welding of aluminium plate. Advanced Engineering Technology.1 (2), 200-211
- [11]. Indira Rani, M., & Marpu, R. N.(2012). Effect of Pulsed Current Tig Welding Parameters on Mechanical Properties of J-Joint Strength of Aa6351. The International Journal of Engineering And Science (IJES),1(1), 1-5.
- [12]. Gene Mathers ,The welding of aluminium and its alloys, Published by Woodhead Publishing Limited, Abington Hall, Abington Cambridge CB1 6AH, England
- [13]. Lincoln Electric. 1994. The Procedure Handbook of Arc Welding. Cleveland: Lincoln Electric.
- [14]. Naidu D.S, Moore K.L., Yender R., Tyler J., 1997. Gas metal arc welding control: Part 1- modeling and analysis. Nonlinear Analysis, Methods and Applications.
- [15]. J. Goldak, M. Bibby, J. Moore and B. Patel, (1996) Computer Modling of Heat Flow in Welds
- [16]. AWS D1.2/D1.2M (2006), Structural Welding Code – Steel.
- [17]. M.St. Wêglowski, Y. Huang, Y.M. Zhang, Effect of welding current on metal transfer in GMAW, Archives of Materials Science and Engineering, 2008,
- [18]. Klas Weman (2003), welding Processes handbook, Woodhead Pulishing limited.

- [19]. Kobelco Welding Handbook – Kobe Steel LTD., Japan 2009.
- [20]. R.L.O'Brien, Welding Handbook, Volume 2 welding Processes, American Welding Society, 1998.
- [21]. Tham khảo các trang Web về hợp kim nhôm và dây hàn nhôm sử dụng phù hợp với từng loại vật liệu cơ bản.

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT NAM ĐỊNH