

Tối đa hóa hiệu năng của hệ thống làm mát khuôn đúc ép phun nhựa chế tạo bằng công nghệ in 3D kim loại

Optimize the performance of cooling channel of injection mold made by 3D selective laser sintering technology

Đặng Xuân Phương

Trường Đại học Nha Trang

Email: phuongdx@ntu.edu.vn

Tel: +84-2583832072; Mobile: 0905185469

Tóm tắt

Từ khóa:

Chế tạo khuôn mẫu; Công nghệ in 3D kim loại; Hệ thống làm nguội khuôn; Thiết kế tối ưu.

Hệ thống kênh làm mát truyền thống chế tạo bằng phương pháp khoan lỗ thẳng không đảm bảo được việc làm nguội nhanh và đồng đều đối với các sản phẩm nhựa có hình dáng hình học phức tạp. Nghiên cứu này giới thiệu hệ thống kênh làm mát theo đường cong bám theo bề mặt của lòng khuôn, được chế tạo bằng phương pháp in 3D kim loại. Phương pháp tính toán thiết kế hệ thống làm mát tối ưu cả về hiệu năng cũng như đảm bảo tính công nghệ trong kết cấu đối với phương pháp in 3D được giới thiệu thông qua ví dụ minh họa cho một sản phẩm nhựa. Nghiên cứu cho thấy, với chi tiết có hình dáng phức tạp đối với hệ thống làm mát truyền thống, nếu thiết kế kênh làm mát hợp lý có thể giảm thời gian làm nguội sản phẩm đến 50%, bên cạnh đó, chất lượng sản phẩm cũng tốt hơn. Đây là một minh chứng cho thấy tính hiệu quả kỹ thuật của công nghệ in 3D trong công nghiệp chế tạo khuôn mẫu mặc dù giá thành chế tạo bằng công nghệ in 3D kim loại vẫn tương đối cao.

Abstract

Keywords:

3D metal printing technology; optimal design; Injection mold making; Mold cooling system.

The conventional cooling channel system manufactured by straight-through drilling does not guarantee rapid and uniform cooling while making plastic products with complex geometric shapes. This study introduces a conformal cooling channel system made by 3D metal printing that conforms to the surface of the injection mold's cavity. The optimum design of the cooling system in terms of cooling performance and manufacturability for the 3D printing method is introduced through an example of a plastic product. The research result shows that if the geometry of the molded part is complex for traditional cooling systems, the proper channel design of conformal cooling channel can reduce the cooling time by up to 50%; besides, the product quality is also higher. This work demonstrates the technical efficiency of 3D printing technology for the injection mold industry, despite the cost of manufacturing by 3D metal printing is still relatively high.

Ngày nhận bài: 21/7/2018

Ngày nhận bài sửa: 04/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. GIỚI THIỆU

Trong quá trình chế tạo sản phẩm nhựa bằng công nghệ đúc ép phun, giai đoạn làm nguội chiếm tới hai phần ba chu kỳ. Ngoài ra, quá trình làm nguội còn ảnh hưởng đến chất lượng của chi tiết đúc. Nếu hệ thống làm mát làm nguội chi tiết một cách đồng đều, độ cong vênh, ứng suất dư cũng giảm đi và chất lượng chi tiết tăng lên. Vì vậy có thể nói hệ thống làm mát khuôn đóng một vai trò cực kỳ quan trọng. Theo cách thông thường, kênh làm mát trong hệ thống làm nguội được chế tạo bằng phương pháp khoan lỗ. Tuy nhiên, đối với một số sản phẩm đúc có hình dáng phức tạp, hệ thống làm nguội truyền thống khó có thể làm mát đồng đều bề mặt của chi tiết đúc. Gần đây, phương pháp chế tạo mẫu nhanh bằng công nghệ in 3D kim loại đã mang đến một tiềm năng cho việc chế tạo các kênh làm mát bám theo bề mặt cong của chi tiết (conformal cooling channels) để tăng cường chất lượng và hiệu suất làm mát [1-3].

Nhiều nghiên cứu gần đây cho thấy hệ thống làm mát bám theo bề mặt chi tiết tốt hơn so với hệ thống kênh làm mát truyền thống bằng phương pháp khoan lỗ thẳng áp dụng cho trường hợp chi tiết đúc phức tạp. Ưu điểm của kênh làm mát bám theo bề mặt chi tiết là giảm được thời gian làm nguội và giảm độ cong vênh của chi tiết do co rút và biến dạng nhiệt [4, 5]. Ahn D.G và cộng sự [6] đã chế tạo khuôn bằng phương pháp in 3D nung chảy bằng laser áp dụng cho chi tiết cánh quạt điện và đã kết luận rằng thời gian làm nguội có thể giảm xấp xỉ 35%. Việc giảm thời gian làm mát dẫn đến giảm được thời gian chu kỳ và tăng năng suất quá trình đúc, giảm giá thành sản xuất sản phẩm.

Mặc dù hệ thống làm mát bám theo bề mặt chi tiết được cho là tốt hơn so với hệ thống làm mát truyền thống về mặt hiệu năng và độ đồng đều trong sự phân bố nhiệt độ bề mặt khuôn, tuy nhiên, hệ thống làm mát này chỉ phát huy tối đa hiệu quả của nó khi được thiết kế tối ưu. Một số tác giả đã nghiên cứu về tối ưu hệ thống làm mát bám theo bề mặt của chi tiết, tuy nhiên, làm thế nào để thiết kế được một hệ thống làm mát tốt nhất chưa được nghiên cứu một cách kỹ lưỡng.

