

Ảnh hưởng của tiết diện rãnh dẫn và áp suất chân không đến khả năng điền đầy trong đúc mẫu cháy

Effects of gate cross-section area and vacuum pressure on mold filling in lost foam casting

HÀ MINH TÂN¹, PHẠM MAI KHÁNH¹, NGUYỄN HỒNG HẢI^{1*}

1. Viện Khoa học và Kỹ thuật Vật liệu, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, Số 1 Đại Cồ Việt, Hà Nội

*Email: hai.nguyenhong1@hust.edu.vn

Ngày nhận bài: 6/12/2022, Ngày duyệt đăng: 5/2/2023

TÓM TẮT

Phương pháp đúc mẫu cháy sử dụng mẫu xốp để chế tạo chi tiết kim loại. Mẫu xốp được phủ một lớp sơn chịu nhiệt, làm khô để trở thành khuôn, rồi đặt vào trong hòm khuôn chứa cát. Sau đó kim loại lỏng được rót trực tiếp vào mẫu xốp, từ đó mẫu xốp bị phân hủy nhiệt và từ từ được thay thế bằng kim loại lỏng, sau đó đông đặc tạo thành vật đúc. Thông thường trong thực tế sản xuất, nhựa expanded polystyren (EPS) được sử dụng để tạo mẫu xốp. Trong nghiên cứu này đã khảo sát quá trình điền đầy của hợp kim nhôm lỏng vào khuôn dưới tác động của các yếu tố như tiết diện rãnh dẫn, áp suất chân không, chiều rộng khe hở khí. Kết quả cho thấy tiết diện rãnh dẫn, nhiệt độ rót, áp suất chân không ảnh hưởng trực tiếp tới thời gian điền đầy.

Từ khóa: tiết diện rãnh dẫn, áp suất chân không, khe hở khí, điền khuôn, đúc mẫu cháy.

ABSTRACT

The lost foam casting process utilizes polymeric foam patterns to produce the metallic components. Foamed polymer patterns are coated with a refractory slurry, dried and embedded in unbonded sand. Molten metal is poured directly on the coated polymer. The polymer is thermally decomposed and is gradually replaced by the liquid metal to create the casting after solidification. Expanded polystyrene (EPS) is the most common pattern material used in commercial practice. In this paper, experiments are conducted to examine the filling of an aluminum alloy melt into the molds. The purpose is to observe some parameters such as the gate cross-section area, vacuum pressure, gas gap length, metal pouring temperature in lost foam casting of aluminum. The results indicate that the gate section, metal pouring temperature and vacuum pressure affect directly the mold-filling time.

Keywords: gate cross-section area, vacuum pressure, gas gap, mold filling, lost foam casting.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong công nghệ đúc mẫu cháy, quá trình trương nở hạt polystyren sẽ làm cho các hạt này chảy dính một phần và liên kết lại với nhau, tạo độ bền cho mẫu xốp. Mức độ chảy dính (fusion) có ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng mẫu xốp, và qua đó ảnh hưởng rất lớn đến quá trình điền đầy khuôn sau này. Đối với mẫu xốp có mức chảy dính thấp, khi rót, quá trình phân hủy các hạt xốp sẽ tạo ra một lớp polymer sền sệt chứa rất nhiều lỗ xốp. Khi mức độ chảy dính cao, số lượng các lỗ xốp giảm đi và chúng liên kết lại với nhau để hình thành một lớp sền sệt liên tục. Kết quả là, vùng ảnh hưởng nhiệt trong mẫu xốp ở phía trước dòng chảy sẽ giảm đi khi tăng mức độ chảy dính của

xốp mẫu. Mức chảy dính các hạt xốp ảnh hưởng không đáng kể đến tốc độ phân hủy mẫu hoặc động học phân hủy polyme. Thời gian điền đầy khuôn kéo dài nếu tăng mức chảy dính [1].

Phương pháp đúc mẫu cháy có nhiều ưu điểm so với công nghệ đúc truyền thống như độ chính xác cao hơn, không cần làm ruột, chất lượng bề mặt vật đúc tốt hơn. Chất lượng vật đúc trong khuôn mẫu cháy phụ thuộc nhiều yếu tố, thí dụ, chất lượng và tỉ trọng của polystyren, thành phần và độ thông khí lớp sơn, áp suất hút chân không... Tăng tỉ trọng của xốp hoặc tăng chiều dày lớp sơn đều làm tăng thể tích lượng khí sinh ra trong quá trình rót kim loại, nhưng chiều dày lớp sơn có ảnh hưởng rất mạnh đến thể tích khí sinh ra [2].

