

XÂY DỰNG BỘ CÔNG CỤ LẬP TRÌNH MACRO ĐỂ GIA CÔNG CÁC CHI TIẾT HÌNH CÔN BẰNG PHƯƠNG PHÁP GIA TĂNG TẮM KIM LOẠI TRÊN MÁY PHAY CNC

DEVELOPMENT OF A MACRO PROGRAMMING TOOLKIT FOR MACHINING CONICAL PARTS BY INCREMENTAL SHEET FORMING ON CNC MILLING MACHINES

Nguyễn Hồng Linh
Trường Đại học Điện lực

Email: linhnh@epu.edu.vn

TÓM TẮT

Công nghệ tạo hình gia tăng tấm kim loại là phương pháp tạo hình linh hoạt, phù hợp với sản xuất đơn chiếc và chế tạo mẫu nhanh không yêu cầu khuôn chuyên dùng. Tuy nhiên, việc xây dựng đường chạy dao bằng các phần mềm CAD/CAM truyền thống vẫn tốn nhiều thời gian và khó hiệu chỉnh khi thay đổi kích thước hình học. Nội dung nghiên cứu này tập trung xây dựng bộ công cụ lập trình Macro nhằm tự động tạo chương trình G-code cho các chi tiết côn tròn và côn chữ nhật trong gia công ISF trên máy phay CNC. Các thông số hình học và thông số công nghệ được tham số hóa để tự động xác định tọa độ đường chạy dao và sinh chương trình gia công bằng ngôn ngữ FANUC Macro B. Đồng thời, bộ công cụ được phát triển trên nền tảng Visual Studio nhằm hỗ trợ nhập dữ liệu và kết xuất tự động chương trình G-code phục vụ gia công ISF.

Từ khóa: Công nghệ tạo hình gia tăng tấm kim loại; Lập trình Macro; Công nghệ CAD/CAM.

ABSTRACT

Incremental Sheet Forming (ISF) is a flexible forming method suitable for single-unit production and rapid prototyping without requiring specialized dies. However, generating toolpaths using traditional CAD/CAM software remains time-consuming and difficult to adjust when geometric dimensions change. This research focuses on developing a Macro programming toolkit to automatically generate G-code programs for circular and rectangular conical parts in ISF on CNC milling machines. Geometric and process parameters are parameterized to automatically determine toolpath coordinates and generate machining programs using the FANUC Macro B language. Additionally, the toolkit is developed on the Visual Studio platform to support data input and automatically export G-code programs for ISF applications.

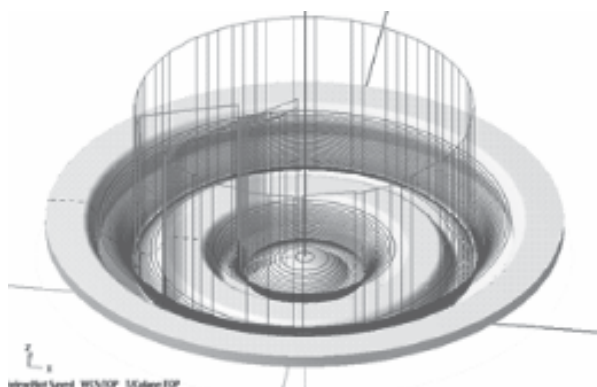
Keywords: Incremental Sheet Forming; Macro Programming; CAD/CAM Technology.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

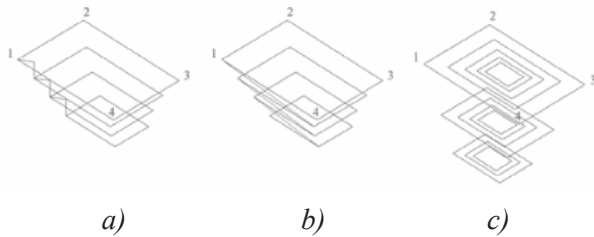
Trong những năm gần đây, công nghệ tạo hình gia tăng tấm kim loại (Incremental Sheet Forming – ISF) đã thu hút được nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu nhờ tính ứng dụng cao trong sản xuất tạo mẫu nhanh hoặc sản xuất chi tiết dạng tấm lớn với chi phí sản xuất thấp và tính linh hoạt cao. Khác với phương pháp gia công áp lực truyền thống, phương pháp ISF không yêu cầu hệ thống khuôn chuyên dùng, phù hợp với dạng sản xuất lô nhỏ và sản phẩm cá thể hóa [1÷4].