Jahan và El-Mounayri [4], Wu và các cộng sự [7] đã nghiên cứu phương pháp tối ưu hóa các thông số của kênh làm mát thông qua một ví dụ cho một chi tiết đơn giản có hình trụ trong đó sử dụng phương pháp mô phỏng số và quy hoạch thực nghiệm. Nhiều nghiên cứu khác [2, 6, 8] đã phát triển các phương pháp tối ưu hệ thống làm mát bám theo bề mặt chi tiết đúc nhằm nâng cao hiệu quả làm mát, tuy nhiên các nghiên cứu này thường chỉ bó hẹp cho các nghiên cứu tình huống mà hệ thống tương đối đơn giản. Khi chi tiết đúc phức tạp, đòi hỏi hệ thống làm mát phức tạp hơn và quá trình tối ưu hóa cũng khó hơn. Làm thế nào để tối đa hóa hiệu năng của hệ thống làm mát bám theo bề mặt chi tiết là một nghiên cứu có ý nghĩa bởi vì hiện nay công nghệ in 3D kim loại có giá thành còn khá cao và không phải kim loại nào cũng có thể in được. Nhóm nghiên cứu của chúng tôi đã bắt đầu một số nghiên cứu tối ưu hóa hệ thống làm mát bám theo bề mặt cong của sản phẩm áp dụng cho một sản phẩm nhựa trong ô-tô [9-11]. Kết quả cho thấy thời gian làm nguội giảm được 23%, trong khi đích cần đạt được để minh chứng cho hiệu quả của hệ thống làm mát bám theo bề mặt của sản phẩm đúc phải đạt được từ 50 % trở lên. Về nguyên tắc lý thuyết cũng như thực tiễn cho thấy hiệu quả của hệ thống làm mát bám theo bề mặt chi tiết so với kênh làm mát truyền thống phụ thuộc vào độ phức tạp của chi tiết và kỹ thuật thiết kế tối ưu. Nghiên cứu này giới thiệu hệ thống kênh làm mát theo đường cong bám theo bề mặt của lòng khuôn được chế tạo bằng phương pháp in 3D kim loại. Phương pháp tính toán thiết kế hệ thống làm mát tối ưu cả về hiệu năng cũng như đảm bảo tính công nghệ trong kết cấu đối với phương pháp in 3D được giới thiệu thông qua một ví dụ minh họa của cho một sản phẩm nhựa có hình dáng tương đối phức tạp. Tiếp theo đó, kết quả tính toán thiết kế được kiểm chứng bằng thực nghiệm.

2. NÂNG CAO HIỆU QUẢ CỦA HỆ THỐNG LÀM NGUỘI TRONG KHUÔN NHỰA

2.1. Mối quan hệ giữa các thông số của hệ thống làm mát đến thời gian làm nguội sản phẩm

Thời gian làm nguội chi tiết đúc phụ thuộc vào chiều dày của sản phẩm, tính chất của vật liệu nhựa, vật liệu làm khuôn và các thông số công nghệ đúc ép phun khác theo công thức:

$$t_c = \frac{s^2}{\pi^2 a} \ln \left[\frac{4}{\pi} \left(\frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right) \right] \quad (1)$$

Trong đó s [mm] là chiều dày của chi tiết đúc, T_M , T_W , T_E [°C] lần lượt là nhiệt độ nóng chảy của nhựa khi điền vào lòng khuôn, nhiệt độ trung bình bề mặt lòng khuôn và nhiệt độ của chi tiết đúc tại thời điểm đẩy sản phẩm ra khỏi khuôn; a là hệ số khuếch tán nhiệt được tính bằng công thức $a = k_p / (\rho c_p)$, trong đó ρ [kg/m³], k_p [W/m⁰C], c_p [J/kg⁰C] lần lượt là khối lượng riêng, hệ số dẫn nhiệt và nhiệt dung riêng của polymer.

Nhiệt độ nóng chảy của nhựa phụ thuộc vào từng loại nhựa và được xem như thông số cố định. Nhiệt độ bề mặt lòng khuôn và nhiệt độ mà ở đó cho phép đẩy sản phẩm nhựa ra khỏi khuôn cũng được nhà sản xuất vật liệu nhựa khuyến dùng trong một phạm vi nào đó tùy vào từng loại nhựa. Rõ ràng thấy rằng T_M và T_E dễ dàng ấn định và kiểm soát nhưng nhiệt độ bề mặt lòng khuôn T_W lại phụ thuộc vào các thông số hình học của kênh làm mát và nhiệt độ đầu vào của nước làm mát.

Để xét mối quan hệ giữa thời gian làm mát và các thông số của kênh làm mát cũng như các thông số công nghệ của quá trình đúc sản phẩm, xét phương trình cân bằng nhiệt giữa nhiệt lượng mà sản phẩm mất đi do làm nguội và nhiệt lượng mà hệ thống làm mát lấy đi (bỏ qua lượng nhiệt truyền cho môi trường xung quanh như không khí hoặc tấm kẹp khuôn của máy).

$$\dot{Q}_m + \dot{Q}_c = 0 \quad (2)$$

Trong đó mật độ dòng nhiệt của nhựa nóng truyền cho nước hoặc môi chất làm mát được tính bằng công thức:

$$\dot{Q}_m = 10^{-3} [c_p (T_M - T_E) + i_m] \rho \frac{s}{2} x \quad (3)$$

Trong đó c_p , i_m [J/kg], ρ , x lần lượt là nhiệt dung riêng, nhiệt kết tinh, khối lượng riêng của nhựa và khoảng cách hay bước (pitch) giữa các đường nước trong hệ thống kênh làm mát.