Khi rót khuôn, nhiệt của kim loại lỏng sẽ làm phân hủy xốp polystyren. Sản phẩm của quá trình phân hủy này phụ thuộc vào nhiệt độ kim loại lỏng. Ở nhiệt độ cao, sản phẩm phân hủy bao gồm pha rắn và pha khí. Ở nhiệt độ thấp, sản phẩm phân hủy bao gồm pha lỏng và pha khí. Đối với hợp kim nhôm, ban đầu polystyren phân hủy thành chất lỏng có chuỗi mạch ngắn và styren lỏng. Các chất này sẽ bị hấp phụ vào bề mặt lớp sơn. Sau đó, sản phẩm phân hủy sẽ chuyển thành dạng hơi (hơi styren, hơi nước và khí CO₂). Các khí này sẽ thoát ra ngoài qua lớp sơn. Áp suất khí do phân hủy mẫu xốp polystyren trong quá trình rót khuôn có vai trò rất quan trọng trong việc thiết kế hệ thống rót và loại bỏ các khuyết tật như khớp nguội, ngậm khí và xỉ... Bằng phương pháp mô hình hóa quá trình điền đầy khuôn mẫu cháy của vật đúc gang, tác giả [3] đã xác định áp suất khí tại khe hở khí vào khoảng (4-14) kPa.

Pha khí của sản phẩm phân hủy polystyren sẽ hình thành một khe hở khí ở bề mặt trước của dòng kim loại đang điền đầy khuôn. Chiều rộng của khe hở khí phụ thuộc vào tốc độ thoát khí qua lớp sơn và tốc độ tạo khí khi phân hủy xốp polystyren. Tốc độ thoát khí qua lớp sơn lại phụ thuộc vào độ thông khí của lớp sơn. Chiều dày khe hở khí rất nhỏ, chỉ khoảng 3 mm. Khi độ thông khí của khuôn rất nhỏ thì chiều dày khe hở khí có thể lên đến 15 mm. Thời gian điền đầy khuôn phụ thuộc vào tốc độ phân hủy mẫu xốp mạnh hơn là phụ thuộc vào sự thoát khí qua lớp sơn [4].

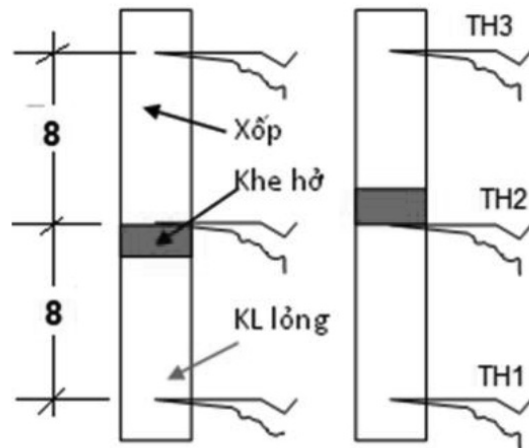
Một số công trình đã xác định độ thông khí của lớp sơn và chiều rộng khe hở khí bằng phương pháp mô hình hóa [5-6]. Các kết quả đều cho rằng, trong vật đúc đều xuất hiện khe hở khí và chiều rộng khe hở khí đạt khoảng (1-4) cm.

Bài báo này trình bày một phương pháp xác định chiều rộng khe hở khí trong vật đúc và ảnh hưởng của chúng đến khả năng điền đầy khuôn vật đúc mẫu cháy.

2. THỰC NGHIỆM

Kim loại nghiên cứu là hợp kim nhôm A356 có nhiệt độ nóng chảy 630 °C. Vật liệu dùng chế tạo mẫu đúc là tấm xốp khối polystyren do công ty Hanel chế tạo, khối xốp polystyren có tỷ trọng $\rho = 0,02 \text{ g/cm}^3$, giới hạn bền nén $(0,91 \pm 1,1) \text{ kg/cm}^2$.

Thành phần sơn bao gồm: bột chịu nhiệt ZrSiO₄, chất dính sét Bentonit, Destrin, chất tạo huyền phù CMC, và dung môi nước. Sét được



Hình 1. Nguyên lý đo khe hở khí

ngâm, rửa, lọc để loại bỏ hoàn toàn các vật lẫn và hạt thô. Các thành phần của sơn được trộn đều và khuấy kĩ trong thiết bị khuấy trong khoảng thời gian 0,5 giờ.

Tốc độ dâng kim loại và chiều rộng khe hở khí trong vật đúc được xác định như hình 1. Tại tâm mẫu xốp, đặt ba cặp nhiệt cách nhau 8 cm. Thời điểm t1 là thời điểm khi cặp nhiệt TH1 chạm vào kim loại lỏng, nhiệt độ bằng nhiệt độ kim loại lỏng. Thời điểm t3 là khi kim loại lỏng tiếp xúc với cặp nhiệt TH3. Khoảng cách giữa TH1 và TH3 là 16 cm. Thời gian kim loại lỏng đi từ TH1 đến TH3 là $\Delta t = t3 - t1$. Tốc độ dâng (điền đầy) trong khuôn là $v = 16 / (t3 - t1) \text{ (cm/s)}$.

