BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

MA VĂN VIỆT

NGHIÊN CỨU TẠO HÌNH KIM LOẠI TẤM BẰNG CÔNG NGHỆ BIẾN DẠNG GIA TĂNG ĐA ĐIỂM

(TPIF – Two Point Incremental Forming)

LUẬN ÁN TIẾN SĨ
NGÀNH: KỸ THUẬT CƠ KHÍ

Tp. Hồ Chí Minh, tháng …/12/2022

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

MA VĂN VIỆT

NGHIÊN CỨU TẠO HÌNH KIM LOẠI TẤM BẰNG CÔNG NGHỆ BIẾN DẠNG GIA TĂNG ĐA ĐIỂM

(TPIF – Two Point Incremental Forming)

NGÀNH: KỸ THUẬT CƠ KHÍ - MÃ SỐ: 9520103

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS.TS. LÊ VĂN SỸ
Người hướng dẫn khoa học 2: PGS.TS. NGUYỄN TRƯỜNG THỊNH

Phản biện 1:
Phản biện 2:
Phản biện 3:

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 12/2022

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

Số: 18816/QĐ-ĐHSPKT

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập – Tự do – Hạnh phúc

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 01 tháng 10 năm 2018

QUYẾT ĐỊNH

V.v giao đề tài luận án và người hướng dẫn NCS khóa 2018 - 2021

HIỆU TRƯỞNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

Căn cứ Quyết định số 426/TTg ngày 27 tháng 10 năm 1976 của Thủ tướng Chính phủ về một số vấn đề cấp bách trong mạng lưới các trường đại học và Quyết định số 118/2000/QĐ-TTg ngày 10 tháng 10 năm 2000 của Thủ tướng Chính phủ về việc tổ chức lại Đại học Quốc gia Thành Phố Hồ Chí Minh, tách Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh trực thuộc Bộ Giáo dục và Đào tạo;

Căn cứ Quyết định số 70/2014/QĐ-TTg ngày 10 tháng 12 năm 2014 của Thủ tướng Chính phủ về việc ban hành Điều lệ trường Đại học;

Căn cứ Quyết định số 937/QĐ-TTg ngày 30 tháng 6 năm 2017 về việc phê duyệt đề án thí điểm đổi mới cơ chế hoạt động của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh;

Căn cứ Thông tư số 08/2017/TT-BGDĐT ngày 04 tháng 4 năm 2017 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc Ban hành Qui chế tuyển sinh và đào tạo trình độ tiến sĩ;

Xét nhu cầu công tác và khả năng cán bộ;

Xét đề nghị của Trưởng phòng Đào tạo,

QUYẾT ĐỊNH:

Điều 1. Giao đề tài luận án tiến sĩ và người hướng dẫn cho:

Nghiên cứu sinh : ***Ma Văn Việt***

Ngành : ***Kỹ thuật cơ khí*** Khoá: ***2018 – 2021***

Tên luận án : ***Nghiên cứu tạo hình kim loại tấm bằng công nghệ biến dạng gia tăng đa điểm***

Người HD thứ nhất (HD chính): ***PGS.TS. Lê Văn Sỹ***

Người HD thứ hai : ***PGS.TS. Nguyễn Trường Thịnh***

Thời gian thực hiện : ***01/10/2018 đến 01/10/2021***

Điều 2. Giao cho Phòng Đào tạo quản lý, thực hiện theo đúng Qui chế đào tạo trình độ tiến sĩ của Bộ Giáo dục & Đào tạo đã ban hành.

Điều 3. Trưởng các đơn vị, phòng Đào tạo, các Khoa quản ngành tiến sĩ và các Ông (Bà) có tên tại Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành quyết định này.

Quyết định có hiệu lực kể từ ngày ký./.

Nơi nhận :
- BGH (để biết);
- Như điều 2, 3;
- Lưu: VT, SĐH (4b).

KT. HIỆU TRƯỞNG
PHÓ HIỆU TRƯỞNG

TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

PGS. TS Lê Hiếu Giang

LÝ LỊCH KHOA HỌC

I. LÝ LỊCH SƠ LƯỢC:

Họ & tên: MA VĂN VIỆT Giới tính: Nam

Ngày, tháng, năm sinh: 08/08/1979 Nơi sinh: Phú Yên

Quê quán: Phú Yên Dân tộc: Kinh

Chỗ ở riêng hoặc địa chỉ liên lạc: 479/8 Trương Công Định, phường 7, Tp Vũng Tàu, tỉnh Bà Rịa - Vũng Tàu.

Điện thoại cơ quan: Điện thoại nhà riêng: 0988650748

Fax: E-mail: mavanviet2004@yahoo.com

II. QUÁ TRÌNH ĐÀO TẠO:

1. Trung học chuyên nghiệp:

Hệ đào tạo: Thời gian đào tạo từ ……/…… đến ……/

Nơi học (trường, thành phố):

Ngành học:

2. Đại học:

Hệ đào tạo: Thời gian đào tạo từ 09/1998 đến 03/2003

Nơi học (trường, thành phố): Đại học Bách khoa tp Hồ Chí Minh

Ngành học: Cơ khí chế tạo máy

Tên đồ án, luận án hoặc môn thi tốt nghiệp: Thiết kế máy trộn bê tông hình quả trám.

Ngày & nơi bảo vệ đồ án, luận án hoặc thi tốt nghiệp: năm 2003 tại Đại học Bách khoa tp Hồ Chí Minh

Người hướng dẫn: TS. Trần Thị Hồng

3. Cao học:

Hệ đào tạo: Thời gian đào tạo từ 09/2003 đến 09/2005

Nơi học (trường, thành phố): Đại học Bách khoa tp Hồ Chí Minh

Ngành học: Cơ khí chế tạo máy

Tên đồ án, luận án hoặc môn thi tốt nghiệp: cân bằng động roto trục mềm

Ngày & nơi bảo vệ đồ án, luận án hoặc thi tốt nghiệp: năm 2005 tại Đại học Bách khoa tp Hồ Chí Minh

Người hướng dẫn: TS. Nguyễn Tuấn Kiệt

III. QUÁ TRÌNH CÔNG TÁC CHUYÊN MÔN KỂ TỪ KHI TỐT NGHIỆP ĐẠI HỌC:

Thời gian	Nơi công tác	Công việc đảm nhiệm
2005-2006	Trường cao đẳng kinh tế kỹ thuật công nghiệp 2	Giảng viên
2006-2008	Công ty PTSC M&C	Cán bộ kỹ thuật
2008-2009	Trường cao nghề Dầu khí Việt Nam	Giảng viên
2009-2011	PTSC Phu My Port	Chuyên viên kỹ thuật
2011-2014	PVC-MS	Cán bộ kỹ thuật
2014-Nay	PVD Tech	Cán bộ kỹ thuật

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong Luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tp. Hồ Chí Minh, ngày … tháng 12 năm 2022

(Ký tên và ghi rõ họ tên)

Ma Văn Việt

LỜI CẢM ƠN

Tôi xin cảm ơn sự hướng dẫn nhiệt tình của PGS.TS. Lê Văn Sỹ, PGS.TS. Nguyễn Trường Thịnh; quý thầy cô Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Dầu khí Việt Nam; Khoa Cơ khí Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật thành phố Hồ Chí Minh, Khoa Cơ khí Trường Đại học Bách khoa thành phố Hồ Chí Minh; Phòng Thí nghiệm trọng điểm Điều khiển số và kĩ thuật hệ thống, Phòng Thí nghiệm Công nghệ thiết kế và gia công tiên tiến - Đại học Quốc gia thành phố Hồ Chí Minh; Phòng Đào tạo sau Đại học - Đại học Sư Phạm Kỹ thuật thành phố Hồ Chí Minh; sự động viên từ cơ quan, bạn bè và đồng nghiệp. Đặc biệt, xin cảm ơn gia đình và người thân đã hỗ trợ và động viên tôi trong suốt quá trình làm luận án.

Xin chân thành cảm ơn.

TÓM TẮT

Xét trên giao diện rộng, yếu tố chất lượng và mẫu mã sản phẩm luôn là tiêu chí được các nhà sản xuất quan tâm hàng đầu. Nắm bắt nhu cầu, thị hiếu ngày càng cao của khách hàng, nhiều nhà sản xuất luôn chủ động thay đổi về hình dạng, mẫu mã và kích thước sản phẩm; giảm thời gian thiết kế, hạ giá thành nhằm xác lập vị thế, tên tuổi và giá trị của thương hiệu trong môi trường cạnh tranh bình đẳng. Xét trên giao diện hẹp, đối với ngành tạo hình từ kim loại tấm, công nghệ tạo hình biến dạng gia tăng cục bộ (ISF) cũng không ngoại lê. Với phạm vi ứng dụng rộng, công nghệ tạo hình ISF đã được nhiều nhà khoa học ứng dụng quan tâm. Họ đã đẩy công nghệ này lên một bước, tích hợp và tiến kịp cùng với sự phát triển của công nghệ số. Trong đó, TPIF là một trong những phương pháp tạo hình biến dạng gia tăng cục bộ tấm vật liệu. Lợi thế của TPIF là tạo ra sản phẩm vừa có độ chính xác hình học, vừa đảm bảo chất lượng bề mặt. Công nghệ này không dùng khuôn; kích thước mẫu mã linh hoạt, chi phí thấp, hiệu quả kinh tế cao. Nguyên lý cơ bản là sử dụng chuyển động của máy CNC với đầu dụng cụ tạo hình không cạnh cắt để biến dạng vật liệu tấm theo từng lớp cho đến khi hình dạng sản phẩm hoàn thành.

Nghiên cứu khả năng tạo hình của vật liệu nhôm tấm A 1050 H14 bằng công nghệ TPIF. Luận án xác định khả năng biến dạng của vật liệu trên qua bốn thông số công nghệ, tập trung vào các nhiệm vụ chính sau đây:

1/ Bước tiến theo phương z, Δz (mm)

2/ Vận tốc dụng cụ V_{xy},

3/ Số vòng quay của trục chính n

4/ Đường kính dụng cụ D.

