

MÔ PHỎNG SỐ TRƯỜNG NHIỆT ĐỘ CỦA HỢP KIM A356 TRONG QUÁ TRÌNH ĐÔNG ĐẶC BẰNG PHƯƠNG PHÁP PHẦN TỬ HỮU HẠN (FEM)

Nguyễn Hồng Hải¹, Phạm Quang², Chu Văn Bền³

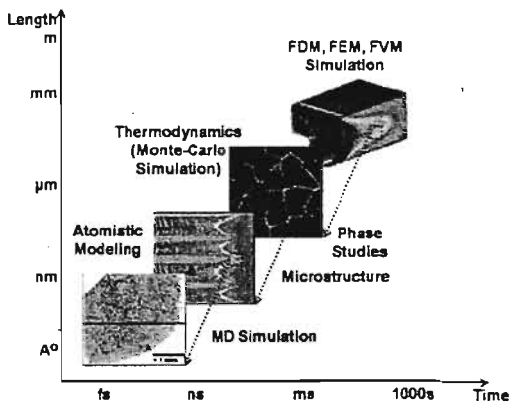
^{1, 2, 3} Trường ĐHBK Hà Nội, số 1 Đại Cồ Việt Hà Nội

Email: nhhai@mail.hut.edu.vn

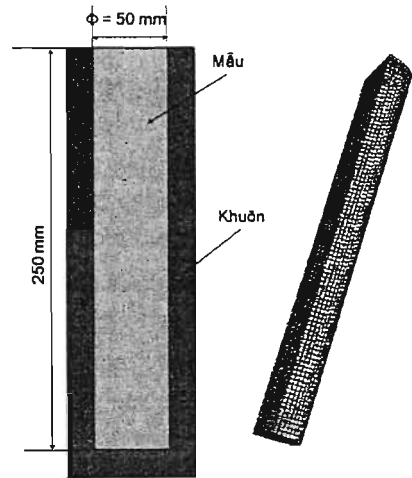
Tóm tắt. Trong công nghệ đúc, đặc biệt là trong công nghệ đúc bán lỏng, việc khống chế nhiệt độ là hết sức quan trọng để đảm bảo vật đúc đạt được cơ tính tốt nhất. Do đó việc xác định nhiệt độ, tốc độ nguội và tốc độ đông đặc là hết sức cần thiết. Việc mô phỏng số cho phép ta xác định những thông số cơ bản của quá trình đông đặc như trường nhiệt độ, đường nguội của kim loại trong quá trình đông đặc, tốc độ nguội, tỷ phần pha lỏng, từ đó có thể tính ra tỷ phần pha rắn ($f_s = 1 - f_l$) và tốc độ đông đặc (df/dt hoặc df/dT).

I. GIỚI THIỆU

Đông đặc là một môn khoa học liên ngành, bao gồm khoa học vật liệu và luyện kim, nhiệt động học, cơ học chất rắn và chất lỏng, truyền nhiệt, chuyển chất và các bộ môn khác [1-7]. Hiện tượng đông đặc và nóng chảy liên quan đến vấn đề “biên chuyển động” mà ở đó vị trí của biên phải được xác định như hàm của thời gian và không gian.



Hình 1. Các mức mô phỏng quá trình đông đặc



Hình 2. Mô hình hệ khuôn – mẫu và chia lưới trong mô phỏng số

Trước đây các phương pháp giải tích [8] gần như là khả năng duy nhất để mô tả các vấn đề có liên quan tới biên chuyển động, song do một số hạn chế chúng chỉ có thể giải được các bài toán một chiều trong không gian vô hạn hoặc bán vô hạn, với những điều kiện biên đơn giản và các tính chất nhiệt lý không thay đổi (khá xa với thực tế). Từ khi các máy tính tốc độ cao xuất hiện, mô hình hóa và mô phỏng số [9-11] đã trở thành một cách tiếp cận nhanh nhất với các quá trình thực tế có liên quan tới biên chuyển động. Điều này giải thích vì sao mô hình hóa và mô phỏng số quá trình đông đặc đang trở thành một lĩnh vực phát triển nhanh chóng và các nghiên cứu về vấn đề này ngày càng tăng. Theo kích thước việc mô hình hóa và mô phỏng số quá trình đông đặc được thực hiện ở các mức từ vi mô đến vĩ mô được trình bày trên hình 1.