Thời điểm t2, khe hở khí bắt đầu tiếp xúc với cặp nhiệt TH2, nhiệt độ bắt đầu dịch chuyển. Thời điểm t4 là khi kim loại lỏng tiếp xúc với TH2, đường biểu diễn nhiệt độ đạt giá trị max. Khoảng thời gian $\Delta t1 = t4 - t2$ là khoảng thời gian khe hở khí (cũng chính là mặt thoáng kim loại) chạy qua đầu cặp nhiệt TH2. Chiều rộng khe hở khí tại vị trí TH2 là: $S2 = v \cdot \Delta t1$

Chiều rộng khe hở khí tạo các vị trí TH1, TH2 và TH3 được tính toán tương tự.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Ảnh hưởng của tiết diện rãnh dẫn đến chiều rộng khe hở khí

3.1.1. Tính toán lý thuyết thời gian điền đầy

Tốc độ điền đầy trong khuôn mẫu cháy phụ thuộc nhiều yếu tố. Sự cân bằng giữa áp suất khe hở khí, độ thông khí của lớp sơn và áp suất chân không là yếu tố quan trọng. Áp suất trong khe hở

khí lại phụ thuộc nhiệt độ phân hủy xốp polystyren và tốc độ rút (chiều cao cột áp và diện tích rãnh dẫn).

Về mặt lý thuyết, gọi mặt cắt 1 là mặt đi qua mặt thoáng kim loại ở cốc rút, mặt cắt 2 là mặt đi qua rãnh dẫn. Tốc độ dòng kim loại tại rãnh dẫn tuân theo định luật Becnuli:

$$\frac{v_2^2}{2\beta_2} - \frac{v_1^2}{2\beta_1} = g(h_2 - h_1) + E_f = 0 \quad (1)$$

Trong đó: $v_1=0$; $\beta_2=1$; gọi $h=h_2-h_1=250-80=170$ mm. Công ma sát E_f bao gồm năng lượng thất dòng, mở rộng dòng cùng năng lượng khuấy và được tra bảng. Khi đó:

$$E_f = \left[\frac{1}{2} e_{f,c} + \frac{1}{2} e_{f,e} + \frac{1}{2} \left(\frac{L}{D} \right) \right] v_2^2$$

Với rãnh dẫn có diện tích 2 cm^2 , các số liệu thay vào (1), gọi tốc độ dâng $v=v_1=dh/dt$ và rút gọn:

$$dt = - \frac{dh}{0,36 h^{\frac{1}{2}}};$$

$$t = - \frac{1}{0,36} \int_{h_2}^{h_1} \frac{dh}{h^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{0,36} \left[2h^{\frac{1}{2}} \right]_{h_2}^{h_1}$$

$$= \frac{2}{0,36} \left[250^{\frac{1}{2}} - 70^{\frac{1}{2}} \right] = 5 \text{ (s)}$$

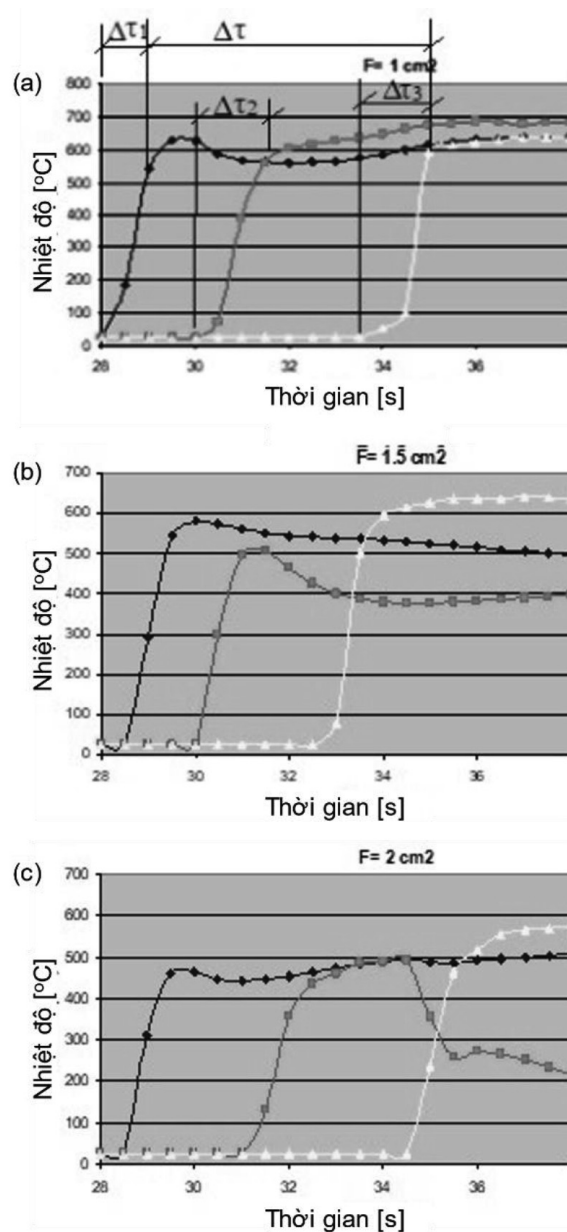
Như vậy, thời gian điền đầy theo lý thuyết chỉ mất 5 giây.