Khả năng biến dạng của vật liệu chính là góc tạo hình α (góc α hợp bởi bề mặt của chi tiết với phương ngang). Từ vật liệu, thông số công nghệ, luận án tập trung nghiên cứu các nội dung như sau:

- Mô phỏng quá trình TPIF tạo hình vật liệu tấm để dự đoán độ chính xác hình học, dự đoán phá hủy vật liệu và các ảnh hưởng của thông số công nghệ.

- Khảo sát khả năng biến dạng của vật liệu nhôm tấm bằng phương pháp TPIF theo các thông số công nghệ.

- Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo đồ gá cho công nghệ TPIF, dụng cụ tạo hình.

- Xây dựng mô hình khảo sát để khảo sát khả năng biến dạng của vật liệu tấm bằng công nghệ biến dạng gia tăng đa điểm với vật liệu nhôm thông qua mối liên hệ giữa các thông số công nghệ *(*Δz, V_{xy}, D, n).

- Khảo sát khả năng giảm ma sát tạo hình với các loại chất bôi trơn, hợp chất bôi trơn và phương pháp bôi trơn trong quá trình biến dạng TPIF.

ABSTRACT

Facing a complex competition on a global manufacturing market, the companies always change fastly the sharp and size of the products and reducing the designing and development of the products. The manufacturers have been looking for a new technologies which are able to response the best customer exigency. These technologies must to be flexible, simple, inexpensive process, specially, not much time for product design and development. The incremental sheet forming technology has emerged as the best choice for those requirements. Particularly, Two Point Incremental Forming process (TPIF), a method of incremental sheet forming, which was shown the higher geometric accuracy and deformation. This technology is moldless, flexible, low cost, economic efficiency which uses the movement of CNC machine tool to form sheet material by layer to layer to the final product shape.

The aim of the thesis is study formability and the objective surface quality of aluminum sheet A 1050 H14 by Two Point Incremental Forming (TPIF) technology with technological parameters (the forming depth (Δz), the feed rate (V_{xy}), the revolution per minute of spindle (n) and the diameter of tool (D)). Respond parameter is wall angle (α) that is made by the line of the deformed surface and the horizontal line, Objective surface quality parameters are profile of object, the roughness, and object thickness. Overall, the content of the thesis concerned some following points:

– Abaqus software is applied to simulate the TPIF process with aluminum sheet A 1050 H14, 1.5 mm thickness in order to define the relations among the parameters of forming with formability (wall angle α). The comparision of simulated and empirical results to carry out to interpret the convergence of two methods.

– Studying formability (mechanical failure on object) and kinds of broken by TPIF.

– Designed and manufactured jigs and forming tool for TPIF technology.

– Experimental study of forming specimens by specific SPIF machine with the technological 4 parameters to find the formability (forming angle α) of aluminum sheet A 1050 H14, 1.5 *mm* thickness. Studying the influential technological parameters (the forming depth Δz, the feed rate V_{xy}, the revolution per minute of spindle n, and the diameter of tool D) to the objective quality (profile of object, the roughness, and object thickness). So, we can control technological parameters to obtain good quality, to put into practice; to establish the equations of recursion of the objective parameters to get the optimal technological parameters.

– Studying lubrications and the lubricating way for TPIF process by investigating the four lubricants such as solid graphite powder, lubrication oil, lithium grease, and mixed lubrication.

MỤC LỤC

LÝ LỊCH KHOA HỌC.....ii
LỜI CAM ĐOAN iv
LỜI CẢM ƠN.....v
TÓM TẮT.....vi
ABSTRACT..... viii
MỤC LỤC.....x
DANH SÁCH CHỮ VIẾT TẮT..... xiii
DANH SÁCH CÁC KÝ HIỆU.....xiv
DANH SÁCH CÁC HÌNH xv
DANH SÁCH CÁC BẢNG.....xix
DANH SÁCH CÁC ĐỒ THỊ.....xx
MỞ ĐẦU.....1
Chương 1 TỔNG QUAN 7
1.1 Tổng quan về hướng nghiên cứu.....7
1.1.1 Tổng quan và phân loại ISF 9
1.1.2 Trong nước 12
1.1.3 Trên thế giới 14
Chương 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT.....26
2.1 Lý thuyết biến dạng kim loại.....26
2.2 Lý thuyết về quy hoạch thực nghiệm 30
2.2.1 Tổng quan và phương pháp quy hoạch thực nghiệm 30
2.2.2 Xác định các yếu tố đầu vào.....31
2.3 Mô phỏng phần tử hữu hạn trong ISF 32
2.3.1 Phương pháp tích phân tường minh (Explicit).....32
2.3.2 Ổn định của tích phân tường minh 33
2.3.3 Phương pháp tích phân tiềm ẩn (Implicit).....34

2.3.4 Ổn định của tích phân tiềm ẩn 34
Chương 3 HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM 36
3.1 Thiết bị và đồ gá cho ISF 36
3.1.1 Thiết bị thí nghiệm 36
3.1.2 Dụng cụ tạo hình 36
3.1.3 Đồ gá 37
3.2 Thiết kế đồ gá TPIF 38
3.3 Chất bôi trơn 38
3.4 Hình dạng chi tiết khảo sát 39
3.4.1 Các yếu tố ảnh hưởng 43
3.4.2 Ma trận thực nghiệm 45
3.4.3 Trình tự thực nghiệm: 46
3.5 Thông số kỹ thuật thiết bị đo sử dụng trong quá trình thực nghiệm 46
Các thiết bị đo tại phòng thí nghiệm đo lường cơ khí ĐHBK Tp. HCM được sử dụng đo như sau: 46
Chương 4 MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH TPIF 51
4.1 PPPTHH trong ISF 51
4.2 Mô hình hóa 51
4.3 Điều kiện biên, tạo lưới 53
4.3.1 Dưỡng tạo hình 53
4.3.2 Chi tiết 54
4.3.3 Dụng cụ tạo hình 56
4.3.4 Tạo lưới 57
4.4 Thông số vật liệu trong Abaqus 57
4.5 Kết quả mô phỏng 60
Chương 5 KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU 67
5.1 Vật liệu thực nghiệm 67
5.2 Khảo sát ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến khả năng tạo hình TPIF 71

5.2.1 Các yếu tố ảnh hưởng 71
5.2.2 Ma trận thực nghiệm 71
5.3 Phân tích kết quả 75
5.3.1 Ảnh hưởng của các thông số công nghệ lên chất lượng sản phẩm (biên dạng chi tiết, độ nhám bề mặt, phân bố chiều dày, cấu trúc tế vi bề mặt chi tiết) 75
5.3.2 Khả năng biến dạng (α) 92
5.4 So sánh kết quả dự báo với kết quả thí nghiệm 100
5.4.1 Biên dạng 100
5.4.2 Khả năng biến dạng (góc biến dạng) 102
Chương 6 KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ 105
6.1 Kết luận 105
6.2 Kiến nghị 106
TÀI LIỆU THAM KHẢO 108
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ 119

DANH SÁCH CHỮ VIẾT TẮT

ABAQUS	Phần mềm của Dassault Systemes
A 1050 H14	Mã hợp kim nhôm
ANOVA	Analysis Of Variance
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacture
CNC	Computer numerical control
DCSELAB	Digital Control and System Engineering laboratory
DOE	Design of Experiment
ĐH	Đại học
ĐHBK	Đại học Bách khoa
FEM	Finite Element Method
ISF	Incremental sheet forming
NC	Numerical control
PPPTHH	Phương pháp phần tử hữu hạn
PTHQ	Phương trình hồi quy
PTN	Phòng thí nghiệm
QHTN	Quy hoạch thực nghiệm
SPIF	Single point incremental forming
STT	Số thứ tự
TNT	Quy hoạch thực nghiệm yếu tố toàn phần
TPIF	Two point incremental forming
TRT	Quy hoạch thực nghiệm yếu tố riêng phần

DANH SÁCH CÁC KÝ HIỆU

α_{max}	Góc biến dạng giới hạn tạo hình
Δz	Bước xuống dụng cụ sau mỗi lớp biến dạng (mm)
D	Đường kính dụng cụ tạo hình (mm)
E	Module đàn hồi
h	Chiều cao vết rách
K	Số yếu tố ảnh hưởng trong qui hoạch
μ	Hệ số ma sát giữa tấm dụng cụ tạo hình
ν	Hệ số Poison
N	Số lần thực nghiệm
n	Số vòng quay trục chính máy phay (*vòng/phút)*
R_z	Độ nhám bề mặt
t_1	Chiều dày chi tiết sau khi biến dạng
t_o	Chiều dày tấm phôi ban đầu
V_{xy}	Vận tốc tiến dụng cụ trong mặt phẳng ngang (*mm/phút*)

DANH SÁCH CÁC HÌNH

HÌNH **TRANG**

Hình 1. 1 Phương pháp tạo hình không dùng khuôn (ISF) [31].....8
Hình 1. 2 Ứng dụng trong công nghiệp ô tô [31].....8
Hình 1. 3 Ứng dụng trong công nghiệp máy bay [31].....9
Hình 1. 4 Phân loại quá trình biến dạng gia tăng cục bộ [55] 9
Hình 1. 5 SPIF [28].....10
Hình 1. 6 TPIF. a) Trước gia công, b) Đang gia công [28].....11
Hình 1. 7 Quá trình tạo hình gia tăng đa điểm [55] 11
Hình 1. 8 Thiết bị gia nhiệt của Ambrogio a)Mô hình CAD; b)Mô hình thực [9].....16
Hình 1. 9 Hệ thống gia nhiệt bằng dòng một chiều [5] 16
Hình 1. 10 Thí nghiệm của Fan [15].....17
Hình 1. 11 Gia nhiệt bằng Lazer của Doflou [16] 17
Hình 1. 12 Kết quả nghiên cứu của Doflou [16].....17
Hình 1. 13 Thiết bị gia nhiệt của L.Galdos a) Mô hình CAD b) Mô hình thực tế [17..... 18