Mật độ dòng nhiệt trong khuôn truyền cho nước làm mát trong khoảng thời gian t_c (tính bằng giây) được tính theo công thức [9]:

$$\dot{Q}_c = 10^{-3} t_c \left(\frac{1}{10^{-3} \alpha \pi d} + \frac{1}{k_{st} S_e} \right)^{-1} (T_W - T_C) \quad (4)$$

Trong đó k_p , d , k_{st} , S_e , T_C lần lượt là hệ số dẫn nhiệt của nhựa, đường kính kênh làm mát, hệ số dẫn nhiệt của thép làm khuôn, hệ số hình dáng và nhiệt độ của nước làm mát.

Ảnh hưởng của vị trí của các đường làm mát đến độ dẫn nhiệt được đưa vào bằng cách áp dụng hệ số hình dáng S_e [10].

$$S_e = \frac{2\pi}{\ln \left[\frac{2x \sinh(2\pi y / x)}{\pi d} \right]} \quad (5)$$

Trong đó x là khoảng cách giữa các đường làm mát và y (tính bằng mm) là khoảng cách từ tâm đường làm mát đến bề mặt của lòng khuôn như trên hình 1.

Hệ số truyền nhiệt của nước được tính bằng công thức [11]:

$$\alpha = \frac{31.395}{d} R_e^{0.8} \quad (6)$$

trong đó hệ số Reynolds

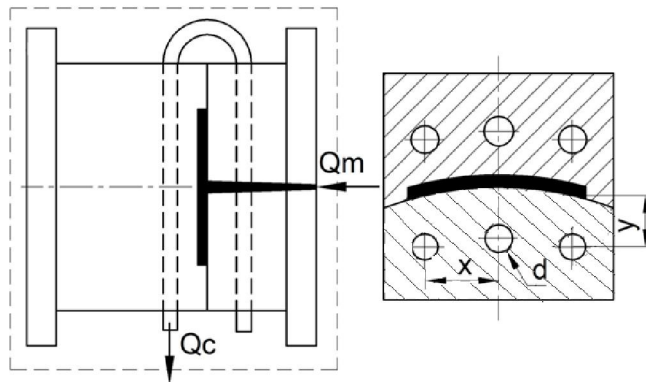
$$R_e = u \frac{d}{\nu} \quad (7)$$

trong đó d [mm], u [m/s], và ν [m^2/s] là đường kính kênh làm mát, vận tốc và độ nhớt động học của môi chất làm mát (nước).

Kết hợp các phương trình từ (1) đến (7) ta có:

$$\frac{[c_p(T_M - T_E) + i_m] \rho \frac{s}{2} x}{T_W - T_C} \left\{ \frac{1}{2\pi k_{st}} \ln \left[\frac{2x \sinh(2\pi \frac{y}{x})}{\pi d} \right] + \frac{1}{0.03139\pi R_e^{0.8}} \right\} = \frac{s^2}{\pi^2 a} \ln \left[\frac{4}{\pi} \left(\frac{T_M - T_W}{T_E - T_W} \right) \right] \quad (8)$$

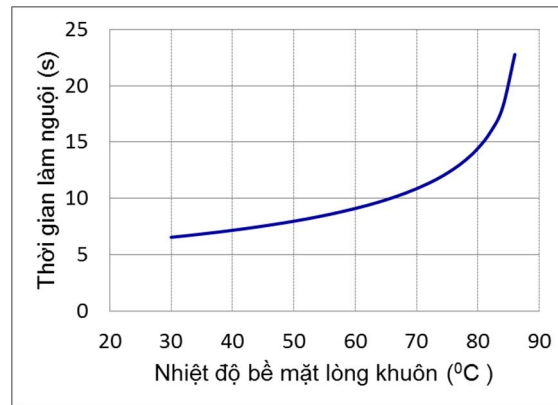
Khi thiết kế hệ thống làm mát, phương trình (8) có 3 ẩn số về thuộc tính hình học là x , y và d . Một phương trình với 3 ẩn số sẽ có vô số nghiệm. Để giải phương trình này, ta phải dùng thêm các ràng buộc về mối quan hệ giữa $x = \beta_1 d$ và $y = \beta_2 d$ trong đó các hệ số β_1 và β_2 được xác định theo kinh nghiệm trong khoảng $2 \leq \beta_1 \leq 5$ và $1 \leq \beta_2 \leq 5$, đồng thời khoảng cách y giữa bề mặt lòng khuôn và tâm đường nước làm mát cũng chọn trước trong phạm vi từ 2 đến 2,5 lần kích thước d .



Hình 1. Mô hình các dòng nhiệt và hệ thống làm mát trong khuôn đúc ép phun nhựa.

2.2. Khả năng giảm tối đa thời gian làm mát

Câu hỏi quan trọng đặt ra khi thiết kế kênh làm mát bám theo bề mặt khuôn chế tạo bằng phương pháp in 3D để thay thế cho hệ thống làm mát truyền thống chế tạo bằng cách khoan lỗ thẳng là chúng ta giảm được thời gian làm mát bao nhiêu phần trăm để từ đó tính ra hiệu quả kỹ thuật và quyết định sử dụng hệ thống làm mát tiên tiến này. Từ công thức tính thời gian làm mát (1), có thể suy ra mối quan hệ giữa thời gian làm nguội và nhiệt độ khuôn nếu giữ các thông số khác bằng hằng số. Đồ thị trên hình 2 cho thấy, khi nhiệt độ khuôn càng cao, nếu giảm được nhiệt độ khuôn bằng cách thiết kế hệ thống làm mát phù hợp thì hiệu quả rút ngắn thời gian làm nguội càng nhiều.



Hình 2. Ví dụ về mối quan hệ giữa thời gian làm nguội và nhiệt độ khuôn.