3.1.1. Kết quả thực nghiệm thời gian điền đầy

Sự biến thiên nhiệt độ theo chiều cao vật đúc mẫu chảy được mô tả trên hình 2. Lấy vật đúc có diện tích rãnh dẫn 1 cm^2 (hình 3a) làm ví dụ. Kim loại lỏng đi từ đầu cặp nhiệt TH1 đến đầu cặp nhiệt TH3 mất thời gian $\Delta t = 12$ s. Khoảng cách giữa hai cặp nhiệt là 16 cm. Tốc độ dâng (tốc độ điền đầy) là $v_d = 20/12 = 1,67 \text{ cm/s}$.

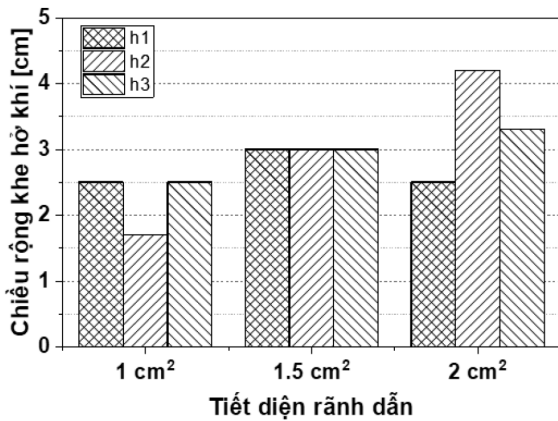
Khe hở khí đi qua đầu cặp nhiệt TH1 là $\Delta t_1 = 2$ s. Chiều rộng khe hở khí tại TH1 là: $S_1 = v_d \Delta t_1 = 1,67 \times 2 = 3,34 \text{ cm}$. Chiều rộng khe hở khí ở vị trí cặp nhiệt TH2 là $S_2 = v_d \Delta t_2 = 1,67 \times 1,5 = 2,50 \text{ cm}$. Chiều rộng khe hở khí tại vị trí TH3: $S_3 = v_d \Delta t_3 = 1,67 \times 2 = 3,34 \text{ cm}$.

Tốc độ dâng và chiều rộng khe hở khí trong vật đúc có diện tích rãnh dẫn $1,5 \text{ cm}^2$ và 2 cm^2 được tính toán tương tự. Kết quả cho trên Hình 3.

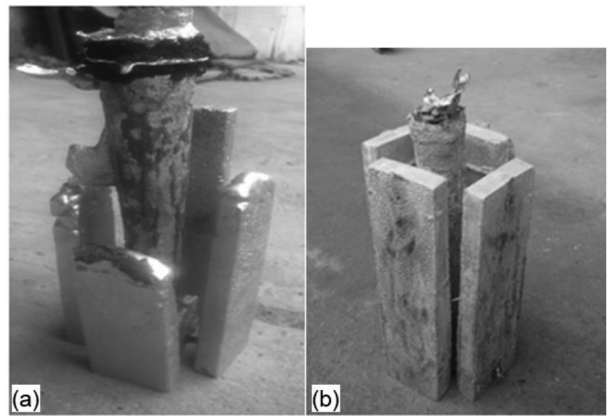


Hình 2. Thay đổi nhiệt độ theo chiều cao vật đúc. (a) tiết diện rãnh dẫn $A = 1 \text{ cm}^2$; (b) $A = 1,5 \text{ cm}^2$; (c) $A = 2 \text{ cm}^2$

Đồ thị Hình 3 cho thấy, chiều rộng khe hở khí trong vật đúc mẫu chảy của hợp kim nhôm có thể đạt từ 2,0 - 4,5 cm và tăng dần khi tăng diện tích rãnh dẫn. Tiết diện ngang của vật đúc thí nghiệm là $A_0 = 75 \text{ cm}^2$, rãnh dẫn có diện tích $A = 2 \text{ cm}^2$, tỉ lệ $K = A/A_0 = 1,5/75 = 2\%$, thì chiều rộng khe hở khí không đổi dọc suốt chiều cao vật đúc. Điều này có nghĩa là, hệ thống đã đạt được sự cân bằng giữa áp suất khí sinh ra trong khe hở và độ thông khí của lớp sơn. Tăng diện tích rãnh dẫn lên 2



Hình 3. Chiều rộng khe hở khí phụ thuộc diện tích rãnh dẫn và chiều cao vật đúc. h1, h2 và h3 là chiều rộng khe hở khí ở vị trí TH1; TH2 và TH3 tương ứng



Hình 4. Vật đúc có diện tích rãnh dẫn a) Fd = 0,2; 0,3; 0,4 và 0,5 cm²; b) rãnh dẫn Fd= 1,0; 1,25; 1,5 và 2 cm²

cm², khe hở khí ở phần sát với rãnh dẫn là nhỏ nhất (2,5 cm), giá trị cao nhất là ở giữa vật đúc (4,25 cm) sau đó giảm xuống 3,2 cm ở phần trên của vật đúc. Chiều rộng khe hở khí phụ thuộc lưu lượng kim loại chảy vào khuôn.