Hình 2.1 Biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo [52] 26
Hình 2.2 Giản đồ ứng suất biến dạng σ-ε [39] 27
Hình 2.3 Ứng suất tại một điểm bất kỳ [23].....27
Hình 2.4 Ứng suất khối so với đại lượng biến dạng [5].....29
Hình 2.5 Quy hoạch Box-Behnken ba nhân tố. 31

Hình 3. 1 Máy chuyên dùng ISF Của DCSELAB.....36
Hình 3. 2 Dụng cụ tạo hình có đường kính bán cầu Ø6 mm.....37
Hình 3. 3 Dụng cụ tạo hình có đường kính bán cầu Ø12 mm.....37
Hình 3. 4 Dụng cụ tạo hình có đường kính bán cầu Ø18 mm.....37
Hình 3. 5 Kiểm tra biên dạng đầu dụng cụ.....37
Hình 3. 6 Mô hình CAD 38

Hình 3. 7 Mô hình thực tế Đồ gá TPIF. *38*
Hình 3. 8 Hợp chất bôi trơn. *38*
Hình 3. 9 Mẫu côn cong và cách tính góc tạo hình α theo qúa trình SPIF [5] *39*
Hình 3. 10 Mô hình côn nón khảo sát khả năng biến dạng với góc tạo hình α *40*
Hình 3. 11 Kích thước của mô hình CAD *Hình 3. 12 Mô hình CAD* *41*
Hình 3. 13 Các kiểu đường chạy dao [55] *42*
Hình 3. 14 Đường chạy dao xoắn ốc (Helical). *42*
Hình 3. 15 a. Sản phẩm có đường chạy dao Helical, b Sản phẩm có đường chạy dao bậc thang (spiral). *43*
Hình 3. 16 Tham số quá trình tạo hình biến dạng gia tăng [55] *43*
Hình 3. 17 *Thực nghiệm chạy mẫu.* *46*
Hình 3. 18 Thước Panme Mitutoyo *47*
Hình 3. 19 Thước đo cao độ Mitutoyo *47*
Hình 3. 20 Máy đo độ nhám Mitutoyo SJ 301 ..... *47*
Hình 3. 21 Máy đo tọa độ CMM Mitutoyo BEYOND-A504 ..... *48*
Hình 3. 22 Máy phân tích thành phần hóa học tại phòng thí nghiệm Cơ-Lý trường ĐH Dầu Khí *48*
Hình 3. 23 Máy thử kéo nén vạn năng *49*
Hình 3. 24 Máy SEM- Scanning Electronic Microscope của Trung tâm nghiên cứu triển khai khu công nghệ cao TP. HCM *49*

Hình 4. 1 Mô hình thực và mô hình hóa của TPIF *52*
Hình 4. 2 Mô hình 3D dự đóan trong Abaqus *53*
Hình 4. 3 Dưỡng tạo hình *53*
Hình 4. 4 Mô hình CAD *54*
Hình 4. 5 Kích thước của mô hình CAD *55*
Hình 4. 6 Đầu dụng cụ tạo hình *56*
Hình 4. 7 Mô hình lưới trong Abaqus. *57*
Hình 4. 8 Hình dạng tổng thể chi tiết sau biến dạng bằng công nghệ TPIF *60*

Hình 4. 9 Vị trí tấm bị rách 61
Hình 4. 10 Mặt cắt của tấm bị rách trường hợp 1..... 61
Hình 4. 11 Cao độ vị trí tấm bị rách trường hợp 1. 62
Hình 4. 12 Hình dạng tổng thể chi tiết sau biến dạng bằng công nghệ TPIF trường hợp 2. 63
Hình 4. 13 Vị trí tấm lưới biến dạng quá mức. 64
Hình 4. 14 Mặt cắt của chi tiết trường hợp 2..... 65
Hình 4. 15 Cao độ vị trí tấm bị rách trong trường hợp 2. 66

Hình 5. 1 Kích thước mẫu theo tiêu chuẩn [46] hoặc ISO 6361-2:2014 69
Hình 5. 2 Mẫu được gia công trên máy phay CNC tại PTN công nghệ thiết kế và gia công tiên tiến, Đại học Quốc gia Hồ Chí Minh. 69
Hình 5. 3 Thử mẫu kéo tại phòng thí nghiệm Cơ-Lý trường Đại học Dầu Khí Việt Nam..... 70
Hình 5. 4 Mẫu sau khi kéo đứt..... 70
Hình 5. 5 Chạy thực nghiệm mẫu..... 72
Hình 5. 6 Đo giá trị cao độ vết rách. 73
Hình 5. 7 Các mẫu đạt được sau khi chạy thực nghiệm 75
Hình 5. 8 Mô hình côn nón khảo sát chất lượng bề mặt chi tiết bằng công nghệ TPIF.. 76
Hình 5. 9 Mô hình CAD TPIF khảo sát chất bôi trơn..... 76
Hình 5. 10 Chất bôi trơn và cách bôi trơn tạo hình sản phẩm bằng công nghệ TPIF 77
Hình 5. 11 Sản phẩm tạo hình bằng công nghệ TPIF với bốn loại chất bôi trơn khác nhau. 79
Hình 5. 12 Sản phẩm tạo hình bằng công nghệ TPIF được tích hợp 4 loại chất bôi trơn trên cùng sản phẩm côn nón góc nghiêng 70^o..... 79
Hình 5. 13 Biểu đồ độ nhám mặt ngoài..... 80
Hình 5. 14 Đo độ nhám mặt ngoài chi tiết. 81
Hình 5. 15 Sản phẩm bôi trơn bằng than chì (a) và sản phẩm bôi bằng dầu bôi trơn (b). 82

Hình 5. 16 Đo tọa độ chi tiết bằng máy đo tọa độ..... 82
Hình 5. 17 Tích hợp biên dạng CAD và thực nghiệm..... 83
Hình 5. 18 Hình minh họa 3D và chi tiết..... 84
Hình 5. 19 a. biên dạng CAD; b. phân bố độ dày chi tiết..... 89
Hình 5. 20 Biểu đồ phần dư cho góc biến dạng. 93
Hình 5. 21 Biểu đồ Pareto ảnh hưởng của bốn thông số công nghệ đến góc biến dạng. 94
Hình 5. 22 Biểu đồ đáp ứng bề mặt 3D của khả năng biến dạng với các thông số công nghệ..... 98
Hình 5. 23 Một số sản phẩm vật liệu A1050 H14 dày 1,5 mm gia công bằng công nghệ TPIF..... 99
Hình 5. 24 Kết quả thực tế và mô hình mô phỏng trường hợp 1..... 100
Hình 5. 25 So sánh biên dạng CAD và biên dạng mô phỏng. 100
Hình 5. 26 Kết quả thực tế và mô phỏng trường hợp 2..... 101
Hình 5. 27 So sánh biên dạng CAD và biên dạng mô phỏng trường hợp 2. 102

DANH SÁCH CÁC BẢNG

BẢNG **TRANG**

Bảng 2.1 Tính ứng suất tại một điểm bất kỳ *28*
Bảng 3.1 Chuyển đổi từ cao độ vết rách sang góc biến dạng *40*
Bảng 3.2 Mức của các yếu tố đầu vào thí nghiệm..... *44*
Bảng 3.3 Ma trận thực nghiệm *45*
Bảng 4. 1 Giá trị mô phỏng cho trường hợp 1. ..... *60*
Bảng 4. 2 Giá trị mô phỏng trường hợp 2..... *63*
Bảng 5. 1 Thành phần hóa học của Nhôm tấm A 1050 H14 ..... *67*
Bảng 5. 2 Cơ tính nhôm tấm A 1050 H14. ..... *68*
Bảng 5. 3 Mức của các yếu tố..... *71*
Bảng 5. 4 Ma trận thực nghiệm cho A 1050-H14 dày 1,5 mm...... *71*
Bảng 5. 5 Thông số máy và chất bôi trơn. *78*
Bảng 5. 6 Giá trị đo chiều dày..... *83*
Bảng 5. 7 Thông tin chất bôi trơn và tính chất vật lý..... *85*
Bảng 5. 8 Ma Trận chất bôi trơn và phương pháp bôi trơn *86*
Bảng 5. 9 Thể hiện Chất bôi trơn, phương pháp bôi trơn và kết quả độ nhám và cấu trúc tế vi..... *90*
Bảng 5. 10 Phân tích ANOVA..... *93*
Bảng 5. 11 Model Summary..... *93*
Bảng 5. 12 Phần trăm ảnh hưởng của các thông số. *94*
Bảng 5. 13 Bộ thông số công nghệ hợp lý..... *98*
Bảng 5. 14 Bảng so sánh kết quả dự đoán và thực nghiệm góc tạo hình nhôm tấm A 1050 H14, dày 1,5mm bằng công nghệ TPIF. *102*

DANH SÁCH CÁC ĐỒ THỊ

ĐỒ THỊ **TRANG**

Đồ thị 4. 1 Ứng suất và biến dạng của vật liệu [23] *58*
Đồ thị 4. 2 Ứng suất và biến dạng thực của hợp kim nhôm tấm A 1050 H14 [54]. *59*
Đồ thị 4. 3 Ứng suất khối so với đại lượng biến dạng của hợp kim nhôm A 1050 H 14 [54]. *59*

Đồ thị 5. 1 Đồ thị mối liên hệ giữa các yếu tố chính và góc biến dạng *96*
Đồ thị 5. 2 Đồ thị mối liên hệ giữa các yếu tố tương tác và góc biến dạng..... *97*
Đồ thị 5. 3 Đồ thị góc biến dạng lớn nhất từ bốn thông số công nghệ hợp lí..... *97*

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài (tính cấp thiết của đề tài nghiên cứu)