II. MÔ HÌNH HÓA VÀ MÔ PHÒNG SỐ

Mô hình toán của quá trình truyền nhiệt

Mô hình toán quá trình truyền nhiệt của kim loại trong quá trình đông đặc gồm 3 thành phần: i) phương trình năng lượng cơ bản, thường là phương trình dẫn nhiệt Fourier, ii) các điều kiện biên, thường là sự phối hợp giữa phương trình dẫn nhiệt Fourier, phương trình truyền nhiệt bằng đối lưu Newton và phương trình bức xạ nhiệt Stefan-Boltzmann và iii) các điều kiện ban đầu ($t = 0$).

$$i) \quad q = -\lambda \cdot \text{grad}T \quad (1)$$

$$ii) \quad q_b = \alpha_e (T_b - T_{m})$$

$$iii) \quad q_0 = \sigma T_0^4$$

Phương trình năng lượng cơ bản của quá trình truyền nhiệt trong khối kim loại đang đông đặc là phương trình dẫn nhiệt Fourier được viết dưới dạng sai phân hoặc tích phân [12]:

$$C_0 \rho_0 \left[\frac{\partial T(X,t)}{\partial t} \right] = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda_0 \frac{\partial T(X,t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda_0 \frac{\partial T(X,t)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_0 \frac{\partial T(X,t)}{\partial z} \right] \quad (2)$$

Hay:

$$C_0 \rho_0 \left[\frac{\partial T(X,t)}{\partial t} \right] = \text{div}(\lambda \text{grad}T) \quad (3)$$

Các điều kiện biên là điều kiện giới hạn tại biên của vật thể được tạo nên bởi quy luật phân bố nhiệt độ. Các điều kiện biên mô tả quá trình trao đổi nhiệt xảy ra trên biên. Trong các bài toán truyền nhiệt nhìn chung có 5 loại điều kiện biên (loại 1, 2, 3, 4 và 5) [13]

Điều kiện ban đầu cho biết phân bố nhiệt độ trong vật tại thời điểm ban đầu $t = 0$. Khi $t = 0$ ta có $T = (x, y, z, 0)$.

Mô hình toán nói trên có thể giải bằng các phương pháp mô phỏng số, mà trong các bài toán truyền nhiệt thì các phương pháp mô phỏng số thường được sử dụng nhất là *Phân tử hữu hạn* (FEM) hoặc *Sai phân hữu hạn* (FDM). Hiện nay rất nhiều phần mềm mô phỏng quá trình truyền nhiệt như ANSYS, ABAQUS, MAGMA, FLUENT, Z-Cast v.v. Trong bài báo này phần mềm Fluent [14] được sử dụng vào việc mô phỏng số quá trình đông đặc của hợp kim nhôm A356. Quá trình xây dựng mô hình hình học của hệ vật đúc và khuôn cũng như chia lưới được thực hiện trên chương trình chuyên dụng GAMBIT [15].

Chương trình Fluent

Fluent là một chương trình mô phỏng 2D & 3D được phát triển bởi công ty Fluent.Inc. Đây là một chương trình mô phỏng rất mạnh, được sử dụng nhiều trong nghiên cứu, sản xuất cũng như phục vụ cho giảng dạy ở các trường đại học lớn trên thế giới. Chương trình Fluent đặc biệt thích hợp cho những nơi mà điều kiện vật chất phục vụ cho việc tiến hành thực nghiệm còn hạn chế. Một điểm mạnh nữa của Fluent là hỗ trợ nhiều dạng dữ liệu nhập vào từ nhiều nguồn chương trình CAD khác nhau: GAMBIT, ANSYS, NASTRAN, PATRAN, Turbo GRID, Pro-Engineer..., điều này làm tăng tính tương thích của chương trình. Mặt khác, giao diện của chương trình là giao diện đồ họa nên việc sử dụng cũng dễ dàng hơn với các chương trình sử dụng giao diện dòng lệnh (Text command). Kết quả chương trình xuất ra cũng khá trực quan và có thể sử dụng trực tiếp được không cần phải qua công đoạn xử lý.