Với diện tích rãnh dẫn lớn (2 cm²), lúc ban đầu, một lượng lớn kim loại lỏng chảy vào khuôn, phân hủy một lượng lớn xốp polystyren, làm cho chiều rộng khe hở khí tăng. Khi một lượng lớn khí được sinh ra, nó sẽ gây một áp suất ngược, đẩy lùi dòng kim loại lỏng làm tốc độ dâng nhỏ đi và do đó, chiều rộng khe hở cũng giảm theo.

Chiều rộng khe hở khí sẽ quyết định tốc độ điền đầy và qua đó là khả năng điền đầy vật đúc mẫu cháy. Tuy nhiên, chiều rộng khe hở khí là một thông số phức tạp, phụ thuộc nhiều yếu tố, thí dụ như, tỉ trọng mẫu xốp, nhiệt độ kim loại lỏng, độ thông khí của vỏ sơn, áp suất chân không.

Để minh chứng cho nhận định trên, đã tiến hành đúc 3 chum vật đúc bao gồm 12 vật đúc có diện tích rãnh dẫn khác nhau, thay đổi từ 0,2 cm² đến 2,0 cm², áp suất chân không 0,4 at. Kết quả cho trên bảng 1 và hình 4. Hình 4 cho thấy, với kích thước rãnh dẫn tiết diện khoảng 0,75 cm² (tỉ lệ diện tích rãnh dẫn/ diện tích vật đúc khoảng 10 %) trở lên, vật đúc được điền đầy hoàn toàn và không có khuyết tật. Với diện tích rãnh dẫn 0,75 cm², chiều rộng khe hở khí nằm trong khoảng (1,5 ÷ 2,5) cm.

Khi diện tích rãnh dẫn nhỏ hơn 0,75 cm² (tỉ lệ Fd/Fvd < 10 %), lưu lượng kim loại vào vật đúc khá thấp, áp lực khí trong khe hở đủ lớn để kim hãm tốc độ dâng kim loại, làm cho vật đúc không

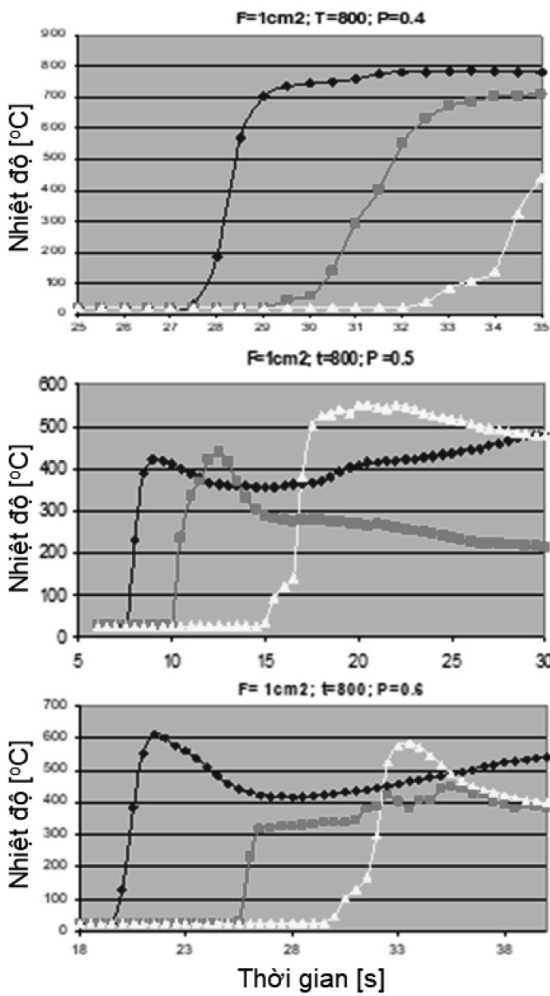
Bảng 1. Ảnh hưởng của diện tích rãnh dẫn đến khả năng điền đầy vật đúc mẫu cháy.

Chùm mẫu	Diện tích rãnh dẫn (cm ²)	Áp suất chân không (at)	Chiều cao cột áp tĩnh (mm)	Nhiệt độ rót T (oC)	Chất lượng vật đúc
1	2,00	0,4	23	800	Điền đầy
	1,75				
	1,50				
	1,00				
2	1,25	0,4	23	800	Điền đầy Không đầy
	1,00				
	0,75				
	0,50				
3	0,40	0,4	23	800	Không điền đầy
	0,30				
	0,20				