Trong bối cảnh phát triển của ngành công nghệ chế tạo máy hiện nay, nhà sản xuất cần phải thay đổi cách thức, quy trình gia công biến dạng vật liệu tấm, đáp ứng nhu cầu thẩm mỹ ngày càng cao của khách hàng, đồng thời đảm bảo sự cạnh tranh hiệu quả. Trong đó, công nghệ biến dạng gia tăng cục bộ vật liệu tấm là một trong những đường hướng tạo hình triển vọng góp phần giảm giá thành một cách thông minh nhằm đem lại lợi ích kinh tế hợp lí. Có thể khẳng định rằng, việc sản xuất các sản phẩm có số lượng ít, mẫu mã và kích thước đa dạng là yêu cầu cần thiết trong nhiều lĩnh vực: công nghiệp quốc phòng, hàng không vũ trụ, công nghệ tạo mẫu nhanh, công nghệ ô tô, y học, đồ dùng gia dụng... Đây là một thách thức lớn đối với nhà nghiên cứu, nhà sản xuất, nhà hoạch định chính sách, nhằm đưa lại những ứng dụng công nghệ một cách tốt nhất. Thực tế cho thấy, công nghệ tạo hình truyền thống, công nghệ tạo hình vật liệu dạng tấm đang sử dụng khuôn không mấy phù hợp với sự thay đổi mẫu mã nhanh chóng của khách hàng với số lượng ít. Muốn vậy, nhà nghiên cứu cần phải nổ lực tìm ra một số giải pháp về công nghệ tạo hình vật liệu dạng tấm không dùng khuôn mà vẫn có thể đáp ứng tốt cho việc sản xuất các sản phẩm loạt nhỏ và vừa, mẫu mã thay đổi nhanh chóng, giá thành thấp, chất lượng sản phẩm đáp ứng được nhu cầu của khách hàng. Đó chính là thế mạnh của công nghệ tạo hình gia tăng đa điểm. Do tính ưu việt của phương pháp này là tiết kiệm thời gian, chi phí, phù hợp với nhu cầu cần thiết của xã hội khiến tác giả mạnh dạn chọn lựa đề tài "NGHIÊN CỨU TẠO HÌNH KIM LOẠI TẤM BẰNG CÔNG NGHỆ BIẾN DẠNG GIA TĂNG ĐA ĐIỂM (TPIF – Two Point Incremental Forming)". Chọn đề tài này, luận án mong muốn nghiên cứu khả năng tạo hình tấm nhôm A1050 H14 dày 1,5 mm và chọn chất bôi trơn, phương pháp bôi trơn hợp lý nhằm khẳng định hiệu quả của công nghệ TPIF.

2. Mục tiêu nghiên cứu

Nhằm đáp ứng nhu cầu phát triển của xã hội, việc nghiên cứu tạo hình kim loại tấm bằng công nghệ biến dạng gia tăng đa điểm góp phần chỉ ra khả năng biến dạng của vật liệu nhôm tấm A 1050 H14 dày 1,5 mm, đồng thời xác định giá trị biến dạng lớn nhất. sau nữa là ứng dụng công nghệ TPIF ở nhiệt độ thường, tạo hình kim loại tấm dẻo bằng công nghệ biến dạng gia tăng đa điểm (TPIF).

Do đồ gá TPIF cần chuyển động hạ xuống cùng với đầu dụng cụ tạo hình, cho nên việc thiết kế đồ gá tạo hình TPIF phải giải quyết phù hợp với điều kiện máy TPIF hiện có, đảm bảo độ cứng vững, ổn định nhằm gia tăng độ chính xác thực nghiệm và đạt được các kết quả thực nghiệm tốt.

Tiếp nữa, luận án khảo sát quá trình bôi trơn (chất bôi trơn và phương pháp bôi trơn) ảnh hưởng đến khả năng biến dạng và chất lượng sản phẩm (độ nhám bề mặt, biên dạng sản phẩm, phân bố độ dày sản phẩm). Qua đó xác định chất bôi trơn phù hợp để đạt được chất lượng sản phẩm tốt. Nghiên cứu nhớt bôi trơn là Gear VG 150 EP, mỡ bôi trơn công nghiệp, bột than chì và hỗn hợp bôi trơn gồm than chì mỡ bôi trơn với tỉ lệ 1:1 và nhớt bôi trơn làm kết dính hỗn hợp lại với nhau, luận án chỉ ra sự tương tác giữa đầu dụng cụ tạo hình và hỗn hợp bôi trơn nhằm tạo ra bề mặt sản phẩm tốt nhất.

Luận án xác định các thông số máy ảnh hưởng đến khả năng biến dạng của vật liệu tấm. Từ kết quả khảo sát các thông số công nghệ vận tốc dụng cụ Vxy (mm/phút), bước tiến theo phương z của dụng cụ Δz (mm), đường kính dụng cụ D (mm) và số vòng quay trục chính n (vòng/phút) tác động đến khả năng biến dạng của vật liệu tấm, luận án lập được phương trình hồi quy thông qua phần mềm qui hoạch thực nghiệm Minitab và tìm thông số công nghệ hợp lý từ phương trình hồi qui. Mục đích là xác định được giá trị các tham số làm khả năng biến dạng lớn nhất của vật liệu tấm.

Từ thông số công nghệ trên, luận án dự đoán vết nứt xuất hiện bằng phần mềm Abaqus. Việc dự đoán vết nứt xuất hiện là cần thiết nhằm tránh những lỗi về vết nứt xảy ra khi gia công. Để tính toán vết nứt, luận án sử dụng phương pháp PTHH. Đây

là phương pháp số nhằm mô phỏng, giải và dự đoán vết nứt xuất hiện trên kim loại tấm khi gia công.

3. Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là khả năng biến dạng của nhôm tấm A 1050 H14 bằng công nghệ TPIF với bốn thông số công nghệ vận tốc dụng cụ Vxy (mm/phút), bước tiến theo phương z của dụng cụ Δz (mm), đường kính dụng cụ D (mm) và số vòng quay trục chính n (vòng/phút). Khảo sát phương pháp bôi trơn và chất bôi trơn ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt sản phẩm bằng công nghệ tạo hình TPIF thông qua bốn thông số công nghệ vận tốc dụng cụ Vxy (mm/phút), bước tiến theo phương z của dụng cụ Δz (mm), đường kính dụng cụ D (mm) và số vòng quay trục chính n (vòng/phút).

4. Nhiệm vụ nghiên cứu

Nhiệm vụ thứ nhất là, mô phỏng phần tử hữu hạn quá trình biến dạng và dự đoán khả năng phá hủy sản phẩm trong quá trình tạo hình, luận án sử dụng phương pháp số mô phỏng, tính toán dự đoán vết nứt xuất hiện trên bề mặt kim loại tấm khi tiến hành gia công.

Nhiệm vụ thứ hai là, nghiên cứu các thông số công nghệ và ảnh hưởng của nó đến khả năng biến dạng của vật liệu nhôm tấm A1050 H14. Dựa trên phương pháp quy hoạch thực nghiệm, luận án xác định các thông số công nghệ ảnh hưởng đến yếu tố đáp ứng, mức độ ảnh hưởng, từ đó xác lập phương trình hồi quy và tìm thông số máy hợp lý để đạt được khả năng biến dạng là lớn nhất.

Nhiệm vụ thứ ba là, thiết kế và chế tạo đồ gá tạo hình gia công biến dạng gia tăng đa điểm là thao tác quyết định sự thành công của thí nghiệm. Kết cấu đồ gá, vật liệu tấm chuyển động hạ xuống cùng với đầu dụng cụ tạo hình, nên việc nghiên cứu và thiết kế đồ gá là cần thiết để đảm bảo cơ hệ cứng vững, ổn định. Đây là thao tác có ý nghĩa quan trọng nhằm đem lại kết quả thí nghiệm chính xác.

Nhiệm vụ thứ tư là, dựa trên kết quả thực nghiệm, luận án đánh giá khả năng biến dạng (đến nứt, rách tấm) kim loại tấm dẻo và nghiên cứu các dạng phá hủy của tấm A 1050 H14 trong quá trình tạo hình.

Nhiệm vụ cuối cùng là, khảo sát chất bôi trơn và phương pháp bôi trơn, luận án lựa chọn tổ hợp chất bôi trơn thích hợp, góp phần làm giảm ma sát giữa đầu dụng cụ tạo hình và bề mặt kim loại tấm.

5. Phạm vi nghiên cứu

Luận án tập trung nghiên cứu công nghệ tạo hình đa điểm (TPIF) cho tấm kim loại ở nhiệt độ thường. Vật liệu sử dụng để biến dạng là tấm hợp kim nhôm có mã là A 1050 H14 dày 1,5 mm .Thông số công nghệ tạo hình sử dụng trong quá trình bao gồm vận tốc dụng cụ V_{xy} =300, 900, 1500 (*mm/phút*), bước tiến theo phương *z* của dụng cụ Δz = 0,1; 0,8; 1,5 (*mm*) , đường kính dụng cụ *D=6, 12, 18* (*mm*) và số vòng quay của trục chính *n* = 300, 1050, 1800 (*vòng/phút*). Trong quá trình biến dạng, giả sử bề dày tấm đồng đều và được bôi trơn tốt với hệ số ma sát không đổi. Dụng cụ tạo hình là dao hình trụ, dao không cạnh cắt, đầu có dạng hình bán cầu.

Luận án khảo sát phương pháp bôi trơn và chất bôi trơn sử dụng trong quá trình tạo hình. Các chất bôi trơn sử dụng gồm nhớt bôi trơn (Gear VG 150 EP), mỡ bôi trơn công nghiệp, bột than chì, hỗn hợp bôi trơn mỡ bôi trơn và than chì với tỉ lệ 1:1, dầu hướng dương.

6. Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu lý thuyết tổng quan về công nghệ biến dạng gia tăng cục bộ và phân tích các nghiên cứu về TPIF trên thế giới và trong nước giúp chúng tôi xác định thực trạng nghiên cứu trước đó, hướng kế thừa và đóng góp của luận án.

