

VÀNH HƯỞNG CỦA TẦN SỐ QUÁ TRÌNH NUNG CẨM ỨNG ĐẾN TRẠNG THÁI BÁN LỎNG CỦA PHÔI HỆ HỢP KIM NHÔM TRONG CÔNG NGHỆ TẠO HÌNH THIXOFORMING

THE EFFECTS OF HEATING FREQUENCY OF INDUCTION HEATING
PROCESS TO ALUMINIUM ALLOY'S SEMISOLID STATE
IN THIXOFORMING PROCESS

Nguyễn Vinh Dự¹, Lưu Phương Minh²

¹Trung tâm Nghiên cứu và Chuyển giao Công nghệ TP. Hồ Chí Minh

²Trường Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh

TÓM TẮT

Trong kỹ thuật tạo hình vật liệu theo công nghệ Thixoforming, thì phôi ban đầu phải được gia nhiệt trước khi tạo hình đến trạng thái bán lỏng sao cho nhiệt độ được phân bố đồng đều trên toàn bộ thể tích của phôi nung, các cấu trúc tinh thể có dạng cầu và có được tỉ lệ pha rắn theo mong muốn. Trong quá trình nung cảm ứng thì một số hiện tượng vật lý sẽ làm ảnh hưởng đến tính chất bán lỏng của phôi. Trong bài báo này, nhóm tác giả sử dụng phương pháp số với lý thuyết truyền nhiệt, kết hợp với phương pháp mô phỏng bằng phần mềm Comsol trong nhiều dải tần số nung trung bình khác nhau để đánh giá ảnh hưởng tần số nung để từ đó đề xuất tần số nung thích hợp cho quá trình nung cảm ứng, áp dụng cho quá trình tạo hình vật liệu ở trạng thái bán lỏng theo công nghệ Thixoforming, đồng thời để làm cơ sở cho việc phát triển, thương mại hóa công nghệ này ở quy mô công nghiệp.

Từ khóa: Kỹ thuật thixoforming, nung cảm ứng, tần số nung, tỉ lệ pha rắn-lỏng, phương pháp số, phương pháp mô phỏng Comsol.

ABSTRACT

Thixoforming technique requires casting metal alloys when they are partial liquid and partial solid before the material flow into the die cavity under pressure, the temperature distribution must be uniform within the billet at the end of heating, in order to obtain a good microstructure. In induction heating process, some physical phenomena cause effects to the characteristics of partially liquid billets. In this paper, the integrated method, combining the Comsol software simulating method and theoretical heat transfer methods for range medium frequency is proposed to determine the effects of heating frequency to induction heating process in order to apply thixoforming technique in industry.

Keywords: Thixoforming technique, induction heating, heating medium frequency, practical methods, the Comsol software simulating method.

1. GIỚI THIỆU

Kỹ thuật tạo hình vật liệu ở trạng thái bán lỏng có hai hướng công nghệ: Rheoforming và thixoforming. Khác với phương pháp rheo là di từ trạng thái lỏng xuống trạng thái bán lỏng, phương pháp thixo di từ trạng thái rắn đến bán lỏng. Kỹ thuật tạo hình theo thixo đòi hỏi phôi ban đầu phải được nung trước nhằm tạo ra một cấu trúc tốt với tỉ lệ phần trăm lỏng khoảng 40-50% - đây là một trong những điều kiện quan trọng để tạo ra những tính chất ưu việt của sản phẩm so với các kỹ thuật tạo hình khác. Nhiệt độ nung phải được kiểm soát một cách chính xác nhằm đạt đến sự đồng đều về nhiệt độ trên toàn bộ vật liệu. Trong phạm vi của bài báo này, nhóm tác giả sử dụng phương pháp gia nhiệt ban đầu cho phôi là phương pháp nung cảm ứng, do phương pháp này, được sử dụng phổ biến rộng rãi trong sản xuất bởi vì phôi không tiếp xúc trực tiếp với nguồn nhiệt, sạch, thời gian nung nhanh và nguồn năng lượng dầu vào được kiểm soát dễ dàng. Tuy nhiên, phương pháp nung cảm ứng này có nhược điểm tồn tại là khả năng phân bố nhiệt độ trên vật liệu không đồng đều nguyên nhân do các hiện tượng vật lý - hiệu ứng bể mặt, hiệu ứng dầu cuối xảy ra trong quá trình nung, mà trong đó hiệu ứng bể mặt là một trong những yếu tố ảnh hưởng đến quá trình nung và cụ thể là tần số nung, nếu nung ở tần số cao sẽ xảy ra hiện tượng chân voi, nếu nung ở tần số thấp thì thời gian nung sẽ lâu làm ảnh hưởng đến năng suất của quá trình tạo hình vật liệu.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