Các hệ thống CAD/CAM hiện đại ngày nay đã hỗ trợ rất mạnh mẽ cho quá trình lập trình gia công ISF trên các máy CNC hoặc cánh tay robot, tuy nhiên việc xây dựng đường chạy dao cho các hình dạng ISF trên các hệ thống CAD/CAM vẫn đòi hỏi nhiều thao tác thủ công và phải xây dựng lại mô hình khi thay đổi kích thước hình học. Lập trình Macro được phát triển nhằm tự động hóa quá trình tạo đường chạy dao trên máy CNC, cho phép thay đổi linh hoạt các tham số hình học mà không cần xây dựng lại chương trình gia công bằng phần mềm CAM truyền thống [5÷7]. Phương pháp này giúp đơn giản hóa quá trình lập trình, nâng cao khả năng tái sử dụng mã lệnh và thuận tiện cho việc hiệu chỉnh kích thước chi tiết trong các nghiên cứu thực nghiệm. Bên cạnh đó, mã G-code được tạo ra có cấu trúc ngắn gọn, dễ chỉnh sửa và phù hợp với các bài toán nghiên cứu hoặc sản xuất linh hoạt. Vì vậy, việc ứng dụng lập trình Macro được xem là một giải pháp hiệu quả nhằm rút ngắn thời gian chuẩn bị gia công và hỗ trợ quá trình nghiên cứu công nghệ tạo hình gia tăng tấm kim loại.



Hình 1. Chương trình G-code trong gia công ISF

Ngoài ra, chất lượng tạo hình trong phương pháp ISF phụ thuộc nhiều vào các chiến lược chạy dao. Quỹ đạo chuyển động của dụng cụ ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác kích thước, sai lệch hình dạng, chất lượng bề mặt và lực tạo hình. Các chiến lược chạy dao phổ biến thường được sử dụng trong phương pháp ISF là chiến lược chạy dao hướng trong được mô tả trên hình 2a (trong chiến lược chạy dao này, dụng cụ sẽ di chuyển theo contour ngoài của tiết diện trên cùng một mặt phẳng cho đến khi quay trở lại vị trí bắt đầu. Sau đó, dụng cụ dịch chuyển theo phương thẳng đứng xuống dưới một khoảng bằng khoảng dịch dao để thực hiện lớp gia công kế tiếp), chiến lược chạy dao xoắn ốc mô tả trên hình 2b (Chiến lược chạy dao này, dụng cụ di chuyển liên tục mà không xuất hiện bước chuyển lớp đột ngột như chiến lược chạy dao hướng trong để tạo sự ổn định trong quá trình gia công), chiến lược chạy dao hướng ngoài mô tả trên hình 2c (Trong chiến lược chạy dao hướng ngoài, dụng cụ bắt đầu di chuyển từ tâm của mặt phẳng gia công và dịch chuyển dần ra phía biên ngoài với một bước tiến ngang xác định cho đến khi đạt đến chu vi ngoài của lớp tạo hình hiện tại. Sau đó, dụng cụ quay trở lại vị trí tâm để hạ xuống theo phương thẳng đứng như đã thiết lập để chuyển sang lớp kế tiếp).



Hình 2. Các chiến lược chạy dao thường dùng trong phương pháp ISF

2. XÂY DỰNG BỘ CÔNG CỤ

2.1. Thông số hình học

Đối tượng nghiên cứu của bài báo là hình côn chữ nhật và côn tròn được xác định bởi các thông số:

- Chiều dài miệng côn: L (mm);
- Chiều rộng miệng côn: B (mm);
- Chiều dài đáy côn: l (mm);
- Chiều rộng đáy côn: b (mm);
- Chiều cao côn: H ;
- Bán kính miệng côn: R (mm);
- Bán kính đáy côn: r (mm);
- Góc nghiêng côn: α (độ).