Fluent sử dụng kỹ thuật enthalpy-porosity để mô hình hoá quá trình nóng chảy/đông đặc. Trong kỹ thuật này, tỷ phần chất lỏng (từ đó tính ra tỷ phần pha rắn) được tính tại mỗi bước lặp, dựa trên cơ sở cân bằng enthalpy. Vùng chao nhuyển là vùng có tỷ phần chất lỏng nằm trong khoảng 0 và 1. Vùng chao nhuyển được mô hình là một rỗ xốp giả vừa phải trong đó độ xốp giảm từ 1 tới 0 khi vật liệu đông đặc. Khi vật liệu đông đặc đầy trong ô, độ rỗ bằng 0 và vì vậy vận tốc cũng giảm tới 0.

Phương trình năng lượng trong Fluent: Fluent sử dụng enthalpy là hàm mục tiêu. Enthalpy của một chất được tính bằng tổng enthalpy nhận biết được, h (và ẩn nhiệt ΔH ; với h_{ref} là enthalpy tham chiếu, T_{ref} nhiệt độ tham chiếu và c_p nhiệt dung riêng đẳng áp

$$H = h + \Delta H \quad (4)$$

$$\text{ở đây } h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (5)$$

Tỷ phần pha lỏng β có thể xác định là:

$$\beta = 0 \text{ nếu } T < T_{solidus} \text{ và } \beta = 1 \text{ nếu } T > T_{liquidus} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} \text{ nếu } T_{solidus} < T < T_{liquidus}$$

Ẩn nhiệt ΔH có thể được viết dưới dạng:

$$\Delta H = \beta L \quad (7)$$

trong đó L là ẩn nhiệt kết tinh của kim loại. Giá trị ẩn nhiệt có thể biến đổi từ 0 (đối với chất rắn) và L (đối với chất lỏng). Trong trường hợp đông đặc của hợp kim đa nguyên, nhiệt độ đường lỏng hay đường rắn được tính theo lý thuyết:

$$T_{solidus} = T_{melt} + \sum_{solute} K_i m_i Y_i \quad (8)$$

$$T_{liquidus} = T_{melt} + \sum_{solute} m_i Y_i \quad (9)$$

ở đây K_i là hệ số phân bố chất tan tại bề mặt, Y_i là tỉ phần khối lượng của chất tan i , m_i là độ cong của bề mặt lỏng đối với Y_i . Với bài toán nóng chảy/đông đặc, phương trình năng lượng được viết là; với H là enthalp, ρ là tỷ trọng, \bar{v} là vận tốc chất lỏng và S là năng lượng nguồn

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho H) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (10)$$

Lời giải với nhiệt độ là lời giải lặp của phương trình năng lượng (10) và phương trình tỷ phần pha lỏng (6). Trong Fluent, phương pháp được đề nghị bởi Voller và Swaminathan được sử dụng để cập nhật tỷ phần pha lỏng.

Trở nhiệt tại biên: Mô hình nóng chảy/đông đặc của Fluent có thể xét tới sự có mặt của khe hở khí giữa thành khuôn và kim loại đang đông đặc, tạo ra trở nhiệt tại biên. Trở nhiệt này xét tới sự giảm độ dẫn nhiệt của chất lỏng gần biên. Vì vậy, dòng nhiệt qua biên được chỉ ra trên hình 5 là:

$$q = \frac{(T - T_w)}{(l/k + R_c(1 - \beta))} \quad (11)$$

ở đây T , T_w , và l được xác định như trên hình 5, k là hệ số dẫn nhiệt của chất lỏng, β là tỷ phần pha lỏng, và R_c là trở nhiệt, có cùng đơn vị với nghịch đảo của hệ số trao đổi nhiệt.

1. Quy trình mô phỏng và thực nghiệm

Mô hình hình học được thiết kế trên phần mềm chuyên dụng GAMBIT, sau khi thiết kế các tệp tin này được nhập vào cho chương trình tính toán. Phần mềm Fluent sẽ chuyển đổi các tệp tin này thành các dữ liệu đầu vào của chương trình. Trong nghiên cứu này, mẫu tính toán được chọn là khối hình trụ có kích thước đường kính là 50 mm và chiều cao là 250 mm. Số lượng các phần tử trong lưới bao gồm 35329 phần tử trong miền và 3710 phần tử biên (hình 2). Việc mô phỏng được tiến hành cho hợp kim A356 có thành phần hoá học được cho trong bảng 1 và các tính chất nhiệt lý được trình bày trên bảng 2 [16]:

Bảng 1. Thành phần hóa học của hợp kim A356

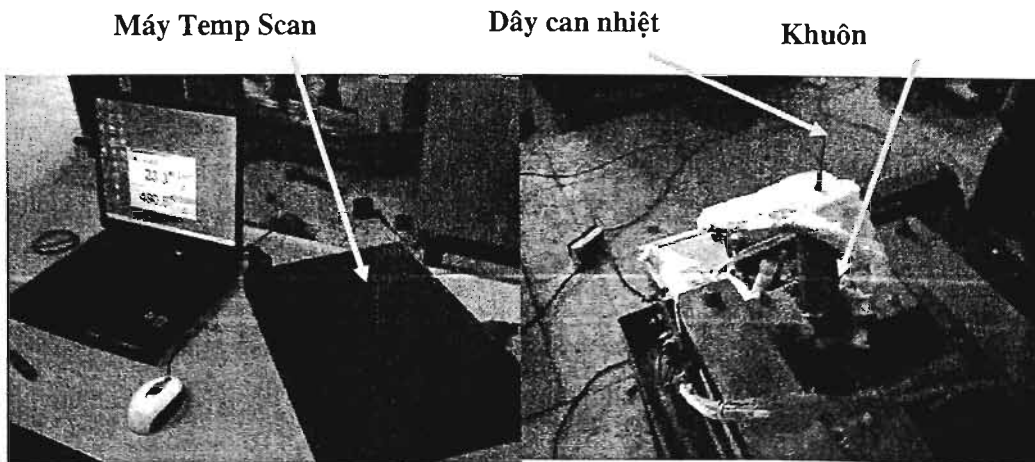
| Nguyên tố | Cu | Mg | Mn | Si | Fe | Zn | Ti |
|-----------|------|-----------|------|---------|------|------|------|
| % | ≤0.2 | 0.25-0.45 | ≤0.1 | 6.5-7.5 | ≤0.2 | ≤0.1 | ≤0.2 |

Bảng 2. Tính chất nhiệt lý của hợp kim A356 và vật liệu làm khuôn

| Thông số nhiệt lý | Khuôn AISI 1010 | Vật đúc A356 | |
|---|--------------------|--------------|----------|
| | | Pha rắn | Pha lỏng |
| Nhiệt độ nóng chảy, °C | | | 615 |
| Nhiệt độ đông đặc, °C | | 555 | |
| Khối lượng riêng, kg.m ⁻³ | 7670 | 2670 | 2380 |
| Nhiệt dung, J.kg ⁻¹ .K ⁻¹ | 850 | 900 | 1200 |
| Hệ số dẫn nhiệt, W.m ⁻¹ .K ⁻¹ | 52 | 126 | 94 |
| Án nhiệt kết tinh, J.kg ⁻¹ | | | 397480 |
| Hệ số truyền nhiệt mẫu-khuôn, W.m ⁻² .K ⁻¹ | | 50 | 50 |
| Hệ số truyền nhiệt khuôn-môi trường, W.m ⁻² .K ⁻¹ | 0.02 | | |

Bảng 3. Các thông số đầu vào thực nghiệm và mô phỏng

| Các thông số đầu vào | Khuôn | Mẫu | Môi trường |
|-------------------------|-------|-----|------------|
| Nhiệt độ rót, °C | | 700 | |
| Nhiệt độ khuấy, °C | | 599 | |
| Nhiệt độ khuôn, °C | 700 | | 30 |
| Nhiệt độ môi trường, °C | | | |
| Thời gian khuấy, s | | 120 | |



Hình 3. Sơ đồ hệ thống đo, ghi nhiệt độ trong thực nghiệm

Kim loại lỏng ở nhiệt độ 700 °C được rót vào cốc khuấy đã được nung nóng ở 700 °C và cách nhiệt với môi trường xung quanh. Thời gian khuấy là 120 s (2 phút), khi nhiệt độ kim loại ở nhiệt độ 590 °C (trạng thái bán lỏng) được rót vào khuôn và làm nguội bằng gió tự nhiên đến khi kim loại đông đặc hoàn toàn.