Giả sử vì lý do nào đó, nhiệt độ trung bình của bề mặt khuôn ở một vùng nào đó có nhiệt độ 72°C đối với trường hợp kênh làm mát truyền thống; nhiệt độ cho phép có thể đẩy sản phẩm ra là 78°C , chiều dày của sản phẩm là 2 mm, nhiệt độ $T_M = 240^{\circ}\text{C}$, vật liệu nhựa là PP, thời gian làm mát khoảng 12,3 giây. Nếu nhiệt độ trung bình của bề mặt khuôn giảm còn 44°C , thời gian làm nguội lúc này chỉ còn khoảng 8,2 giây, giảm đi khoảng 33%. Thời gian làm mát chỉ giảm được tối đa khi nhiệt độ bề mặt khuôn giảm đến mức thấp nhất cho phép. Nếu giảm quá mức sẽ gây ra hiện tượng nguội nhanh về mặt sản phẩm, gây ra hiện tượng không điền đầy khuôn hoặc xảy ra hiện tượng ứng suất trượt lớn.

2.3 Phương pháp tối ưu hóa hệ thống kênh làm mát khuôn nhựa

Mục tiêu của tối ưu hóa hệ thống làm mát là cực tiểu hóa thời gian làm nguội và cực tiểu hóa độ chênh lệch nhiệt độ tại các vùng khác nhau của lòng khuôn. Nếu nhiệt độ khuôn đồng đều, độ cong vênh của sản phẩm là nhỏ nhất. Tuy nhiên, với một sản phẩm đúc có chiều dày cho trước và các thông số công nghệ đúc ép phun xác định, thời gian làm nguội chỉ còn phụ thuộc và nhiệt độ của bề mặt khuôn. Như vậy, tối thiểu hóa thời gian làm nguội tương đương với việc làm sao cho nhiệt độ của lòng khuôn đạt một nhiệt độ thấp nhất cho phép nào đó được xác định như một ràng buộc.

Để tìm được một thiết kế tối ưu về các thông số hình học của hệ thống làm mát, phương pháp lặp trên cơ sở của thuật toán trên hình 3 được áp dụng. Thay đổi các thông số hình học của hệ thống làm mát sao cho nhiệt độ bề mặt khuôn đạt đến một giá trị thấp mong muốn sao cho độ lệch chuẩn của sự phân bố nhiệt độ trên bề mặt khuôn là bé nhất (nhiệt độ phân bố đồng đều nhất) sẽ thu được một thiết kế tối ưu.

Cơ sở lý thuyết về truyền nhiệt trong thuật toán ở hình 3 được tóm tắt như sau:

Truyền nhiệt trong sản phẩm nhựa trong quá trình làm nguội có thể xem gần đúng như bài toán một chiều như trường hợp tấm phẳng. Sự phân bố nhiệt độ theo chiều dày của sản phẩm đúc được mô tả bằng phương trình sau:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (9)$$

Phương trình đạo hàm riêng (9) được giải một cách tiện lợi bằng phương pháp sai phân hữu hạn theo phương pháp Laasonen trong đó biến z theo phương chiều dày của sản phẩm.

Sự truyền nhiệt từ sản phẩm sang bề mặt khuôn gắp phải một nhiệt trở được tính bằng công thức:

$$h_c [T_{ps} - T_m] = -k_p \frac{\partial T}{\partial z} \quad (10)$$

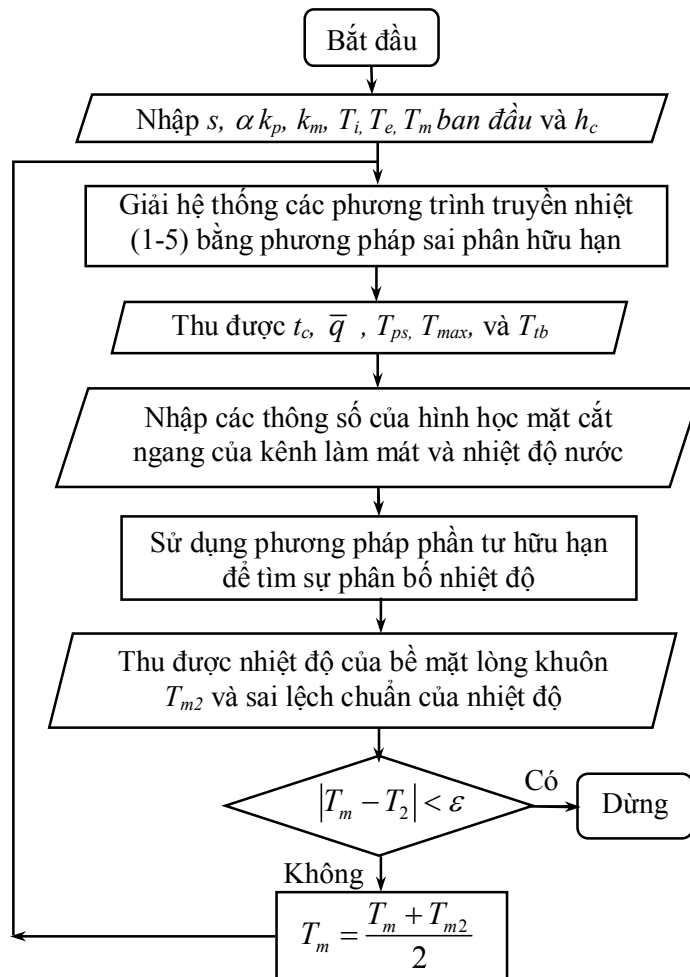
Mật độ dòng nhiệt truyền từ sản phẩm đúc sang khuôn được biểu diễn như sau:

$$q = -k_p \frac{\partial T}{\partial n} \quad (11)$$

Mật độ dòng nhiệt trung bình trong một chu kỳ được tính bằng công thức:

$$\bar{q} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} q dt \quad (12)$$

Trong đó t_c là thời gian làm nguội được xác định bằng công thức (1) ở mục 2.1.