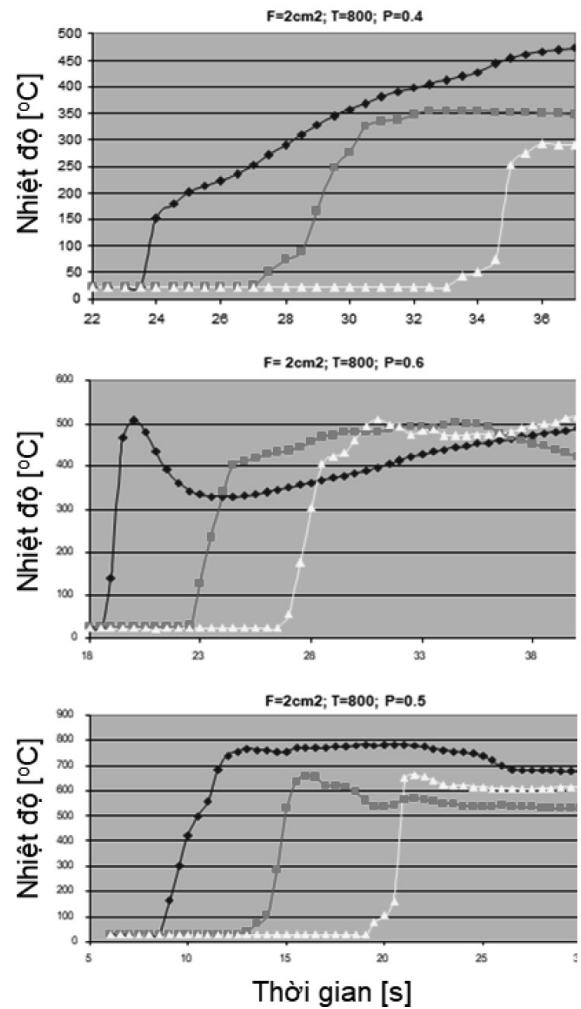
đầy. Khi chiều rộng khe hở khí quá lớn, áp suất chân không có thể làm sập mẫu, vỡ lớp sơn, vật đúc cũng không điền đầy.

Nguyên nhân là do tiết diện rãnh dẫn đủ lớn nên lưu lượng kim loại lỏng đi vào vật đúc lớn do đó tốc độ dâng cũng đủ lớn để thắng được các trở lực và áp suất của khối khí sinh ra do sự phân hủy mẫu xốp ở giữa mặt dâng kim loại lỏng và mẫu xốp. Hơn nữa, do lớp sơn thỏa mãn yêu cầu về độ thông khí và tính thấm do đó lượng khí sinh ra sẽ bị hút qua bề mặt lớp sơn bởi áp suất hút chân không đủ lớn.

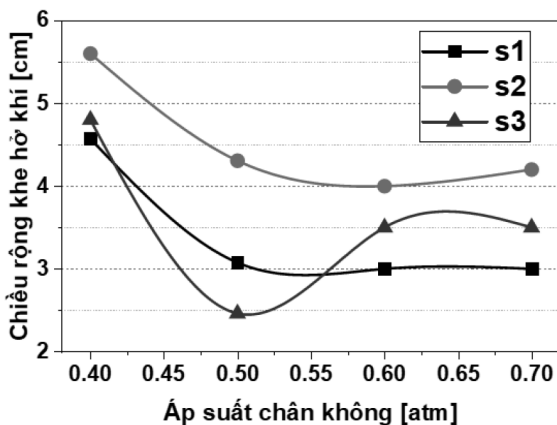
3.1. Ảnh hưởng của áp suất chân không đến khả năng điền đầy và chất lượng của vật đúc



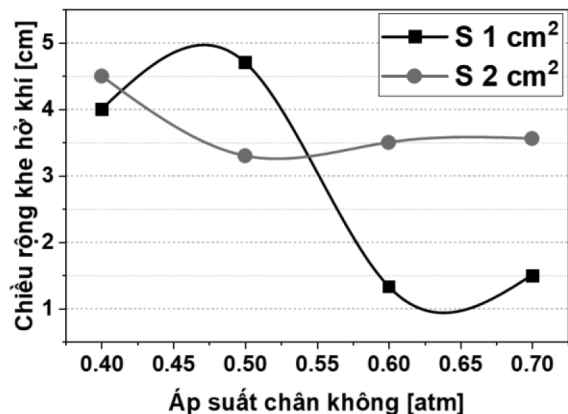
Hình 5. Trường nhiệt độ trong vật đúc có tiết diện rãnh dẫn là 1 cm^2 , áp suất chân không thay đổi