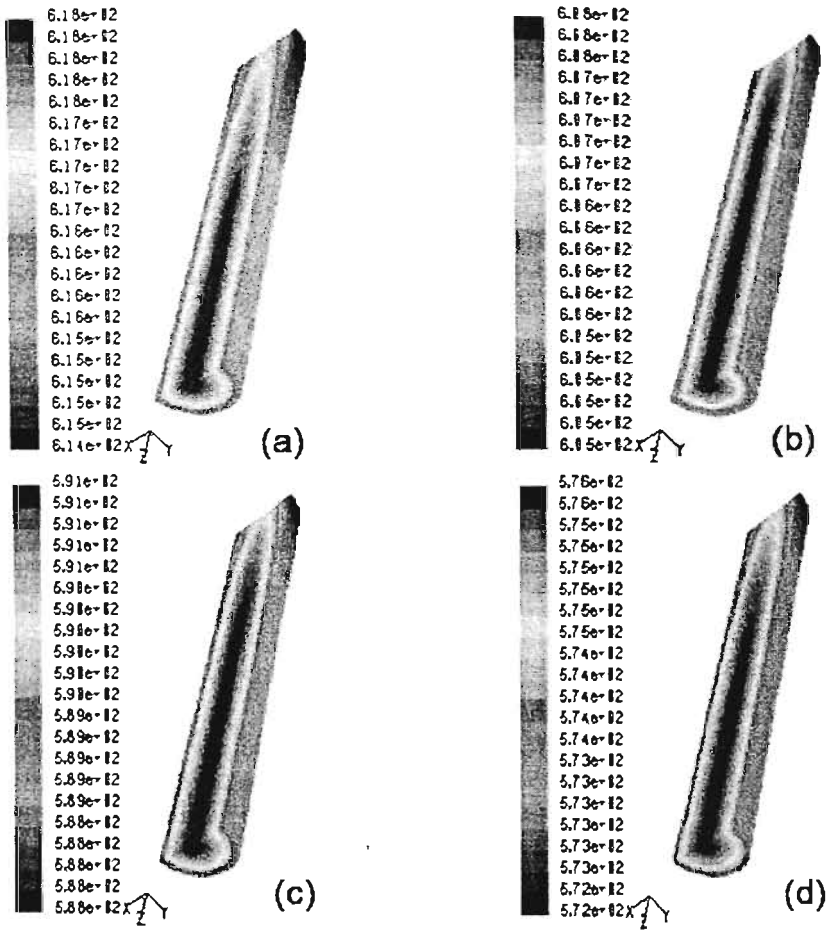
Việc đo nhiệt độ được tiến hành bằng máy hệ thống OMEGA TEMPSCAN 1100 có khả năng ghi nhận tín hiệu từ can nhiệt và truyền dữ liệu vào máy tính thông qua chương trình CHARTVIEW (hình 3). Các bước tiến hành thí nghiệm cũng như các thông số này cũng là cơ sở cho dữ kiện đầu vào trong quá trình mô phỏng số.

IV. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

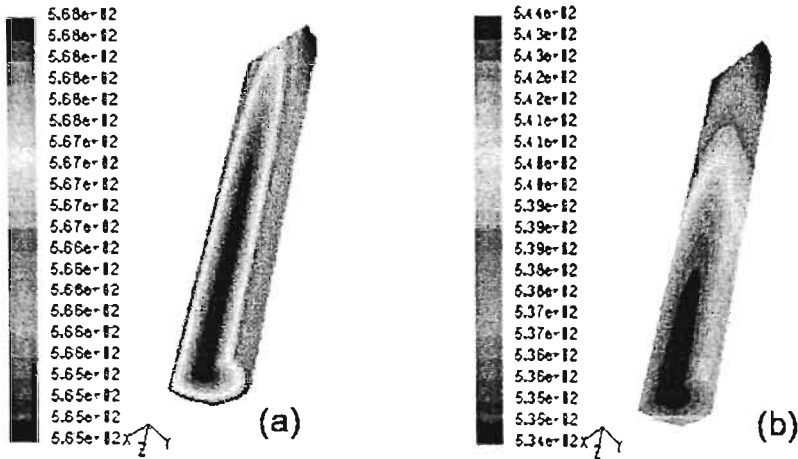
Hình 4 (a), (b), (c) và (d) là kết quả phân bố trường nhiệt độ của vật đúc sau 60 s, 120 s, 240 s và 360 s, nhận thấy tất cả các trường hợp trên khoảng nhiệt độ trong mẫu đều nằm ở vùng nhiệt độ chảy lỏng của hợp kim A356. Nhiệt độ cao nhất ở vùng tâm mẫu và có xu hướng giảm dần theo chiều từ trong ra ngoài và từ dưới lên trên. Điều này hoàn toàn phù hợp với các mô hình toán học và vật lý của quá trình truyền nhiệt. Giá trị nhiệt độ cao nhất tại tâm ở phần đáy của mẫu khảo sát ở thời điểm 60 s là 618 °C và 120 s là 608 °C, 240 s là 591 °C và 360 s là 576 °C. Nhiệt độ thấp nhất tại bề mặt vùng bề mặt trên của mẫu tương ứng có giá trị là 614 °C (60 s), 605 °C (120 s), 588 °C (240 s) và 572 °C (360 s). Mức chênh lệch này không nhiều do cốc khuấy được cách nhiệt với môi trường.