Trong phạm vi nghiên cứu này, nhóm tác giả đã khảo sát nhiều phương pháp nung của nhiều nhóm tác giả khác nhau trên thế giới: Phương pháp thực nghiệm nung từng bước để quy hoạch thực nghiệm thông số nung cần thiết,... và nhóm đề xuất riêng cho mình phương pháp nung hợp lý để vừa tiết kiệm về mặt thời

gian và trên hết là đảm bảo độ đồng đều tốt nhất về nhiệt độ trên phôi nung, đó là sử dụng phương pháp nung và làm nguội đồng thời và điều chỉnh tần số thay đổi từ 21-24KHz để khảo sát sự ảnh hưởng của tần số đến phân bố nhiệt độ giữa tâm và bề mặt phôi.

Phương pháp nung và làm nguội trên dựa vào cơ sở lý thuyết sau:

Quá trình gia nhiệt được diễn tả bằng phương trình:

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(k(T)r\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) + S(r,z,t) \quad (1)$$

Ở đây:

$S(r, t)$ là nguồn nhiệt bên trong;

ρ : Trọng lượng riêng;

C_p : Nhiệt dung riêng;

k : Độ dẫn nhiệt.

Đối với những vật liệu kim loại, chiều sâu xác định được diễn tả phụ thuộc vào độ dẫn nhiệt, độ thẩm thấu của vật liệu và tần số của dòng điện:

$$\delta = 503.3 \sqrt{\frac{x}{\mu_r f}} \quad (2)$$

Đối với hợp kim nhôm và đồng thì $\mu_r \approx 1$, độ dẫn nhiệt x tỷ lệ thuận với nhiệt độ; đối với hợp kim nhôm A356 thì $x = 3.89 \times 10^{-8} + 1.53 \times 10^{-10}T$ ($\Omega \cdot m$)

Hàm sai số:

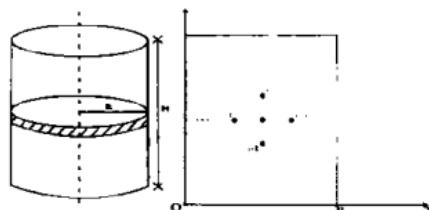
$$E[G, q] = \frac{1}{2} \int_0^R \int_0^{H_0} [T(r, z, t) - T_E(r, z)]^2 dr dz + \frac{1}{2} \int_0^{H_0} [G^2(t) dt + \frac{1}{2} \int_0^{H_0} q^2(t) dt] \quad (3)$$

3. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

3.1. Mô hình vật lý

Một billet hình trụ hợp kim nhôm có bán kính R được đặt theo phương thẳng đứng

trong các cuộn dây cảm ứng như hình 1. Nguồn điện bên trong được tạo ra nhờ sự cảm ứng điện từ. Để nhận được tỷ lệ pha lồng/ pha rắn đồng đều và độ nhót tốt, nhiệt độ thanh billet nên giữ từ 575-585°C khi kết thúc quá trình gia nhiệt.