Công thức quy đổi kích thước hình học:

Đối với hình côn tròn:

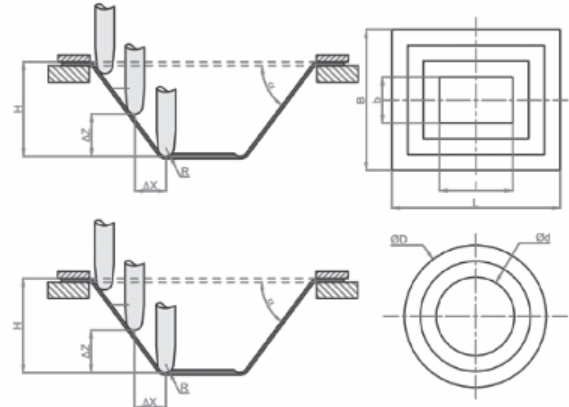
$$\tan(\alpha) = 2H/(D - d) \quad (1)$$

Đối với hình côn chữ nhật:

$$\tan(\alpha) = 2H/(L - l) \quad (2)$$

Ngoài ra, chúng ta có các thông số hình học công nghệ gia công gồm:

- Khoảng dịch dao dọc: ΔZ (mm);
- Bán kính dụng cụ cắt: R (mm);
- Khoảng dịch dao ngang: ΔX (mm).

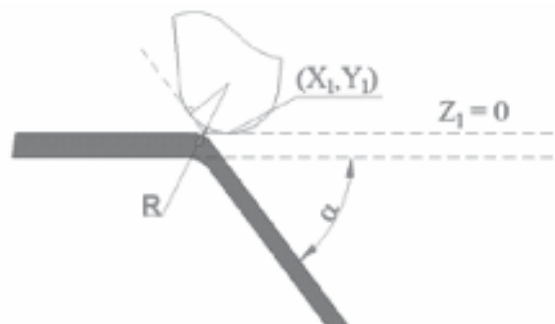


Hình 3. Thông số hình học côn tròn và côn chữ nhật

2.2. Xây dựng chương trình macro

Để xây dựng được Macro cho chương trình gia công, chúng ta cần xác định các giá trị biến cho tham số đầu vào của chương trình, cụ thể ở đây là tọa độ các điểm đích trong chương trình gia công. Các bước xác định tọa độ các điểm đích được thực hiện theo các bước:

Bước 1: Xác định tọa độ các điểm đích ban đầu.



Hình 4. Tọa độ điểm đích contour bắt đầu

Do dụng cụ gia công trong phương pháp ISF thường là chi tiết hình cầu nên điểm điều khiển dụng cụ (mũi dụng cụ) và điểm gia công (điểm tiếp tuyến) sẽ không trùng nhau. Chính vì vậy mà khi bắt đầu gia công, chúng ta cần

xác định các tọa độ điểm đích của contour bắt đầu gia công ($Z_1 = 0$) theo công thức:

Đối với tiết diện chữ nhật:

$$X_1 = L/2 - \text{tg}(\alpha) \text{ và } Y_1 = H/2 - \text{tg}(\alpha) \quad (3)$$

Đối với tiết diện tròn:

$$X_1 = Y_1 = D/2 - \text{tg}(\alpha) \quad (4)$$

Bước 2: Xác định số lớp cắt.