Phương pháp phân tích lý thuyết về biến dạng tấm và lý thuyết SPIF đưa lại cho luận án một cái nhìn tổng quan về khả năng biến dạng tấm.

Với phương pháp thực nghiệm, luận án dùng phần mềm quy hoạch thực nghiệm Minitab (DOE) thiết kế thí nghiệm và phân tích ANOVA; phân tích ảnh

hưởng của các thông số công nghệ tác động lên khả năng biến dạng kim loại tấm. Quá trình đánh giá mức độ tác động của các thông số công nghệ cho biết bản chất, ảnh hưởng của các thông số đó. Các thông số công nghệ có thể tác động độc lập hoặc tác động lẫn nhau quyết định đến đầu ra. Từ đó, ta có thể kiểm soát các thông số công nghệ nhằm tạo ra sản phẩm như mong đợi.

Quá trình thực nghiệm quá trình TPIF gia công mẫu trên máy SPIF chuyên dùng của DCSELAB để kiểm chứng các kết quả mô phỏng số.

Phương pháp mô phỏng số sử dụng phần mềm ABAQUS nhằm dự báo quá trình TPIF, xác định mối quan hệ giữa các thông số công nghệ, ứng suất,… đánh giá kết quả giữa mô phỏng, thực nghiệm và lý thuyết.

7. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài nghiên cứu

Ý nghĩa khoa học:

Việc nghiên cứu công nghệ tạo hình đa điểm tập trung vào việc xác định khả năng tạo hình kim loại tấm, lựa chọn chất bôi trơn và phương pháp bôi trơn. Xác định thông số công nghệ hợp lí nhằm hiểu rõ bản chất quá trình biến dạng đa điểm cho TPIF và hướng đến ứng dụng công nghiệp.

- Xác định khả năng tạo hình (góc tạo hình) của vật liệu nhôm tấm A 1050 H14, dày 1,5 *mm* bằng công nghệ TPIF, luận án đưa lại những thông số về khả năng biến dạng lớn nhất của nhôm tấm.

- Xây dựng mô hình khảo sát để khảo sát khả năng biến dạng của vật liệu tấm bằng công nghệ biến dạng gia tăng đa điểm, luận án thiết lập mối quan hệ giữa các thông số công nghệ $(\Delta z, V_{xy}, D, n)$ với khả năng tạo hình, vật liệu tiêu biểu nhôm tấm A 1050 H14 dựa trên mô phỏng số và thực nghiệm.

- Lựa chọn chất bôi trơn và phương pháp bôi trơn phù hợp trong công nghệ tạo hình TPIF.

- Xác định các thông số công nghệ hợp lí theo hàm mục tiêu là các thông số đầu ra mong muốn.

Ý nghĩa thực tiễn:

Từ những giá trị nghiên cứu khoa học trên làm tiền đề đưa công nghệ TPIF ứng dụng thực tiễn trong công nghiệp cụ thể như sau:

- Nghiên cứu, thiết kế và chế tạo đồ gá cho công nghệ TPIF, dụng cụ tạo hình, lần đầu tiên luận án phục vụ cho công tác thực nghiệm và là tài liệu tham khảo cho một số nhà nghiên cứu lĩnh vực tạo hình gia tăng đa điểm, cũng như ứng dụng công nghệ này vào một số lĩnh vực sản xuất chuyên biệt ở Việt Nam.

- Luận án thiết lập mối quan hệ giữa các thông số công nghệ (Δz, Vxy, D, n) với khả năng tạo hình, vật liệu tiêu biểu nhôm tấm dày 1,5 mm A 1050 H14.

- Chọn chất bôi trơn và phương pháp bôi trơn phù hợp trong công nghệ tạo hình TPIF.

- Xác định các thông số công nghệ hợp lí .

8. Cấu trúc của Luận án

Luận án được cấu trúc bao gồm:

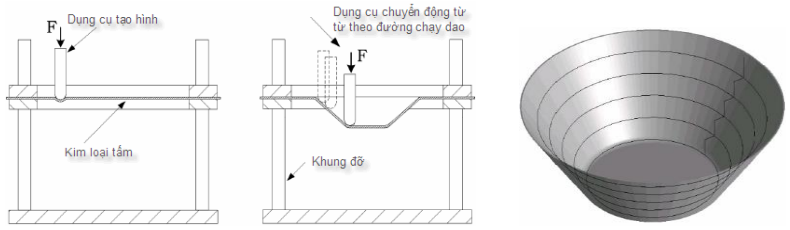
Tính cấp thiết của đề tài nghiên cứu, mục đích, nhiệm vụ, phạm vi, hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu; ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài sẽ trình bày ở chương MỞ ĐẦU. Tổng quan về nghiên cứu trong và ngoài nước sẽ trình bày ở chương TỔNG QUAN. Các lý thuyết biến dạng kim loại, quy hoạch thực nghiệm, phần tử hữu hạn trong ISF sẽ trình bày ở chương CƠ SỞ LÝ THUYẾT. Thiết bị và đồ gá, chất bôi trơn, hình dạng chi tiết khảo sát, thông số kỹ thuật thiết bị đo sử dụng trong quá trình thực nghiệm sẽ trình bày ở chương HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM. Mô hình hóa, điều kiện biên, tạo lưới, thông số vật liệu trong Abaqus… sẽ trình bày ở chương MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH TPIF. Vật liệu thí nghiệm, khảo sát ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến khả năng tạo hình TPIF, phân tích kết quả, … sẽ trình bày ở chương KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU. Chương cuối là KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ.

Chương 1
TỔNG QUAN

1.1 Tổng quan về hướng nghiên cứu

Công nghệ tạo hình vật liệu tấm (tấm kim loại và tấm polymer) không dùng khuôn (ISF incremental sheet forming) đã được nghiên cứu, ứng dụng bước đầu tại Việt Nam. Nhưng đã đưa lại nhiều triển vọng cho việc phát triển ngành công nghệ tạo hình không khuôn. Nhìn lại quá trình phát triển của công nghệ tạo hình truyền thống, công nghệ tạo hình vật liệu dạng tấm hiện được sử dụng rỗng rãi ở một số nước như: Nhật Bản, Hàn Quốc, Mỹ và các nước Châu Âu. Ở nước ta, một số nhà nghiên cứu đang học tập, nghiên cứu và sử dụng công nghệ tạo hình không khuôn và đạt được một số thành tựu ban đầu. Trong đó, người ta thường áp dụng các phương pháp tạo hình như: dập, vuốt, chồn, ép…Tựu chung lại, các phương pháp này vẫn dựa trên việc sử dụng chày và khuôn theo mẫu nhất định. Cho dù, phương pháp này đã tạo ra một số sản phẩm có hình dạng chính xác cao, nhưng độ linh hoạt, đa dạng hình dạng mẫu mã sản phẩm còn hạn chế. Công nghệ này chỉ áp dụng cho việc sản xuất số lượng lớn, thì chi phí sản xuất, giá thành sản phẩm mới có chỗ đứng trên thị trường. Tuy nhiên, chi phí ban đầu cho việc tạo khuôn thường lớn và sự cập nhật mẫu mã chưa đáp ứng được nhu cầu thị hiếu của khách hàng. Đối với những sản phẩm đơn chiếc hoặc số lượng vừa thì việc sử dụng phương pháp trên sẽ đẩy giá thành sản phẩm lên rất cao. Trong bối cảnh phát triển nhanh và sự cạnh tranh lớn hiện nay, đòi hỏi nhà sản xuất phải thay đổi công nghệ, giảm giá thành một cách thông minh nhằm đáp ứng nhu cầu thẩm mỹ ngày càng cao của khách hàng. Trong đó, việc sản xuất các sản phẩm có số lượng ít, mẫu mã và kích thước đa dạng là một yêu cầu cấp thiết trong nhiều lĩnh vực: quốc phòng, tên lửa, hàng không vũ trụ, tạo mẫu nhanh, ô tô, y học, đồ dùng gia dụng... Đây là một thách thức lớn đối với nhà sản xuất, nhà nghiên cứu, nhà hoạch định chính sách nhằm đưa lại những đường hướng phát triển công nghệ.

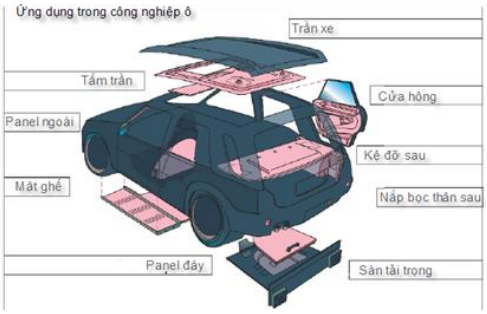
Muốn vậy, nhà nghiên cứu cần phải nổ lực tìm ra một số phương pháp có thể đáp ứng tốt cho việc sản xuất các sản phẩm loạt nhỏ và vừa với giá thành thấp.



a) *b)* *c)*

Hình 1. 1 Phương pháp tạo hình không dùng khuôn (ISF) [31].

Năm 1967, Edward Leszak đã phát minh ra phương pháp tạo hình biến dạng cục bộ "Incremental Sheet Forming"- ISF. Phương pháp này sử dụng một dụng cụ tạo hình đơn giản, biến dạng từ từ vật liệu kim loại dạng tấm để đạt được hình dạng của sản phẩm hoàn thiện. Quá trình này dùng chuyển động của dụng cụ gắn trên máy phay CNC 3 trục, tấm kim loại được gắn trên một khung (Hình 1.1-a). Quỹ đạo của đường chạy dao được xuất từ hình dạng của sản phẩm thông qua một phần mềm CAM (Hình 1.1–c). Tuy nhiên, phải đến những thập niên cuối của thế kỷ XX, khi công nghệ số phát triển và sự xuất hiện các máy gia công điều khiển số CNC, phương pháp SPIF mới được một số viện nghiên cứu và trường đại học quan tâm. Từ đó, phương pháp SPIF được nâng lên và ứng dụng rộng rãi trên thế giới. Phát minh của Leszak đã mở đường cho những nhà nghiên cứu về tạo hình không khuôn cho vật liệu tấm tiếp tục kế thừa và phát triển hoàn chỉnh dựa trên nền tảng công nghệ số.