Hình 1. Mô hình vật lý bài toán dẫn nhiệt không ổn định 2 chiều

❖ Sử dụng phương pháp số để giải quyết bài toán tối ưu:

- Đặt giả thuyết ban đầu: $\begin{cases} G^0 = G_0(t) \\ q^0 = q_0(t) \end{cases}$ ứng với $k = 0$
- Giải bài toán trực tiếp để xác định T^k ứng với $\begin{cases} G^k \\ q^k \end{cases}$ từ phương trình truyền nhiệt và các điều kiện biên bằng phương pháp sai phân hữu hạn.
- Xác định hiệu số $T^k(r, z, t_f) - T_E$
- Giải bài toán tiệm cận và các điều kiện biên bằng phương pháp sai phân hữu hạn để xác định \bar{T}_1^k và \bar{T}_2^k và $\bar{T}_1^k = \bar{T}_2^k$
- Xác định giá trị Gradient của hàm sai số:

$$\begin{cases} \nabla E^k(G) \\ \nabla E^k(q) \end{cases}$$
- Tính giá trị P_1^k và P_2^k
- Giải bài toán độ nhạy và các điều kiện biên với

$$\begin{cases} \Delta G = P_1^k \\ \Delta q = P_2^k \end{math}$$
bằng phương pháp sai phân hữu hạn để xác định \tilde{T}_1^k và \tilde{T}_2^k

- Tính kích thước bước α_1^k và α_2^k
- Tính tiếp tục cho $\begin{cases} G^{k+1} = G^k + \alpha_1^k \cdot P_1^k \\ q^{k+1} = q^k + \alpha_2^k \cdot P_2^k \end{cases}$
- Tăng $k = k+1$, trả lại bước 2 cho tới khi $T^k < \varepsilon$.

Để việc tính toán được trôi chảy nhanh chóng và chính xác; Việc tính toán vòng lặp theo phương pháp CGM đây là một phương pháp lặp dùng trong giải các bài toán tối ưu, thực nghiệm dựa trên cơ sở phương pháp Gradient tìm kiếm cực trị, phương pháp này được ứng dụng bởi vì nó không chỉ có tính hiệu quả cao mà còn do đặc trưng tự hiệu chỉnh của bản thân phương pháp. Đối với thuật toán lặp, việc xác định hướng và kích thước của bước là công việc quan trọng nhất. Về phương chiều thì nó liên quan đến gradient của hàm sai số E. Còn việc tối ưu hóa kích thước của bước xác định được bằng cách giải bài toán độ nhạy và giải bài toán truyền nhiệt được lập trình trên phần mềm Matlab.

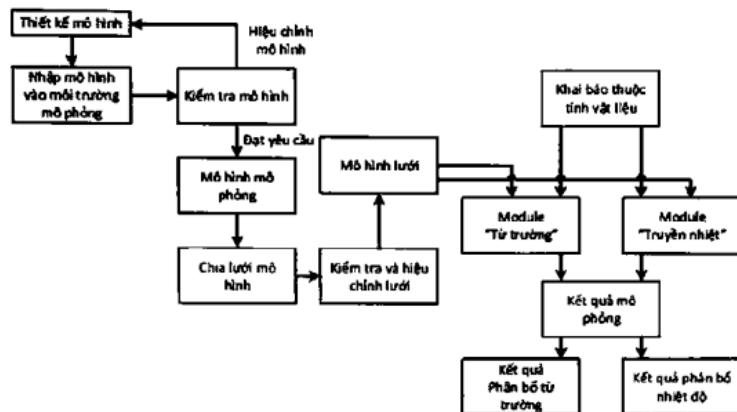
3.2. Sử dụng phương pháp mô phỏng bằng phần mềm Comsol để giải quyết bài toán

Comsol Multiphysics là một trong những phần mềm nổi tiếng trong lĩnh vực mô phỏng đa vật lý. Với khả năng liên kết các dạng bài toán mô phỏng khác nhau, Comsol có khả năng ứng dụng trong các lĩnh vực như: Điện – từ trường, cơ khí, nhiệt, lưu chất và hóa học.

Với khả năng mô phỏng như trên, Comsol đặc biệt thích hợp trong các nghiên cứu chuyên sâu, giúp các nghiên cứu này tiết kiệm chi phí cũng như thời gian thử sai.