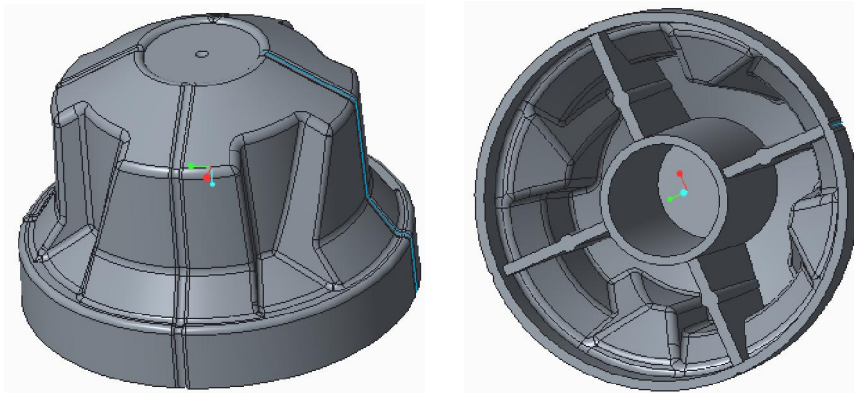


Hình 3. Thuật toán xác định nhiệt độ của lòng khuôn, độ lệch chuẩn của nhiệt độ bề mặt khuôn và thời gian làm nguội [15]

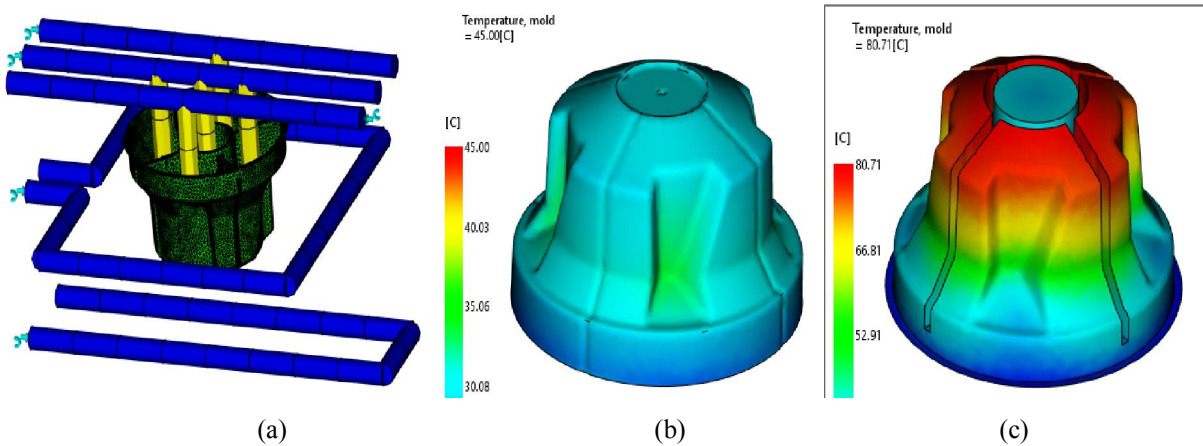
3. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Để minh chứng cho hiệu quả làm mát của hệ thống làm mát bám theo bề mặt lòng khuôn chế tạo bằng phương pháp in 3D kim loại, một chi tiết nhựa dân dụng như hình 4. Vật liệu chế tạo chi tiết là Polypropylene do LG Chemical sản xuất. Nhiệt độ nung chảy trong quá trình đúc là 230°C , nhiệt độ khuyến nghị của bề mặt lòng khuôn là 45°C , nhiệt độ có thể đẩy được chi tiết ra khỏi khuôn là 85°C . Chiều dày trung bình của chi tiết là 2,5 mm và kích thước đường kính lớn nhất của chi tiết là 87 mm và thể tích vật liệu là 58 cm^3 . Do chi tiết này có hình dáng tương đối phức tạp và có vùng khe hẹp nên rất khó làm nguội bằng hệ thống làm nguội thông thường.

Nếu sử dụng hệ thống kênh làm mát bằng cách khoan lỗ thẳng, với vật liệu làm khuôn (cả tấm cái và tấm lõi) là thép KP-4M của Hàn Quốc có hệ số dẫn nhiệt là $41\text{ W/m}^{\circ}\text{K}$, mặc dù đã cố gắng sử dụng các vách làm mát (baffle), nhiệt độ của lòng khuôn ở phần lõi khuôn rất cao (hình 5c), khoảng $80,7^{\circ}\text{C}$. Sự phân bố nhiệt độ trên bề mặt của phần lõi không đồng đều, độ chênh lệch nhiệt độ lớn nhất hơn 30°C . Thời gian làm nguội khoảng 20 giây. Thời gian làm nguội này là khá dài. Với chiều dày 2,5 mm, nếu chi tiết có dạng tấm phẳng, thời gian làm nguội lý tưởng chỉ khoảng 8,5 giây. Như vậy còn rất nhiều tiềm năng để giảm được thời gian làm nguội bằng cách thiết kế hệ thống kênh làm mát bám theo mặt cong của lòng khuôn và được chế tạo bằng phương pháp in kim loại.