Hình 1. 2 Ứng dụng trong công nghiệp ô tô [31]

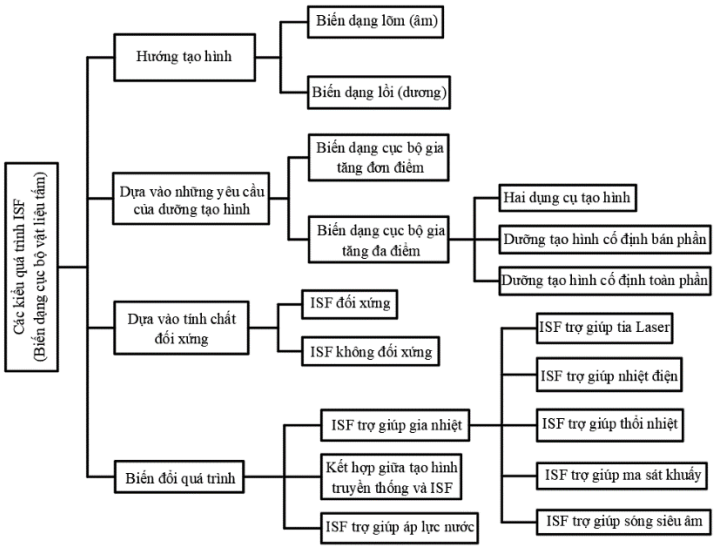
Phương pháp này mở ra rất nhiều hướng ứng dụng trong công nghệ tạo hình vật liệu dạng tấm như:

- Công nghệ tên lửa, hàng không, vũ trụ.
- Các tấm thân của thân ô tô, cửa, trần và bệ lái, tấm chắn nhiệt..vv
- Tấm lắp ghép thân máy bay và các bộ phận khác.

Hình 1. 3 Ứng dụng trong công nghiệp máy bay [31].

Các sản phẩm trên thuộc nhiều lĩnh vực ứng dụng khác nhau. Một số chi tiết ứng dụng có số lượng nhỏ, nhưng các thông số kỹ thuật của sản phẩm phụ thuộc rất nhiều vào công năng chuyên biệt. Vì vậy, phương pháp truyền thống sẽ không đáp ứng tối ưu hiệu quả vì chi phí sản xuất quá lớn, quy trình sản xuất chưa linh hoạt. Vì lí do ấy, việc ứng dụng phương pháp ISF và công nghệ kỹ thuật số sẽ góp phần rút ngắn giai đoạn thiết kế thử nghiệm, giảm chi phí và tiết kiệm thời gian sản xuất .

1.1.1 Tổng quan và phân loại ISF



Hình 1. 4 Phân loại quá trình biến dạng gia tăng cục bộ [55]

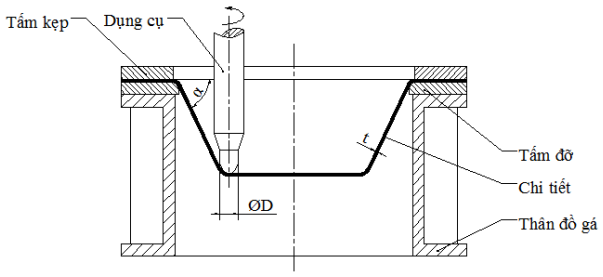
Phương pháp ISF được phân loại dựa trên nhiều yếu tố mà ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình tạo hình tấm vật liệu. Tổng hợp các hướng phân loại được tóm tắt trong *hình 1.4*. Tuy nhiên, dựa trên dưỡng tạo hình phân thành hai loại:

1/ tạo hình gia tăng đơn điểm (Single Point Incremetal Forming–SPIF

2/ tạo hình gia tăng đa điểm (Two Point Incremental Forming–TPIF)

❖ **SPIF**

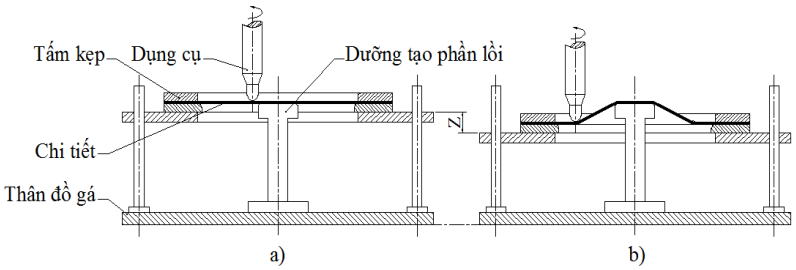
Tạo hình gia tăng đơn điểm-SPIF là quá trình gia công kim loại tấm bằng cách sử dụng một dụng cụ tạo hình, đầu đầu bán cầu không lưỡi cắt trên một tấm kim loại được kẹp chặt, SPIF được mô tả trên *hình 1.5*. Dụng cụ tạo hình vừa quay quanh trục của nó vừa tịnh tiến theo quỹ đạo được lập trình sẵn làm biến dạng cục bộ vật liệu tấm từng lớp đến khi hoàn thiện sản phẩm, dùng chất bôi trơn giảm ma sát. Khả năng tạo hình của tấm kim loại trong SPIF được đánh giá thông qua góc biến dạng (α)–là góc kéo lớn nhất của vật liệu, tại đó vật liệu trước khi bị rách. Trong đó, bốn thông số công nghệ quan trọng nhất trong SPIF là:bước tiến theo phương z (Δz), vận tốc tạo hình V_{xy}, tốc độ trục chính n, đường kính dụng cụ tạo hình D.



Hình 1. 5 SPIF [28].

❖ **TPIF**

Tạo hình gia tăng đa điểm – TPIF là quá trình gia công kim loại tấm, bằng cách sử dụng một dụng cụ đầu bán cầu không lưỡi cắt tiếp xúc trên một tấm kim loại được kẹp chặt vào khung trượt, phía dưới kim loại tấm có dưỡng cố định như (*Hình 1.6*). Quá trình tạo hình, dụng cụ vừa quay quanh trục của nó vừa tịnh tiến theo quỹ đạo được lập trình sẵn làm biến dạng cục bộ vật liệu tấm từng lớp đến khi sản phẩm hoàn thiện, đồng thời dùng chất bôi trơn để giảm ma sát.



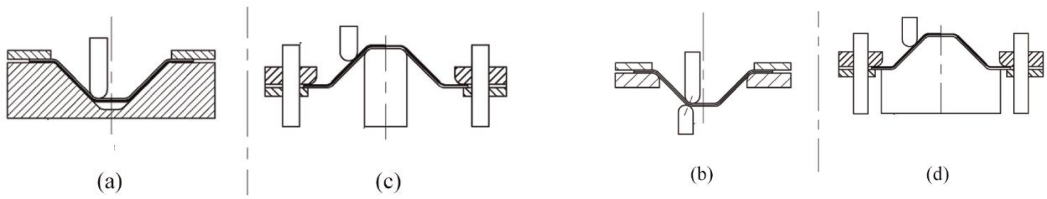
Hình 1. 6 TPIF. a) Trước gia công, b) Đang gia công [28].

Phương pháp này khác SPIF là cần phải dùng thêm dưỡng tạo phần lồi, phần lõm cố định và khung trượt. Khung trượt sẽ di chuyển xuống theo đầu dụng cụ tạo hình còn dưỡng tạo phần lồi, phần lõm thì cố định trên bàn máy.

TPIF được áp dụng cho việc biến dạng hai loại vật liệu cơ bản là loại vật liệu kim loại tấm dẻo dễ biến dạng như: hợp kim nhôm, thép … và loại vật liệu kim loại tấm khó biến dạng như: Inox, hợp kim Magie, Titan … Đối với vật liệu kim loại tấm dẻo dễ biến dạng thì gia công tấm vật liệu ở nhiệt độ thường. Đối với kim loại tấm khó biến dạng, tính đàn hồi cao và rất dễ bị gãy đứt, thì gia công cho loại vật liệu này đòi hỏi phải gia nhiệt, làm tăng khả năng biến dạng của vật liệu. Việc gia nhiệt nhất thiết phải dùng thiết bị và công nghệ gia nhiệt bằng nhiều phương pháp phù hợp với tính chất của vật liệu và ứng dụng công nghệ gia nhiệt thích hợp.

❖ **Phân loại TPIF**

Tạo hình gia tăng đa điểm được phân thành ba loại: dưỡng tạo hình cố định toàn phần, dưỡng tạo hình cố định bán phần, sử dụng hai dụng cụ tạo hình (Hình 1.7). Trong luận án này chúng tôi sử dụng dưỡng tạo hình cố định bán phần do có nhiều ưu việt là không phải gia công biên dạng dưỡng tạo hình.



Hình 1. 7 Quá trình tạo hình gia tăng đa điểm [55]

(a) Hướng tạo hình lõm, dưỡng tạo hình cố định toàn phần; (b) Hướng tạo hình lõm sử dụng hai dụng cụ tạo hình; (c) Hướng tạo hình lồi dưỡng tạo hình cố định bán phần; (d) Hướng tạo hình lồi, dưỡng tạo hình cố định toàn phần.

❖ **Phân biệt khả năng của SPIF và TPIF**

SPIF có kết cấu đồ gá đơn giản, không dùng dưỡng tạo hình, chi phí thấp. Tuy nhiên, mặt hạn chế của phương pháp này là không thể tạo ra các chi tiết tấm vừa có vùng lõm vừa có vùng lồi. TPIF phải dùng dưỡng tạo hình nên kết cấu đồ gá phức tạp, cần phải chuyển động hạ xuống, nâng lên cùng với đầu dụng cụ tạo hình. Kết cấu đồ gá phức tạp, giá thành cao nhưng phạm vi tạo hình rộng hơn, bao gồm tạo hình các chi tiết tấm vừa có vùng lõm vừa có vùng lồi. TPIF có khả năng tạo ra hình dạng sản phẩm phức tạp, những biên dạng không đối xứng. TPIF có khả năng tạo hình sản phẩm có độ chính xác hình học, kích thước và chất lượng bề mặt hơn SPIF.