Số lớp cắt được xác định bằng tỉ số giữa chiều cao côn với lượng dịch dao dọc được làm tròn lên theo công thức (4). Khi đó, các lớp cắt đầu sẽ được lập trình theo giá trị ΔZ còn lớp cắt cuối cùng được lập trình theo công thức (5):

$$n = [H/\Delta Z] \quad (5)$$

$$\Delta Z_{\text{cuối}} = H - n * \Delta Z \quad (6)$$

Bước 4: Xác định giá trị tọa độ các điểm đích của đường chạy dao lớp kế tiếp theo công thức:

$$X_{i+1} = X_i - \Delta X, Z_{i+1} = Z_i - \Delta Y, Z_{i+1} = Z_i + \Delta Z \quad (7)$$

Trong đó: $\Delta X = \Delta Y = \Delta Z / \text{tg}(\alpha)$

Bước 5: Lặp lại bước 4 cho đến giá trị (n-1).

Bước 6: Xác định tọa độ ($X_{\text{cuối}}, Y_{\text{cuối}}, Z_{\text{cuối}}$) theo công thức (6) và (7).

Sau khi có tọa độ các biến, chúng ta sẽ xây dựng các Macro bằng ngôn ngữ FANUC Macro B theo các tham số. Sau đây là cấu trúc chương trình Macro gia công hình côn tròn:

```
%
O1000
#100 = "DK BAN
DAU O BUOC 1"
#101 = "DK CUOI O
BUOC 6"
#102 = "CHIEU SAU
CON"
#103 = "BUOC DICH
DAO DOC"
#104 = 0
#105 = #100
#106 = [#100-#101] /
[#102/#103]
G21 G17 G90 G80
G49 G40
M3 S1000
G0 Z5
G0 X#105 Y0
WHILE [#104 GT
-#102] DO1
G1 Z#104 F800
G02 X#105 Y0 I[-
#105] J0 F1200
#104 = #104 - #103
IF [#104 LT -#102]
THEN #104 = -#102
#105 = #105 -
#106
IF [#105 LT #101]
THEN #105 = #101
G0 X#105 Y0
END1
G1 Z-#102
G02 X#105 Y0 I[-
#105] J0
G0 Z50
M30
%
```

2.3. Xây dựng công cụ tạo file G_code

Bộ công cụ tạo file G_code được lập trình trên phần mềm Visual Studio với giao diện chính như mô tả trên hình 5. Ở giao diện này, chúng ta có thể lựa chọn đối tượng lập trình là G_code cho hình côn tròn hoặc hình côn chữ nhật.



Hình 5. Giao diện chính của bộ công cụ

Sau khi lựa chọn đối tượng lập trình, bộ công cụ sẽ chuyển sang giao diện để nhập

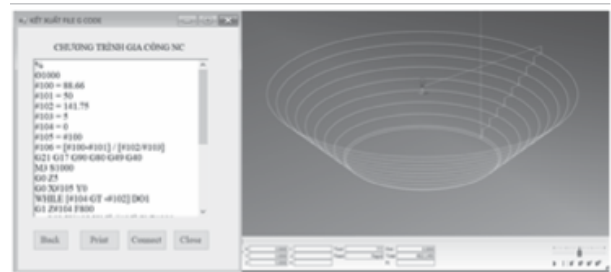
thông số hình học của chi tiết và các thông số gia công của chương trình gia công như trên hình 6.

Biên dạng	
Thông số hình học	
Chiều cao (H)	
Chiều rộng miệng cống (B)	
Chiều dài miệng cống (L)	
Góc nghiêng	
Chiều rộng đáy cống (b)	
Chiều dài đáy cống (l)	
Dộ nhám bề mặt (Ra)	
Sai lệch hình dạng cho phép	
TÍNH TOÁN QUY ĐỔI THẠT	

Thông số gia công	
Chiến lược chạy dao	Xoắn ốc
Bước tiến (F)	mm/phút
Tốc độ quay trục chính (S)	Vòng/phút
Lượng dịch dao dọc (Z)	mm

Hình 6. Giao diện chính của bộ công cụ

Tại giao diện này, chúng ta tiến hành nhập thông số cần lập trình và tiến hành “kết xuất” chương trình Macro, chương trình Macro này sẽ được sử dụng trực tiếp trên máy gia công CNC để tiến hành gia công theo phương pháp ISF.