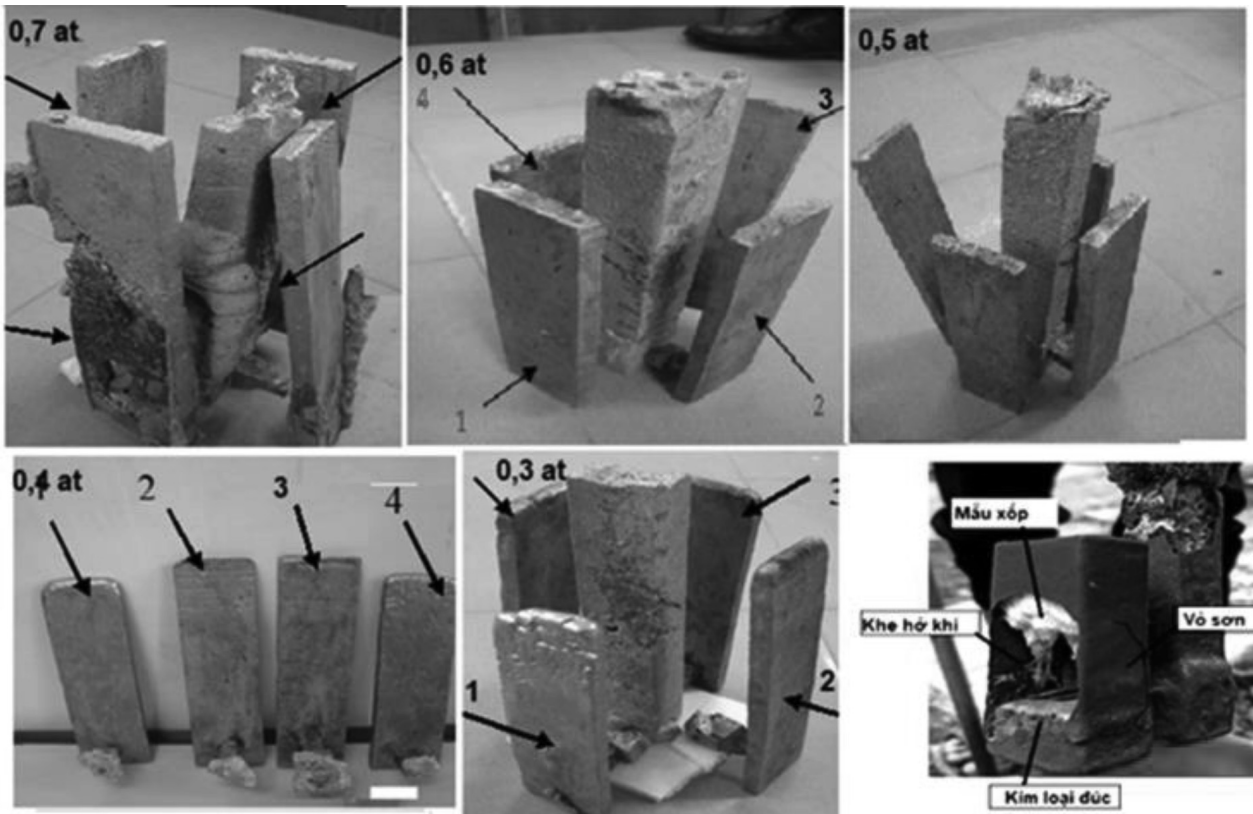
Hình 6. Trường nhiệt độ trong vật đúc có tiết diện rãnh dẫn là 2 cm^2 ; áp suất chân không thay đổi



Hình 7. Chiều rộng khe hở khí phụ thuộc áp suất chân không và chiều cao vật đúc. S1 là chiều rộng khe hở khí ở vị trí dưới cùng (rãnh dẫn); S2 chiều rộng khe hở khí tại vị trí cặp nhiệt TH2 và S3 là chiều rộng khe hở khí ở vị trí trên cùng, vị trí cặp nhiệt TH3.



Hình 8. Chiều rộng khe hở khí của vật đúc có rãnh dẫn 1 cm^2 và 2 cm^2 phụ thuộc áp suất chân không



Hình 9. Ảnh hưởng của áp suất chân không đến khả năng điền đầy và khe hở khí trong vật đúc.

Các thí nghiệm tiến hành với hai chũm vật đúc có tiết diện rãnh dẫn là 1 cm² và 2 cm², áp suất chân không thay đổi 0,4; 0,5 và 0,6 at. Hình 5 và 6 tương ứng là trường nhiệt độ trong các vật đúc có diện tích rãnh dẫn 1 cm² và 2 cm². Từ kết quả của hình 5 và hình 6, dùng thuật toán đã nêu ở phần 2, kết quả chiều rộng khe hở khí phụ thuộc áp suất chân không cho trên hình 7 và hình 8.

Đối với vật đúc có diện tích rãnh dẫn 2 cm², tỉ lệ $F_d/F_{vd} = 10\%$ và áp suất chân không khoảng 0,4 at, chiều rộng khe hở khí có thể đạt giá trị (4,0 ÷ 5,5) cm và sẽ giảm dần đến (3,0 ÷ 4,0) cm khi áp suất chân không đạt 0,7 at (hình 7). Chiều rộng khe hở khí cũng phụ thuộc chiều cao vật đúc. Khe hở khí lớn nhất nằm ở vùng giữa của vật đúc. Chiều rộng khe hở khí sẽ ổn định khi áp suất chân không lớn hơn 0,6 at. Điều này có nghĩa là, mức độ chân không hóa cát khuôn không cần phải chân không tuyệt đối. Áp suất chân không 0,6 at đã đủ để đạt trạng thái cân bằng giữa độ thông khí của vỏ sơn và áp suất của khí tạo thành do phân hủy xốp polystyren. Khi đó, có bao nhiêu khí được tạo thành thì cũng sẽ có bấy nhiêu khí được thoát qua lớp vỏ sơn. Áp suất hút chân không càng lớn

thì lượng khí sinh ra do sự phân hủy mẫu xốp thoát qua lớp vỏ sơn càng nhiều và nhanh. Điều này làm cho áp suất trong khe hở giữa mặt thoáng kim loại lỏng và mẫu xốp càng thấp, tốc độ dâng sẽ càng cao đồng thời chiều rộng khe hở khí sẽ càng giảm.