1.1.2 Trong nước

Công nghệ SPIF đã được nghiên cứu và đạt được nhiều kết quả rất đáng ghi nhận. Đó là thành tựu của các nhà khoa học và các cộng sự tại Đại học Bách Khoa Hà Nội, Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật thành phố Hồ Chí Minh; Phòng Thí Nghiệm Trọng Điểm Quốc Gia trường Đại học Bách khoa thành phố Hồ Chí Minh, Trường Đại học Tôn Đức Thắng. Cụ thể là các nghiên cứu như sau:

❖ **Đối với các loại vật liệu kim loại tấm dẻo dễ biến dạng**

Nghiên cứu về góc tạo hình của hợp kim nhôm A1050-H14 [1], khả năng biến dạng của nhựa PVC [3], sử dụng công nghệ SPIF để sản xuất mô hình xe hơi [4], nghiên cứu khả năng biến dạng của tấm composite [2]. Các nghiên cứu đều thành công trong việc gia công bằng SPIF với các thông số công nghệ được sử dụng như: bước tiến *z*, tốc độ chạy dụng cụ V_{xy}, đường kính dụng cụ *D*, số vòng quay trục chính *n*. Biên dạng khảo sát là nón cụt với đường sinh cong, quỹ đạo hình xoắn ốc. Áp dụng phương pháp nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng số bằng phần mềm Abaqus, các tác giả đã kết luận rằng các thông số công nghệ đó có ảnh hưởng đến khả năng tạo

hình và ảnh hưởng lớn nhất là ba thông số Δz, V_{xy} và D. Lê Khánh Điền [52] nghiên cứu lập phương trình hồi quy bốn thông số công nghệ (bước tiến dụng cụ theo phương z (Δz), vận tốc dụng cụ V_{xy}, đường kính dụng cụ D và số vòng quay của trục chính n) với khả năng biến dạng α, lượng phục hồi, độ nhám bề mặt vật liệu tấm và năng suất tạo hình của vật liệu nhôm A 1050 H14, thép SS330 và SUS304 bằng công nghệ biến dạng gia tăng đơn điểm. Phạm Quốc Tuấn, Đại học Tôn Đức Thắng nghiên cứu về mô phỏng SPIF, nhận dạng đường cong giới hạn biến dạng khi đứt gãy trong biến dạng tấm gia tăng cục bộ… Gs. Nguyễn Đức Toàn, trường Đại học Bách Khoa Hà Nội, nghiên cứu về SPIF.

❖ **Đối với các loại vật liệu kim loại tấm khó biến dạng**

Nghiên cứu dự đoán khuyết tật trong biến dạng cục bộ liên tục (SPIF) bằng phương pháp mô phỏng số [31], nghiên cứu này đầu tư vào việc dự đoán các dạng khuyết tật xảy ra trong quá trình biến dạng tấm kim loại ở nhiệt độ cao. Mô hình hóa quá trình tạo hình bằng việc xây dựng mô hình 3D phần tử hữu hạn để nghiên cứu đặc tính biến dạng và dự đoán các khuyết tật xảy ra trong quá trình biến dạng, đồng thời giải thích cơ chế biến dạng vật liệu trong công nghệ SPIF.

Nghiên cứu mô phỏng lượng phục hồi theo phương hướng kính của vật liệu Titan khi gia công bằng công nghệ Hot SPIF. Kết quả phân tích mô phỏng thông qua phương trình hồi quy cho kết quả là ảnh hưởng của đường kính dụng cụ lên lượng phục hồi theo phương hướng kính là lớn nhất, kế đến là vận tốc tiến dụng cụ và ảnh hưởng ít hơn cả là bước tiến dụng cụ cùng nhiệt độ; đường kính dụng cụ, bước tiến dụng cụ và vận tốc tiến dụng cụ tỉ lệ thuận, còn nhiệt độ tỉ lệ nghịch với lượng phục hồi theo phương hướng kính. Từ phương trình hồi quy xác định lượng phục hồi theo phương hướng kính, giúp xác định lượng bù sai số khi gia công Titan bằng Hot SPIF nhằm nâng cao độ chính xác kích thước sản phẩm [30].

Đối với công nghệ TPIF, qua tìm hiểu trên internet và tạp chí, hội nghị … hiện chưa thấy có công trình khoa học nào công bố trên các tạp chí ở Việt Nam. Tuy nhiên,

cũng có vài nhóm nghiên cứu sơ khai như ĐHBK tp. HCM, ĐH Công Nghiệp Hà Nội, …

1.1.3 Trên thế giới

❖ **SPIF cho vật liệu dễ biến dạng**

Nghiên cứu của V.Franzen và cộng sự [6] khảo sát biến dạng của tấm nhựa PVC. Quỹ đạo dụng cụ được dùng là dạng đường xoắn ốc với bước *0,5 mm*. Tác giả phân tích ảnh hưởng đường kính dụng cụ (*Ø*10÷*Ø*15) *mm* và bề dày (*2÷3) mm* đến góc tạo hình. Lượng chạy dụng cụ 1500 *mm/phút*, bôi trơn bằng soap-emulsion. Kết quả là cả hai thông số trên đều ảnh hưởng đến góc biến dạng, cụ thể đường kính dụng cụ tăng thì góc biến dạng tăng và bề dày tăng góc biến dạng giảm.

Nghiên cứu của Lê Văn Sỹ [5] cho tấm Polymer với các thông số Δz (*0,2÷1 mm*), đường kính dụng cụ *D* (6÷12 *mm*), vận tốc dụng cụ V_{xy} (1000÷3000 *mm/ phút*) và tốc độ trục chính dụng cụ *n* (200÷700 *vòng/phút*). Nghiên cứu cho thấy ảnh hưởng của Δz là lớn nhất, kế đến là đường kính dụng cụ và tốc độ dụng cụ V_{xy}. Tốc độ trục chính có ảnh hưởng nhưng không đáng kể. Bước tiến Δz và tốc độ V_{xy} tăng làm góc biến dạng giảm nhưng đường kính dụng cụ tăng thì biến dạng tăng.

Crina Radu [7] nghiên cứu ảnh hưởng của bốn thông số đường kính dụng cụ *D* (3÷5 mm), bước tiến theo phương z (0,05÷0,5 *mm*), vận tốc dụng cụ V_{xy} (1500÷3000 *mm/phút*) và số vòng quay của trục chính *n* (500÷1000 *vòng/phút*) đến chất lượng bề mặt của tấm thép cacbon thấp. Bề dày tấm 0,6 *mm*. Qua thí nghiệm, kết quả cho thấy cả bốn thông số đều ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt sau gia công. Bước tiến theo phương z có ảnh hưởng lớn nhất, tiếp theo là đường kính dụng cụ, số vòng quay của trục chính và vận tốc dụng cụ. Khi Δz tăng thì độ nhám tăng. Ngược lại, khi *D*, *n* và V_{xy} tăng thì độ nhám giảm.

Nghiên cứu của M.Rauch và các cộng sự [8] về ảnh hưởng của hình dạng quỹ đạo dụng cụ đến khả năng, thời gian và lực tạo hình. Vật liệu được sử dụng là tấm hợp kim nhôm 5086 có bề dày 0,6 *mm*. Dụng cụ tạo hình có đường kính 20 *mm*. Hai

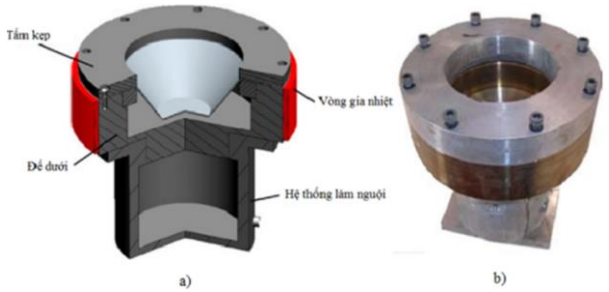
loại quỹ đạo là quỹ đạo bậc thang có bước 0,5÷1 *mm* và quỹ đạo xoắn ốc cũng có bước 0,5÷1 *mm* được tạo thành từ phần mềm CAM. Vận tốc dụng cụ là 0,5÷1,5 *m/phút*. Kết quả là lượng chạy dụng cụ hầu như không ảnh hưởng đến lực tạo hình, còn thời gian tạo hình có liên quan đến cả vận tốc dụng cụ và loại quỹ đạo dụng cụ. Từ đó, tác giả kết luận rằng quỹ đạo từ chương trình CAM không phù hợp với phương pháp gia công SPIF và đề xuất xây dựng loại quỹ đạo mới từ dữ liệu lực tạo hình thu thập được trong lúc gia công. Phương pháp thu thập dữ liệu và xử lí khá phức tạp.

Các nghiên cứu về SPIF ở nhiệt độ thường [10], [23], [76], [75], [74]… tập trung vào tìm ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến khả năng biến dạng (góc biến dạng α) của vật liệu tấm. Một số nghiên cứu về ảnh hưởng của chúng đến độ nhám bề mặt và độ chính xác hình học của chi tiết. Các thông số công nghệ ảnh hưởng gồm có: Module đàn hồi E của vật liệu tấm, hệ số Poisson ν của vật liệu tấm, đường kính dụng cụ D, bước tiến theo phương z, vận tốc dụng cụ V_{xy}, số vòng quay trục chính n, bề dày phôi, hình dạng quỹ đạo dụng cụ, hệ số ma sát μ giữa tấm và dụng cụ tạo hình, nhiệt độ tạo hình T. Bằng phương pháp quy hoạch chọn lọc, qui hoạch đơn thông số… [39] loại trừ các thông số ít ảnh hưởng còn lại bốn thông số ảnh hưởng lớn là bước tiến theo phương z (Δz), vận tốc dụng cụ V_{xy}, đường kính dụng cụ D, số vòng quay n của dụng cụ có ảnh hưởng nhiều nhất đến khả năng tạo hình (góc tạo hình α) và độ nhám bề mặt của vật liệu tấm kim loại. Đây là các thông số làm thông số đầu vào và có thể điều chỉnh được.