❖ Các bước thực hiện trên phần mềm Comsol:

Trong nghiên cứu này, module truyền nhiệt và từ trường sẽ được ứng dụng nhằm mô phỏng quá trình gia nhiệt bằng từ trường có tần số cao cho vật đúc. Qui trình mô phỏng được trình bày như hình 2.



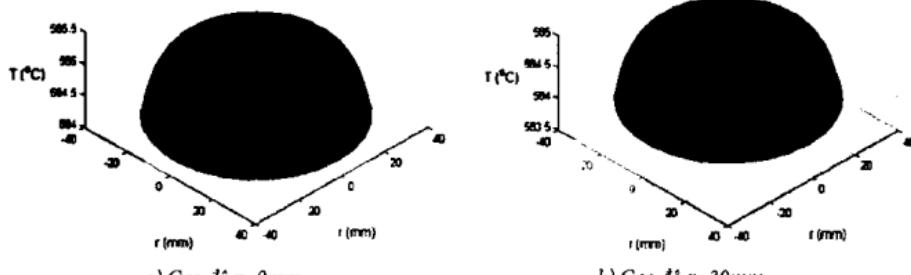
Hình 2. Quy trình mô phỏng gia nhiệt bằng từ trường trong phần mềm Comsol

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

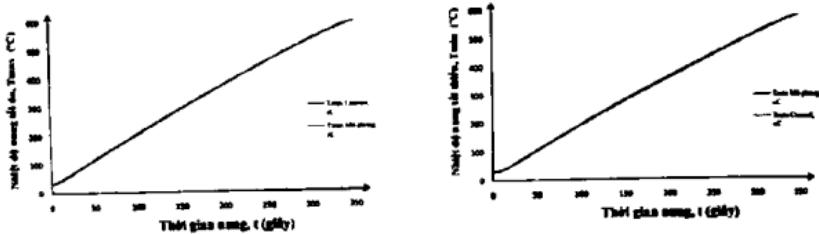
Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả sẽ thay đổi tần số nung, cụ thể là sẽ khảo sát độ chênh nhiệt độ giữa tâm và bề mặt phôi nung khi ta đạt tần số nung $f_1 = 21 \text{ KHz}$; $f_2 = 22 \text{ KHz}$; $f_3 = 23 \text{ KHz}$, $f_4 = 24 \text{ KHz}$.

Mục đích của việc thay đổi tần số này là xác định ảnh hưởng của tần số nung trong quá trình nung cảm ứng hệ hợp kim nhôm trong khoảng tần số nung trung bình, cụ thể là trong thí nghiệm này, nhóm tác giả nung phôi tại 4 điểm tần số là 21 KHz, 22 KHz, 23 KHz và 24KHz và trong điểm tần số này, nhóm tác giả sẽ khảo sát độ chênh nhiệt độ giữa điểm có nhiệt độ cao nhất và điểm có nhiệt độ thấp nhất.

- ❖ Khi $f_1 = 21 \text{ KHz}$, đồ thị biểu hiện độ chênh nhiệt độ như sau:



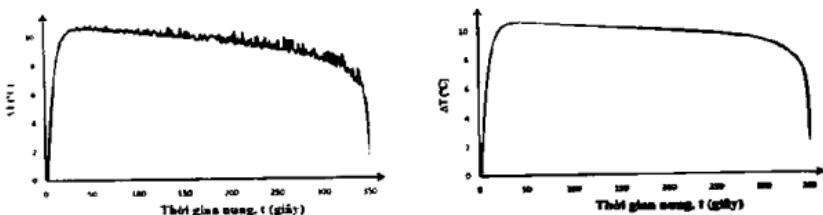
Hình 3. Mô hình 3D phân bố nhiệt độ tại các cao độ khác nhau