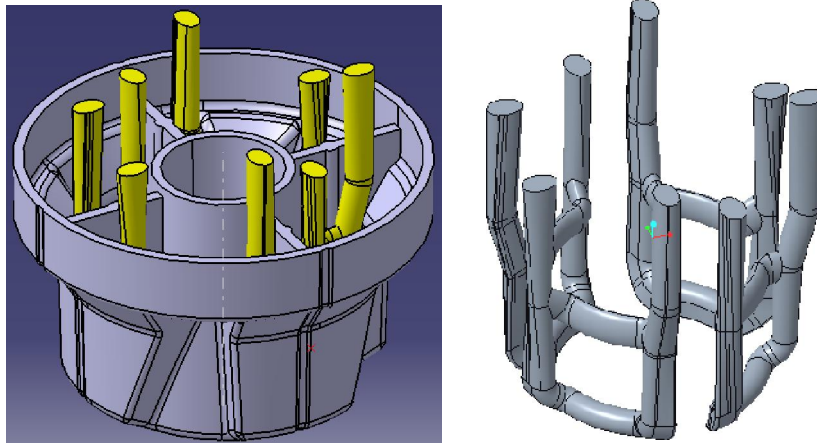


Hình 4. Minh họa sản phẩm đúc được so sánh hiệu quả làm mát giữa hai loại kênh làm mát khác nhau



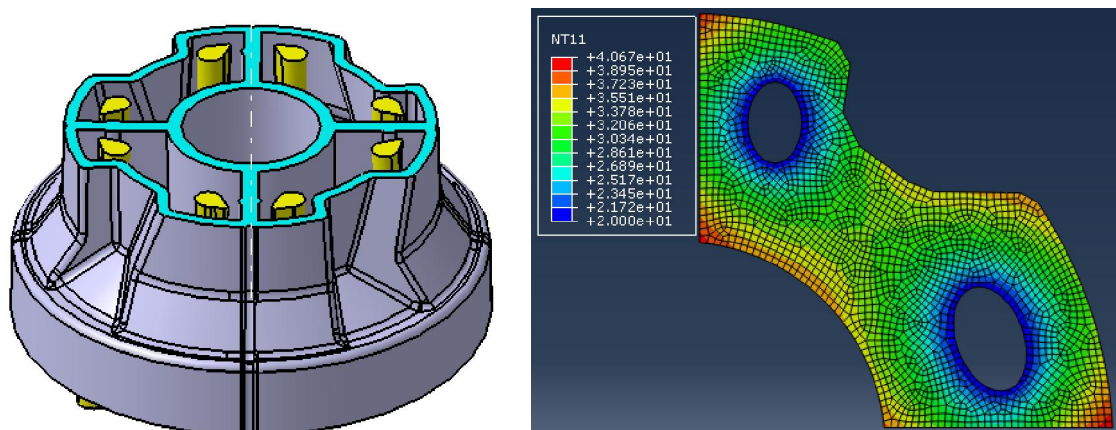
Hình 5. Kênh làm mát truyền thống (a), sự phân bố nhiệt độ trong lòng khuôn: phần khuôn cái (b) và phần khuôn đực (c) thu được bằng mô phỏng

Căn cứ và đặc điểm hình học của sản phẩm đúc, kênh làm mát cong được phát thảo như hình 6 dựa trên nguyên tắc những vùng mà nhiệt độ bề mặt khuôn cao thì cần bố trí được làm mát gần với bề mặt đó. Ngoài ra cũng phải chú ý đến tính công nghệ trong kết cấu của quá trình in 3D như chiều dày tối thiểu của vách có thể in được, đường kính lỗ có thể in được, kết cấu kênh làm mát sao cho không phải in hệ thống chống đỡ (support structure).



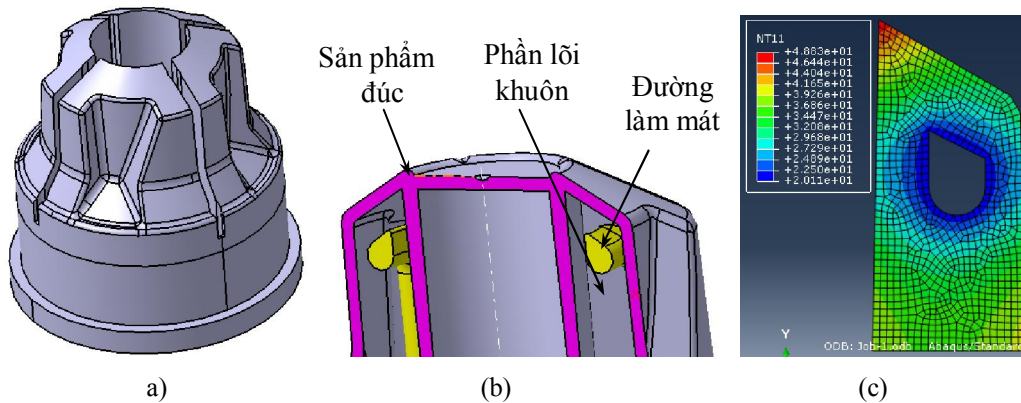
Hình 6. Phác thảo hệ thống làm mát bám theo bề mặt của lòng khuôn

Bước tiếp theo của quá trình tối ưu hóa hệ thống kênh làm mát là xác định kích thước hợp lý của tiết diện ngang và vị trí của phù hợp của tiết diện sao cho phân số nhiệt độ trên bề mặt lòng khuôn và đồng đều nhất có thể và nhiệt độ trung bình trên bề mặt khuôn bằng nhiệt độ mong muốn để thời gian làm nguội là ngắn nhất và chất lượng sản phẩm đảm bảo. Phương pháp sử dụng để tối ưu hóa kích thước và vị trí của kênh làm mát là sử dụng ngôn ngữ lập trình Python để tạo file script chạy tự động chương trình vẽ hệ thống mặt cắt ngang của hệ thống làm mát tại các vị trí quan trọng và tự động phân tích cũng như xuất kết quả về sự phân bố nhiệt độ trong phần mềm Abaqus. Đối với mặt cắt ngang, diện tích mặt cắt ngang hợp lý là hình elip hơn là hình tròn vì đặc điểm của vùng không gian của lõi khuôn. Với tiết diện hình elip, chu vi tiếp xúc của môi chất làm mát với khuôn lớn hơn so với hình tròn với cùng một diện tích.