Sau 120 s là thời gian để hệ kim loại lỏng – cốc rót ổn định về mặt nhiệt động học, tiếp đến là giai đoạn khuấy ở nhiệt độ 599-600 °C cũng được thực hiện trong khoảng thời gian là 2 phút (giai đoạn sau 120s đến 360 s). Giai đoạn này chưa có hiện tượng chuyển pha (vai trò của ẩn nhiệt kết tinh và điều kiện biên loại 5 chưa tham gia vào quá trình truyền nhiệt) nên quá trình truyền nhiệt tương đối ổn định, gần như chỉ xảy ra giữa hai pha lỏng (mẫu) và pha rắn (cốc rót đã cách nhiệt). Dẫn tới giá trị này hoàn toàn có thể tính toán bằng phương pháp giải tích thông qua phương trình truyền nhiệt (phương trình (1)).

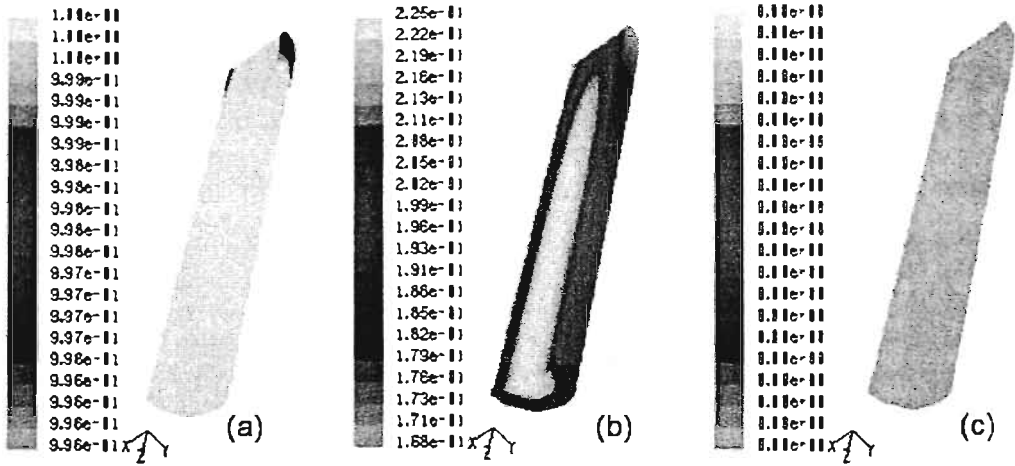
Kết quả phân bố trường nhiệt độ của vật đúc trong giai đoạn kết tinh, chuyển pha sau 420 s (a) và 540 s (b) được trình bày trên hình 5 (a) và (b). Giai đoạn này sau khi kim loại lỏng được khuấy trong cốc rót, nhiệt độ kim loại lỏng xuống tới vùng bán lỏng (590 °C) được rót vào khuôn kim loại và làm mát bằng gió tự nhiên. Sự phân bố nhiệt độ cũng tương tự như ở các giai đoạn trước là nhiệt độ cao nhất ở vùng tâm mẫu và có xu hướng giảm dần theo chiều từ trong ra ngoài và từ dưới lên trên. Giá trị nhiệt độ tại tâm ở phần đáy của mẫu khảo sát ở thời điểm 420 s là 568 °C và 540 s là 548 °C, tương ứng tại bề mặt nơi nhiệt độ thấp nhất là 565 °C (420 s) và 534 °C (540 s). Dễ nhận thấy sau 420 s kim loại trong vùng nhiệt độ bán lỏng, lúc này quá trình truyền nhiệt vô cùng phức tạp bởi sự tham gia của thành phần pha lỏng, pha đặc và pha bán lỏng, có thể nói đây là giai đoạn truyền nhiệt không ổn định và phức tạp. Lúc này phương trình năng lượng có thêm đại lượng ẩn nhiệt kết tinh (phương trình (4)), độ chính xác của bài toán phụ thuộc rất nhiều vào mô hình toán học cũng như vật lý và các điều kiện biên khi đặt bài toán ban đầu.