a) Thời gian tối đa

Hình 4. Đồ thị quan hệ giữa nhiệt độ nung và thời gian khi mô phỏng

b) Thời gian tối thiểu

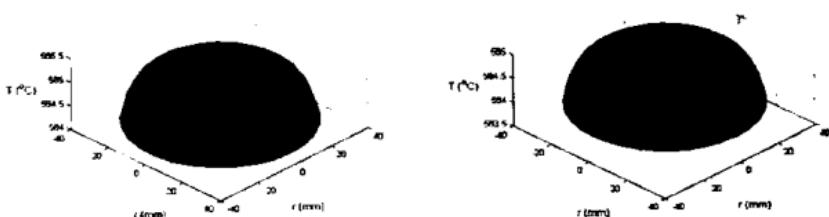


a) Mô phỏng Comsol

Hình 5. Đồ thị quan hệ giữa độ chênh nhiệt độ và thời gian khi mô phỏng

b) Mô phỏng số

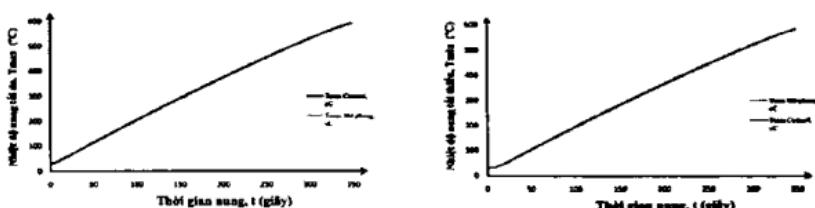
❖ Khi $f_2 = 22$ KHz, đồ thị biểu hiện độ chênh nhiệt độ như sau:



a) Cao độ z=0mm

Hình 6. Mật cắt 3D phân bố nhiệt độ tại các cao độ khác nhau

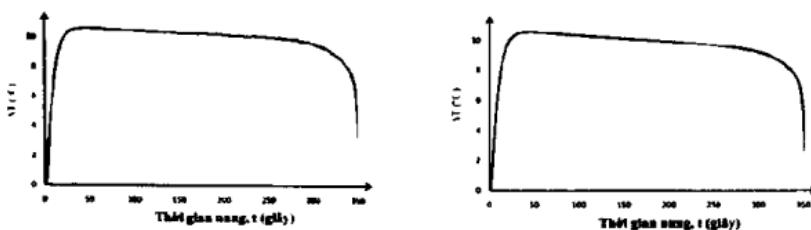
b) Cao độ z=30mm



a) Thời gian tối đa

Hình 7. Đồ thị quan hệ giữa nhiệt độ nung và thời gian khi mô phỏng

b) Thời gian tối thiểu

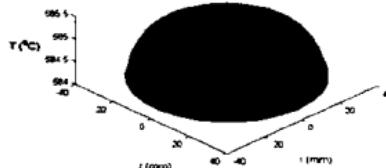


a) Mô phỏng Comsol

b) Mô phỏng số

Hình 8. Đồ thị quan hệ giữa độ chênh nhiệt độ và thời gian khi mở phỏng

❖ Khi $f_3 = 23$ KHz, đồ thị biểu hiện độ chênh nhiệt độ như sau:

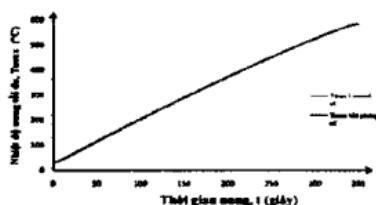


a) Cao độ z=0mm



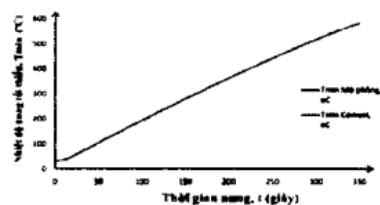
b) Cao độ z=30mm

Hình 9. Mặt cắt 3D phân bố nhiệt độ tại các cao độ khác nhau

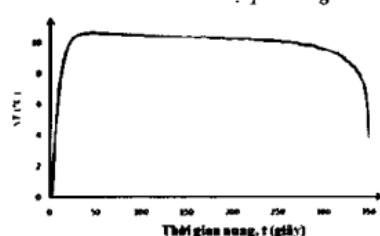


a) Thời gian tối đa

Hình 10. Đồ thị quan hệ giữa nhiệt độ nung và thời gian khi mở phỏng

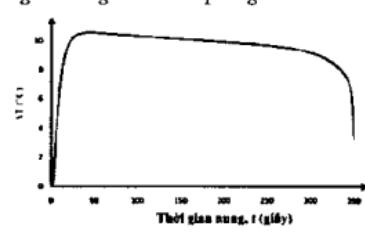


b) Thời gian tối thiểu



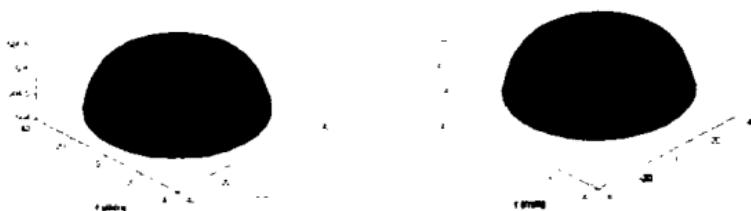
a) Mô phỏng Comsol

Hình 11. Đồ thị quan hệ giữa độ chênh nhiệt độ và thời gian khi mở phỏng



b) Mô phỏng số

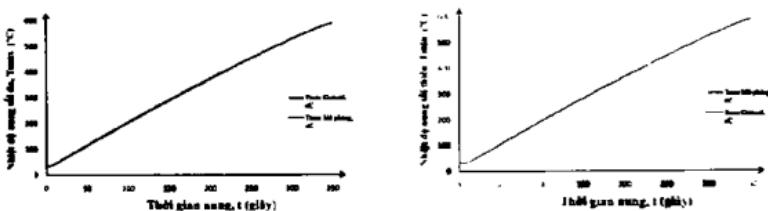
- Khi $f_1 = 24 \text{ KHz}$, đồ thị biểu hiện độ chênh nhiệt độ như sau:



a) Cao độ z=0mm

b) Cao độ z=30mm

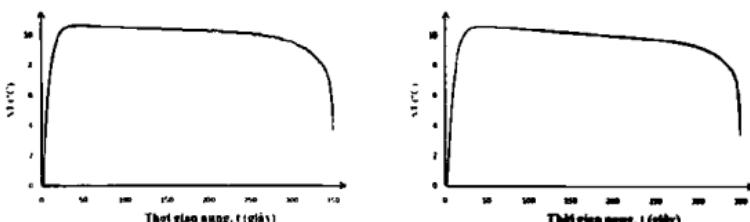
Hình 12. Mật cắt 3D phân bố nhiệt độ tại các cao độ khác nhau



a) Thời gian tối đa

b) Thời gian tối thiểu

Hình 13. Đồ thị quan hệ giữa nhiệt độ nung và thời gian khi mô phỏng



a) Mô phỏng Comsol

b) Mô phỏng số

Hình 14. Đồ thị quan hệ giữa độ chênh nhiệt độ và thời gian khi mô phỏng

Khi thay đổi tần số nung tương ứng trong khoảng từ 21 KHz đến 24KHz, kết quả đồ thị cho thấy khoảng chênh nhiệt độ những tâm và bể mặt phôi không lớn (khoảng 4°C), với khoảng chênh nhiệt độ này đảm bảo cho tỉ lệ phần trăm pha rắn và pha lỏng gần bằng nhau và bằng khoảng 50%.

Do trong quá trình nung cảm ứng cũng sẽ xuất hiện hiện tượng hiệu ứng bế mặt. Vì hiệu ứng này, khoảng 86% năng lượng sẽ tập trung trên lớp bể mặt của cuộn dây dẫn và phôi. Lớp này được gọi là độ thẩm sâu δ . Mức độ hiệu ứng bế mặt phụ thuộc vào các đặc tính tần số và vật liệu (diện trở suất ρ và độ từ thẩm tương đối μ_r) của dây dẫn. Khi tần số nung cao hoặc khi nung phôi với bán kính tương đối lớn thì hiệu ứng bế mặt sẽ xuất hiện càng rõ ràng.