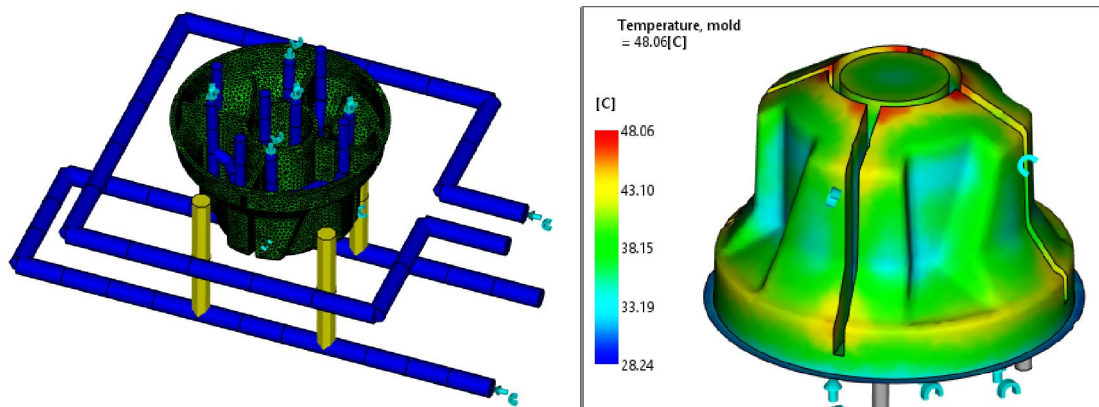


Hình 7. Tối ưu hóa hình dáng và kích thước tiết diện của kênh làm mát bằng phương pháp phần tử hữu hạn với sự hỗ trợ của máy tính.

Đối với phần chóp của lõi khuôn, do đặc thù hình dáng của sản phẩm, nếu cắt dọc theo sản phẩm sẽ thấy mặt cắt ngang của đường nước làm mát như hình 8. Mặt cắt ngang của đường làm mát có dạng hình giọt nước để đảm bảo tính công nghệ trong kết cấu của in 3D. Dạng hình giọt nước rộng sẽ giúp loại bỏ kết cấu chống đỡ khi in. Nếu phải in kết cấu chống đỡ, rất khó loại bỏ hệ thống cột chống đỡ sâu bên trong đường làm mát ngoằn ngoèo sâu bên trong lõi khuôn, gây tắc hệ thống đường dẫn nước làm mát.



Hình 8. Cấu tạo của lõi khuôn (a), hình dáng tiết diện ngang của đường làm mát tại vị trí chóp của lõi khuôn (b) và tối ưu hóa hình dáng và vị trí của tiết diện (c).



Hình 9. Kết quả mô phỏng sự phân bố nhiệt độ trên lõi khuôn với hệ thống làm mát bám theo bề mặt cong chi tiết với thời gian làm nguội 10 giây.

Về mặt lý thuyết, nếu dùng vật liệu có hệ số dẫn nhiệt lớn thì hiệu năng làm mát càng lớn. Tuy nhiên vấn đề phát sinh trong công nghệ in 3D kim loại đó là rất dễ xảy ra hiện tượng nứt do nhiệt khi in các vật liệu có hệ số dẫn nhiệt lớn và có hàm lượng cac-bon cao. Do vậy, trong nghiên cứu này, vật liệu bột kim loại tương đương với thành phần của thép mactensit hóa già (maraging steel) có hàm lượng cac-bon thấp nhưng có độ bền cao được sử dụng để in lõi của khuôn. Hệ số dẫn nhiệt của thép mactensit hóa già là $23 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$. Kết quả mô phỏng hệ thống làm mát bám theo bề mặt cong của chi tiết đúc bằng phần mềm Moldflow như hình 9. Kết quả cho thấy với thời gian làm nguội 10 giây, nhiệt độ cao nhất trên bề mặt lõi khuôn giảm còn 48°C , nhiệt độ trung bình trên bề mặt khuôn khoảng 42°C . Đồng thời, kết quả phân tích cũng cho thấy nhiệt độ trên bề mặt của lõi khuôn phân bố khá đồng đều.