Hình 4. Trường nhiệt độ của mẫu sau 60 giây (a) và 120 giây (b), 240 s (c) và 360 s (d)



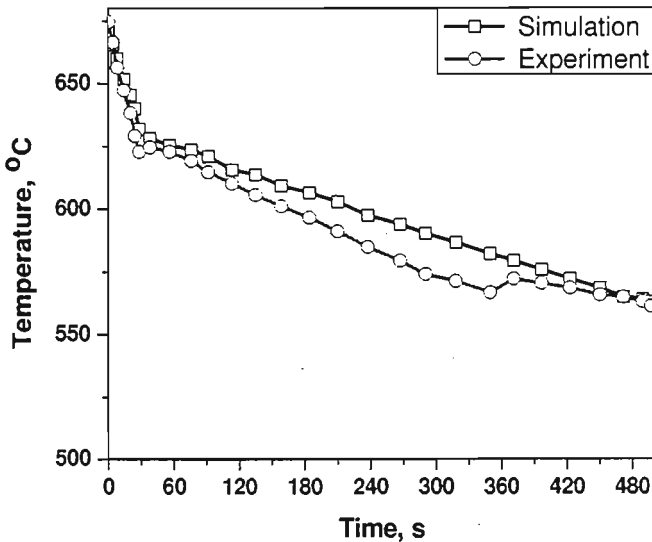
Hình 5. Trường nhiệt độ của mẫu sau 420 s (a) và 540 giây (b)



Hình 6. Tỷ phần phân bố pha lỏng sau thời gian 60 giây (a), 420 giây (b) và 540 giây (c)

Sau 540 s trường nhiệt độ hoàn toàn nằm trong vùng đồng đặc, giai đoạn kết tinh đã kết thúc. Quá trình truyền nhiệt thuần túy trong pha rắn, gradient nhiệt độ hoàn toàn phụ thuộc vào tính chất nhiệt lý như nhiệt dung, hệ số dẫn nhiệt,... và các hệ số truyền nhiệt đối với khuôn và môi trường (phương trình (5)).

Hình 6 (a), (b) và (c) là kết quả tỷ phần phân bố pha lỏng trên mẫu tại thời điểm 60 s (a), 420 s (b) và 540 s (c). Có thể thấy tỷ phần pha lỏng tại thời điểm 60 s gần như 100% (phân bố từ 99,6 đến 100%) và 0 % (trạng thái rắn) tại thời điểm sau 540 s (hình 6 (a) và (c)). Tỷ phần pha lỏng phân bố từ 16,8% đến 22,5% tại thời điểm 420 s (hình 6 (b)). Kết quả này hoàn toàn phù hợp với kết quả phân bố trường nhiệt độ qua từng giai đoạn đã xét ở trên.



Hình 7. Đồ thị so sánh đường nguội tự nhiên khuấy mô phỏng và thực nghiệm tại 590 °C

Trên hình 7 là kết quả đo đạc thực nghiệm và kết quả mô phỏng có thể trích xuất giá trị nhiệt độ tại tâm vật đúc theo thời gian. Dễ thấy rằng trong giai đoạn quá nhiệt (nhiệt độ > 615 °C) thì tốc độ nguội rất lớn. Trong giai đoạn toả nhiệt kết tinh (khoảng nhiệt độ 615-555 °C)

tốc độ nguội chậm hơn do ảnh hưởng kết tinh toả ra. Khi đã đông đặc hoàn toàn (nhiệt độ < 555 °C) thì tốc độ nguội lại tăng một chút. Cũng trên đồ thị này kết quả mô phỏng và đo đạc trong thực nghiệm khá trùng hợp cho thấy độ tin cậy của các kết quả mô phỏng là tương đối cao.