Từ công thức (2) ta thấy, giá trị của độ thẩm sâu thay đổi với căn bậc hai của điện trở suất và tỷ lệ nghịch với căn bậc hai của tần số và độ từ thẩm tương đối. Về mặt toán học, độ thẩm sâu δ là khoảng cách từ bề mặt của cuộn dây dẫn vào tới lõi của nó mà dòng điện giảm theo cấp số nhân " $1/e$ " giá trị của nó ở bề mặt.

Từ công thức (2) nhận thấy rằng độ thẩm sâu có giá trị khác nhau với các loại vật liệu và là một hàm theo tần số. Độ thẩm từ μ của vật liệu phi từ tính là tương đương với không khí và được chỉ định một giá trị là 1.

5. KẾT LUẬN

Khi nung vật liệu bằng hợp kim Nhôm bằng thiết bị nung cảm ứng có tần số nung từ 21KHz – 24KHz – Khoảng tần số nung trung bình, thì độ đồng đều về nhiệt độ trên toàn bộ thể tích của vật nung không bị ảnh hưởng bởi tần số nung của thiết bị.

Trong nung cảm ứng, giá trị của mật độ dòng điện tối đa là ở trên bề mặt của chi tiết và sẽ giảm một cách nhanh chóng khi nó đi sâu vào bên trong tâm. Hiện tượng này, được gọi là hiệu ứng bề mặt. Do hiệu ứng bề mặt nên nên hầu hết nhiệt lượng đều tập trung lên bề mặt của chi tiết. Khoảng 86% nhiệt lượng được tập trung ở lớp bề mặt và được gọi là chiều sâu thẩm, chiều sâu này sẽ giảm khi tần số tăng. Nhằm đạt tối đa hiệu suất dòng điện và tối thiểu lực từ trường, thì các thiết bị nung hiện nay đều được thương mại hóa trong khoảng tần số từ 15-30Khz, với khoảng tần số này sẽ cho phép kết nối nhiều hệ thống lò nung lại với nhau.

Các thiết bị thương mại thường hoạt động ở tần số 15KHz - 30KHz – Đây là tần số nung trung bình, ở khoảng tần số nung này tác động của dòng điện là lớn nhất và các lực điện tử nhỏ nhất. Vì thế tần số cũng làm cho hệ thống cứng rắn hơn. Sự phân bố nhiệt độ không đồng đều dọc theo bán kính của vật liệu được gọi là độ gián nhiệt từ bề mặt đến tâm. Trong khoảng tần số nung này, độ đồng đều về nhiệt độ của phôi trong quá trình nung được đảm bảo hay nói cách khác tần số nung trung bình không ảnh hưởng đến độ đồng đều về nhiệt độ trong toàn bộ thể tích của vật nung.♦

Ngày nhận bài: 25/02/2016

Ngày phản biện: 15/3/2016

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Midson S and Brissing K 1997 Semi-solid casting of aluminum alloys: a status report, *Modern Casting* 41-3.
- [2]. Midson S, Rudnev V and Gallik R 1999 Semi-solid processing of aluminum alloys *Industrial Heating* 37-41.
- [3]. Jung H K and Kang C G 2002 Induction heating process of an Al-Si aluminum alloy for semi-solid die casting and its resulting microstructure *Journal of Materials Processing Technology* 120 355-64.
- [4]. Ono Y, Zheng C Q, Hamel F G, Charron R and Loong C A 2002 Experimental investigation on monitoring and control of induction heating process for semi-solid alloys using the heating coil as sensor *Measurement Science and Technology* 13 1359-65.
- [5]. Ko D-C, Min G-S, Kim B-M and Choi J-C 2000 Finite element analysis for the semi-solid state forming of aluminum alloy considering induction heating *Journal of Materials Processing Technology* 100 95-104.