Đối với mẫu có tiết diện rãnh dẫn là 2 cm², tỉ lệ $F_d/F_{vd} = 27\%$, chiều rộng khe hở khí gần như tỷ lệ thuận với áp suất hút chân không trong khoảng (0,4 ÷ 0,6) at. (hình 8). Sau đó, kích thước này ổn định, không đổi. Đối với mẫu có tiết diện rãnh dẫn là 1 cm², tỉ lệ $F_d/F_{vd} = 13,5\%$, qui luật biến đổi chiều rộng khe hở khí phụ thuộc áp suất không có qui luật rõ ràng trong khoảng 0,4 ÷ 0,6 at. Nhưng cũng vẫn ổn định và không đổi ở áp suất chân không lớn hơn 0,6 at. Khi áp suất hút chân không càng cao thì tốc độ dâng của kim loại lỏng càng lớn vì, khi áp suất hút chân không càng lớn thì lượng khí sinh ra ở khe hở khí giữa bề mặt mẫu xốp và mặt dâng kim loại lỏng, sẽ ít đi do độ chênh áp khá lớn. Hậu quả là chiều rộng khe hở khí sẽ giảm.

Áp suất chân không hóa khuôn cát đệm trong đúc mẫu cháy có tác dụng làm cân bằng tốc độ

thoát khí qua lớp vỏ sơn và tốc độ tạo khí do xốp polystyren phân hủy, qua đó, ảnh hưởng đến khả năng điền đầy của vật đúc (hình 9). Với điều kiện diện tích rãnh dẫn là như nhau và bằng 1 cm^2 , chiều dày lớp sơn không đổi, áp suất chân không nhỏ hơn 0,4 at, vật đúc không điền đầy hoàn toàn. Áp suất chân không bằng hoặc lớn hơn 0,7 at sẽ làm vỡ lớp sơn, khuôn bị sập và vật đúc cũng không hoàn hảo. Hình 9 cũng cho thấy một cách trực quan khoảng cách của khe hở khí xuất hiện trong vật đúc nhôm.

4. KẾT LUẬN

Các thí nghiệm đã chỉ ra rằng, trong vật đúc

hợp kim nhôm đúc mẫu cháy, có xuất hiện khe hở khí. Kích thước khe hở khí phụ thuộc vào diện tích rãnh dẫn, áp suất hút chân không và nhiệt độ rót.

Thời gian điền đầy trong vật đúc mẫu cháy nhỏ hơn nhiều so với trong vật đúc khuôn cát sét thông thường. Có một giá trị của diện tích rãnh dẫn để đảm bảo điền đầy vật đúc một cách hoàn hảo. Đó là tỉ lệ giữa diện tích rãnh dẫn và diện tích ngang vật đúc (F_d/F_vd) khoảng $(20 \div 30) \%$.

Áp suất hút chân không trong đúc mẫu cháy hợp kim nhôm chỉ vào khoảng $(0,5 \div 0,7)$ at. Áp suất lớn hơn hoặc nhỏ hơn giá trị này đều gây khuyết tật cho vật đúc.

TÀI LIỆU TRÍCH DẪN

1. J. Rossacci, S. Shivkumar; *Influence of EPS bead fusion on pattern, degradation and casting formation in the lost foam process*, *Journal of Materials Science*, No 38, 2003, pp. 2321 - 2330.
2. M. Khodai, S. M. H. Mirbagheri; *Behavior of Generated Gas in Lost Foam Casting*, *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, Vol 5, No 2, 2011.
3. S. M. H. Mirbagheri; *Modelling of foam degradation in lost foam casting process*, *Journal of Materials Science*, No 39, 2004, pp. 4593 - 4603.
4. M. Sands, S. Shivkumar; *Influence of coating thickness and sand fineness on mold filling in the lost foam casting process*, *Journal of Materials science*, No 38, 2003, pp. 667 - 673.
5. W. D. Griffiths, P. J. Davies; *The permeability of Lost Foam pattern coatings for Al alloy castings*, *J. Mater Sci*, 2008, pp. 5441–5447.
6. M. Xie; *Mold-filling and Solidification Simulation of Grey Iron in Lost-Foam Casting*, *5th International Conference on Advanced Design and Manufacturing Engineering (ICADME 2015)*.