IV. KẾT LUẬN

Trong công nghệ đúc, đặc biệt là trong công nghệ đúc bán lỏng [17-19], việc khống chế nhiệt độ là hết sức quan trọng để đảm bảo vật đúc đạt được cơ tính tốt nhất. Do đó việc xác định nhiệt độ, tốc độ nguội và tốc độ đông đặc là hết sức cần thiết. Tuy nhiên việc đo đạc trong điều kiện thiết bị làm việc ở nhiệt độ cao thường gặp nhiều khó khăn. Vì vậy sự kết hợp giữa thực nghiệm và mô phỏng là phương pháp tốt để xác định các điều kiện đúc tối ưu. Trong nghiên cứu này, việc mô phỏng cho phép ta xác định những thông số cơ bản của quá trình đông đặc như trường nhiệt độ (nhiệt độ tại mỗi điểm tại ở các thời gian khác nhau), đường nguội của kim loại trong quá trình đông đặc, tốc độ nguội, tỷ phần pha lỏng, từ đó có thể tính ra tỷ phần pha rắn ($f_s = 1 - f_l$) và tốc độ đông đặc (df_s/dt hoặc df_s/dT) [20,21]. Các kết quả mô phỏng trên được so sánh với kết quả thực nghiệm để qua đó đánh giá tính xác thực cũng như độ tin cậy của chúng.

Lời cảm ơn

Công trình này được thực hiện trong khuôn khổ đề tài cấp nhà nước KC.02.23/06-10.

Tài liệu tham khảo

1. Nguyễn Hồng Hải. *Cơ sở lý thuyết quá trình đông đặc và ứng dụng*. Nxb Khoa học & Kỹ thuật, (2006).
2. Lê Công Dưỡng . *Vật liệu học*, Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật
3. Dương Trọng Hải, Nguyễn Hữu Dũng, Nguyễn Hồng Hải, *Cơ sở lý thuyết các quá trình đúc*, Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật, (2004).
4. Nguyễn Khắc Xương, *Hợp kim màu*, Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật.
5. M.R.Jafari, S.M. Jebarjad, F. Kolahan, *Simulation of thixoformability of A356 aluminum alloy using finite volume method*.
6. Lennar Backerud et al. *Solidification characteristics of aluminum alloys*.
7. Atkinson, *Modelling the semisolid processing of metallic alloys*. Progress in Materials Science 50 (2005).
8. S.P.Manjhi, N.Ramachandran, R.N.Nalla, M.K.Bajai and P.K.Tripathi, *Mathematical model for predicting solidification and cooling of steel inside mould and in air*, Proceedings CAMNE, pp. 69-80 Jamshedpur, India, (1996).
9. S.V.Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York, Hemisphere Publishing Corporation, (1980).
10. W.D.Griffiths, *Modelled heat transfer coefficients for Al-7 wt-%Si alloy castings unidirectionally solidified horizontally and vertically downwards*, Materials Science & Technology, v. 16, pp. 255-260, (2000).
11. D.J.Browne and D.O'mahoney, *Interface heat transfer in investment casting of aluminium alloys*, Metallurgical and Materials Trans. A, v. 32, pp. 3055-3063, (2001).
12. G.R.Liu and S.S.S.Quek, *The Finite Element Method, a practical course*, Copyright © 2003, Elsevier Science Ltd. Allrightsreserved, ISBN: 07506-58665
13. Fluent UDF Manual, Copyright © 2003 by Fluent Inc.
14. GAMBIT User's Guide, Copyright © 2003 by Fluent Inc.
15. Metal handbook. 8th Edition. Americal Society of Metals.

16. Rheo-Light, *Rheocasting: an innovative & ecological process for light and cost effective applications in different industrial sectors*, Centro Ricerche FIAT.
17. L. Ivanchev, D. Wilkins, G. Govender, W. Du Preez, R Bean. *Rheo-processing of semi-solid metal alloys- a new technology for manufacturing automotive and aerospace components*, CSIR
18. BCAST Technology. *Direct Chill Rheocasting (DCRC) Process*, Volume 2. Foundry alloys. AFS/SKANALUMINIUM, (1990).
19. P. Kapranos, H.V. Atkinson, D.H.Kirkwood, *Rapid compression testing of semi-solid alloy slugs*. Materials Science Forum Vols 329-330, pp525-0 (2000).