Như vậy, với chi tiết đúc trong nghiên cứu này, thời gian làm nguội đã giảm từ 20 xuống còn khoảng 10 giây, tức là đã giảm được 50% thời gian làm nguội. Đây là một con số có ý nghĩa về mặt hiệu quả kỹ thuật rất lớn. Giảm được thời gian làm nguội sẽ rút ngắn được thời gian chu kỳ của sản phẩm, dẫn đến tiết kiệm được thời gian và năng lượng, hạ giá thành sản phẩm. Kết quả nghiên cứu là một phần của nội dung của dự án liên kết của trường đại học, viện nghiên cứu và công ty sản xuất liên quan đến công nghệ sản xuất vật liệu bột, công nghệ in 3D kim loại dùng tia laser (SLS) và kỹ thuật thiết kế chế tạo khuôn nhựa để tăng hiệu quả làm mát của khuôn nhờ công nghệ in 3D đang được triển khai tại Hàn Quốc mà nhóm nghiên cứu chúng tôi đang tham gia. Hai bộ khuôn mẫu đã được chế tạo: một bộ khuôn có đường làm mát truyền thống chế tạo hoàn toàn bằng thép KP-4M và một bộ khuôn có hệ thống làm mát chế tạo bằng thép mactensit hóa già cho phần lõi theo phương pháp in 3D trong đó có đường làm mát bám theo bề mặt chi tiết đúc sẽ thử nghiệm để minh chứng kết quả. Vì lý do chưa được phép công bố kết quả thực nghiệm nên không được phép trình bày trực tiếp trong bài báo này. Kết quả thực nghiệm sẽ được trình bày tại hội nghị. Kết quả thực tế có sai số so với mô phỏng, tuy nhiên sai số có thể chấp nhận được trong kỹ thuật và cho thấy kết quả tính toán tương đối trùng khớp với thực nghiệm.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã trình bày hệ thống kênh làm mát theo đường cong bám theo bề mặt của lòng khuôn (conformal cooling channel), được chế tạo bằng phương pháp in 3D kim loại nung chảy bằng tia laser. Phương pháp tính toán thiết kế hệ thống làm mát tối ưu cả về hiệu năng cũng như đảm bảo tính công nghệ trong kết cấu đối với phương pháp in 3D được giới thiệu thông qua một ví dụ minh họa của cho một sản phẩm nhựa. Để tối ưu hóa hệ thống làm mát khuôn, các phương pháp giải tích, kinh nghiệm thiết kế cũng như các công cụ phân tích mô phỏng bằng máy tính (CAE) được sử dụng một cách kết hợp. Kết quả nghiên cứu cho thấy, khả năng tăng được hiệu quả làm mát nếu sử dụng hệ thống làm nguội mới phụ thuộc vào độ phức tạp của sản phẩm đúc. Nghiên cứu cho thấy, với chi tiết có hình dáng phức tạp đối với hệ thống làm mát truyền thống, nếu thiết kế kênh làm mát tối ưu có thể giảm thời gian làm nguội sản phẩm đến 50%, bên cạnh đó, chất lượng sản phẩm cũng tốt hơn. Đây là một minh chứng cho thấy tính hiệu quả kỹ thuật của công nghệ in 3D trong công nghiệp chế tạo khuôn mẫu mặc dù giá thành chế tạo bằng công nghệ in 3D kim loại vẫn tương đối cao vì giá kim loại bột cao và thời gian in tương đối lâu đối với các sản phẩm lớn. Nghiên cứu về hiệu quả kỹ thuật mang lại so với chi phí đầu tư cho gia công khuôn với công nghệ in 3D sẽ là những nghiên cứu tiếp theo cần được triển khai.

LỜI CẢM ƠN

Tác giả cảm ơn sự hỗ trợ của Trường Đại học Nha Trang và Trường Đại học Ulsan.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Wu T., S. A. Jahan, Y. Zhang, J. Zhang, H. Elmounayri, and A. Tovar. Design Optimization of Plastic Injection Tooling for Additive Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, vol. 10, pp. 923-934, 2017/01/01/ 2017.
- [2]. Rännar L. E., A. Glad, and C. G. Gustafson. Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting. *Rapid Prototyping Journal*, vol. 13, pp. 128-135, 2007.
- [3]. Shayfull Z., S. Sharif, A. M. Zain, M. F. Ghazali, and R. M. Saad. Potential of Conformal Cooling Channels in Rapid Heat Cycle Molding: A Review. *Advances in Polymer Technology*, vol. 33,, 2014.

- [4]. Jahan S. A. and H. El-Mounayri. Optimal Conformal Cooling Channels in 3D Printed Dies for Plastic Injection Molding. *Procedia Manufacturing*, vol. 5, pp. 888-900, 2016.
- [5]. Vojnová E.. The Benefits of a Conforming Cooling Systems the Molds in Injection Moulding Process. *Procedia Engineering*, vol. 149, pp. 535-543, 2016.
- [6]. Ahn D.-G., S.-H. Park, and H.-S. Kim. Manufacture of an injection mould with rapid and uniform cooling characteristics for the fan parts using a DMT process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 11, pp. 915-924, 2010.
- [7]. Wu T., S. A. Jahan, P. Kumaar, A. Tovar, H. El-Mounayri, Y. Zhang, J. Zhang, D. Acheson, K. Brand, and R. Nalim, . A Framework for Optimizing the Design of Injection Molds with Conformal Cooling for Additive Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, vol. 1, pp. 404-415, 2015.
- [8]. Khan M., S. K. Afaq, N. U. Khan, and S. Ahmad. Cycle Time Reduction in Injection Molding Process by Selection of Robust Cooling Channel Design. *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2014, p. 8, 2014.
- [9]. Park H.S. and Dang X.P., Improving the Cooling Efficiency for the Molding of a Complex Automotive Plastic Part by 3D Printing Technology. *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers - Vol. 25, No. 4*, pp.508-515.
- [10]. Park H.S. and Dang X.P., Development of a smart plastic injection mold with conformal cooling channels. *Procedia Manufacturing* 10 (2017) 48–59.
- [11]. Park H.S. and Dang X.P., Maximize the Efficiency of Cooling Channels Made by 3D Printing Technology for Injection Molding. *International Symposium on Precision Engineering and Sustainable Manufacturing, (PRESM2018)*.
- [12]. Park S. J. and T. H. Kwon. Optimal cooling system design for the injection molding process. *Polymer Engineering & Science*, vol. 38, pp. 1450-1462, 1998.
- [13]. Holman J. P., *Heat transfer*, 9th edition ed.: McGraw-Book Company, 2002.
- [14]. Rao N. S. and G. Schumacher, *Design formulas for plastics engineers*, 2nd edition ed.: Hanser Verlag Munich 2004.
- [15] Park, H.-S. and X.-P. Dang, Optimization of conformal cooling channels with array of baffles for plastic injection mold, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 11(6): pp. 879-890, 2010.