Hình 7. Kết quả kết xuất chương trình Macro

3. THỰC NGHIỆM GIA CÔNG

Bảng 1. Các yếu tố lập trình gia công

TT	Thông số	Ký hiệu	Đơn vị	Cấp độ			
				1	2	3	4
1	Chiều sâu cắt dọc	ΔZ	mm	0,1	0,2	0,3	0,4
2	Bước tiến	F	mm/phút	500	1000	1500	2000
3	Tốc độ quay trục chính	S	Vòng/phút	1000	2000	3000	4000
4	Đường kính dao	D	mm	8	10	12	14
5	Góc nghiêng	α	Độ	72,5	75	77,5	80

Sử dụng bộ công cụ xây dựng chương trình Macro để tiến hành gia công ISF trên máy phay CNC 3 cho vật liệu hợp kim nhôm A6061 có kích thước 200×200×2 mm với các cấp thực nghiệm như trên bảng 1 đã cho thấy sự cải thiện đáng kể về thời gian lập trình bằng công cụ xây dựng chương trình Macro so với phương pháp lập trình CAM truyền thống khi gia công ISF (cụ thể kết quả thực nghiệm cho thấy bộ công cụ đã giúp giảm khoảng 60% thời gian lập trình). Ngoài ra, chi tiết được tạo hình khi gia công đạt độ chính xác hình học tương đối tốt. Sai lệch hình dạng so với lập trình bằng phần mềm Master Cam là không đáng kể, chủ

yếu xuất hiện tại một số vị trí do ảnh hưởng của hiện tượng đàn hồi.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã phát triển thành công bộ công cụ lập trình Macro trên nền tảng Visual Studio, giải quyết hiệu quả hạn chế về thời gian và khả năng hiệu chỉnh của các phần mềm CAD/CAM truyền thống trong công nghệ tạo hình gia tăng tấm kim loại. Thông qua việc tham số hóa các thông số hình học và công nghệ, hệ thống cho phép tự động hóa hoàn toàn quy trình tính toán đường chạy dao và xuất 

chương trình G-code bằng ngôn ngữ FANUC Macro B cho các chi tiết côn tròn và côn chữ nhật trên máy phay CNC. Kết quả này không chỉ tối ưu hóa quy trình chuẩn bị gia công, nâng cao tính linh hoạt cho phương pháp ISF trong sản xuất đơn chiếc và tạo mẫu nhanh, mà còn mở ra hướng ứng dụng hiệu quả giải pháp lập trình tham số vào thực tiễn sản xuất cơ khí. ❖

Ngày nhận bài: **25/5/2026**

Ngày phản biện: **05/6/2026**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Shakir Gatea, Hengan Ou, Graham McCartney, “*Review on the influence of process parameters in incremental sheet forming*”. Int J Adv Manuf Technol p479-499, 2016.
- [2]. Lotfi Ben Said, “*The incremental sheet forming: technology, modeling and formability: A brief review*”. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol 236, Issue 6, 2022.
- [3]. Chang Z, Chen J, “*Investigations on the forming characteristics of a novel flexible incremental sheet forming method for low-ductility metals at room temperature*”. J Mater Process Technol, 2022.
- [4]. Matthieu Rauch, Jean-Yves Hascoet, Jean-hristophe Hamann, Yannick Plenel, “*Tool path programming optimization for incremental sheet forming applications*”. Computer-Aided Design, Vol 41, Issue 12, p877-885, 2009.
- [5]. Lu, B, “*Comparative Study of Macro Program Machining and CAM 2.5D Machining for Press Dies Manufacturing*”. Journal Material dan Proses Manufaktur, Vol.8, No.2, p138-145, 2024.
- [6]. O.Rodriguez Alabanda, P.E.Romero and G.Guerrero-Vaca, “*Application of custom macro B high level CNC programming language in a five-axis milling machine for drilling holes distributed in axi-symmetric working planes*”. In Procedia Manufacturing, Elsevier B.V, p976-983, 2019.
- [7]. P. Smid, “*FANUC CNC Custom Macros*”, 2005, Available: www.industrialpress.com