❖ SPIF cho kim loại tấm khó biến dạng

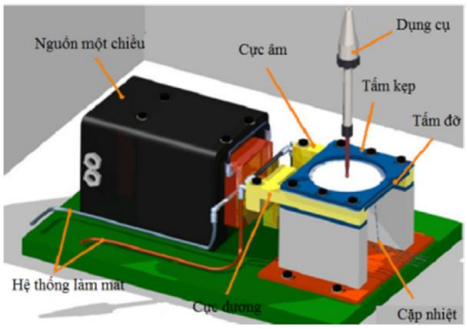
Nghiên cứu của G.Ambrogio và các cộng sự [9] về khả năng biến dạng của hợp kim Magie AZ31 bằng cách thực hiện thí nghiệm với hình nót cụt đường kính lớn là 100 *mm*, chiều sâu là 40 *mm* và đường kính nhỏ là một hàm của góc biến dạng. Các thông số công nghệ được dùng là đường kính dụng cụ D (12÷18 *mm*), bước tiến Δz (0,3÷1 *mm*), nhiệt độ T (200÷300$^{\circ}C$). Họ phát hiện ra rằng khả năng tạo hình tăng đáng kể ở nhiệt độ cao. Nếu ở nhiệt độ thường chiều sâu thu được là 3 *mm* và góc biến dạng là 30° thì ở 250$^{\circ}C$ góc biến dạng thu được là 60° và chiều sâu là 40 *mm*.

Hai thông số ảnh hưởng lớn đến khả năng tạo hình là nhiệt độ T và bước tiến Δz, trong khi ảnh hưởng của đường kính dụng cụ là không đáng kể [9].



Hình 1. 8 Thiết bị gia nhiệt của Ambrogio a)Mô hình CAD; b)Mô hình thực [9].

Nghiên cứu của Lê Văn Sỹ [5, 14] về ảnh hưởng của ba thông số công nghệ nhiệt độ T ($200^{\circ}C \div 300^{\circ}C$), bước tiến theo phương z ($0{,}2 \div 1$ mm) và vận tốc chạy dụng cụ V_{xy} ($1000 \div 6000$ mm/s) đến khả năng tạo hình và chất lượng bề mặt của tấm hợp kim nhôm A1010 và hợp kim magie AZ31. Đường chạy dụng cụ được sử dụng là quỹ đạo hình xoắn ốc. Mô hình khảo sát là hình nón cụt đường sinh cong. Kết quả cho thấy nhiệt độ ảnh hưởng lớn nhất đến góc tạo hình của hợp kim nhôm và hợp kim magie trong khi ảnh hưởng của bước tiến Δz đối với độ nhám là lớn nhất. Thiết bị gia nhiệt được sử dụng dựa vào hiệu ứng June-Lenze như *Hình 1.9*



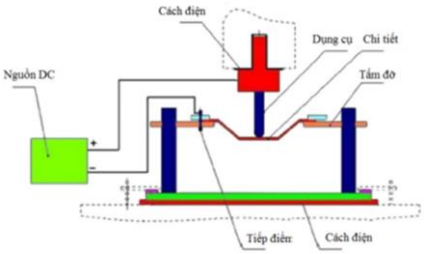
Hình 1. 9 Hệ thống gia nhiệt bằng dòng một chiều [5]

Tác giả gia nhiệt theo hiệu ứng June-Lenze:

$$Q = R.I^2.t \tag{1.1}$$

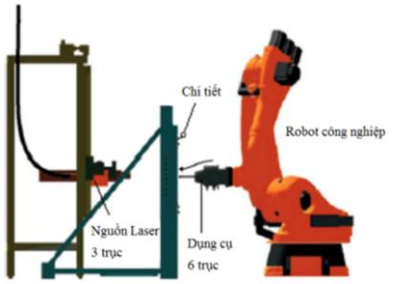
Nhiệt độ của tấm được nhận biết bằng cặp nhiệt. Điện cực được làm mát bằng hệ thống làm mát bằng nước. Ưu điểm là thời gian gia nhiệt nhanh, kiểm soát nhiệt độ khá chính xác. Nhược điểm: vật liệu phải dẫn điện, dòng điện cao.

Fan và cộng sự [15] sử dụng phương pháp gia nhiệt như của David Adams [13] để nghiên cứu khả năng tạo hình của tấm hợp kim magie AZ31 và hợp kim titan $TiA_2Mn_{1,5}$.

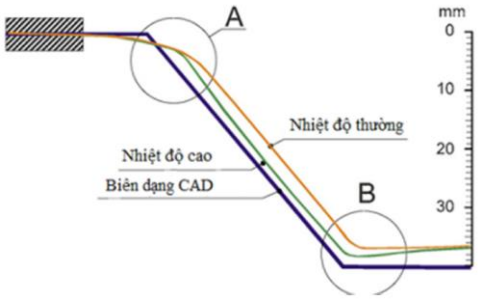


Hình 1. 10 Thí nghiệm của Fan [15]

Một phương pháp gia nhiệt cục bộ tại vùng tiếp xúc giữa dụng cụ và chi tiết nữa là dùng tia lazer của Duflou [10, 16] (*Hình1.11*).



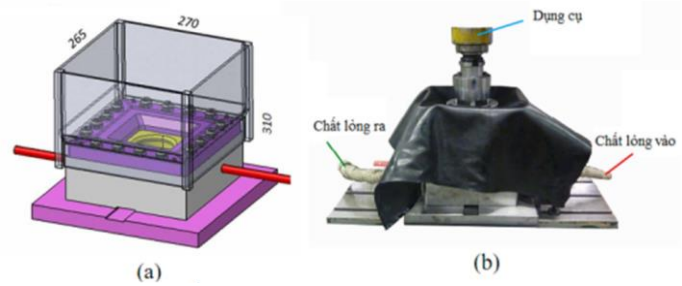
Hình 1. 11 Gia nhiệt bằng Lazer của Doflou [16]



Hình 1. 12 Kết quả nghiên cứu của Doflou [16].

Từ hình vẽ cho thấy nhiệt độ cao khả năng biến dạng lớn hơn nhiệt độ bình thường và độ chính xác hình học cũng gần với biên dạng thiết kế hơn.

L. Galdos và các tác giả [17] nghiên cứu khả năng biến dạng của hợp kim Magie ở nhiệt độ cao, họ dùng dòng chất lỏng gia nhiệt nóng để làm nóng chi tiết như hình vẽ



Hình 1. 13 Thiết bị gia nhiệt của L.Galdos a) Mô hình CAD b) Mô hình thực tế [17

Các nghiên cứu về SPIF cho kim loại tấm khó biến dạng khác với kim loại tấm dẻo về cơ bản là thiết bị gia nhiệt, còn phương pháp và các thông số công nghệ vẫn như nhau.

❖ **TPIF cho kim loại tấm dẻo**

Đối với phương pháp tạo hình gia tăng đa điểm (Two Point Incremental Forming–TPIF) thì có một số nhóm nghiên cứu đã thực hiện nghiên cứu trong một vài năm trở lại đây.

A. Attanasio và các cộng sự [25], nghiên cứu hiện tại nhằm hoàn chỉnh kiến thức về quá trình biến dạng gia tăng tấm cho hai phương pháp TPIF và SPIF. Nghiên cứu bao gồm các thí nghiệm trên khoang cửa xe ô tô để đánh giá lỗi kích thước và hình học liên quan tới biên dạng cố định CAD. Cùng thông số hoạt động và cùng đường chạy dao được áp dụng. Bằng cách so sánh kết quả, có thể nhận thấy rằng TPIF đảm bảo đạt được độ chính xác tốt hơn (cải thiện 25-30% trong các trường hợp tốt nhất) ngay cả khi lỗi này không đáng kể. Về phần chất lượng, TPIF đảm bảo hoàn thiện bề mặt tốt hơn, đặc biệt là gần bán kính bo tròn xung quanh khoang cố định. Mô hình phần tử hữu hạn cho thấy đủ tin cậy để thể hiện quá trình thực tế. Độ chính xác có thể được cải thiện bằng cách mô phỏng các tấm đàn hồi. Giới hạn bao gồm thời gian tính toán cao. Kết quả tốt nhất về sai số kích thước và độ chính xác đạt được với mô phỏng bản vẽ chiều sâu mà đại diện cho giải pháp làm việc cho sản xuất hàng loạt.

Isabel Bagudanch và các cộng sự [21], tập trung vào việc xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ chính để tạo ra hình tứ diện chóp cụt với đường sinh tròn xoay dùng vật liệu PVC và PC. Kết quả so sánh sự thay đổi giữa hai kỹ thuật SPIF và TIPF. Như dự kiến với TPIF, có thể tăng độ chính xác hình học của phần cuối và giảm ảnh hưởng độ co dãn trở lại. Hơn nữa, kết quả cho thấy ảnh hưởng quan trọng của tốc độ trục chính trong quá trình ISF của vật liệu polymer, không chỉ trên lực biến dạng tối đa mà còn trên khả năng biến dạng của nó, bằng cách đạt được độ sâu tối đa. Đây là kết quả của việc kích hoạt tăng nhiệt độ thu được do ma sát giữa dụng cụ và tấm biến dạng, theo sự thay đổi nhiệt độ được cho là yếu tố chính gây ra sự biến đổi về cơ tính của nhựa nhiệt dẻo.

Qua đó cho thấy rằng, phương pháp TPIF đạt được độ chính xác kích thước hình học và chất lượng bề mặt hơn là phương pháp SPIF.

J. Jeswiet và các cộng sự [20], đo lực xảy ra trong gia công biến dạng tấm nhôm 3003-0 dày 1,21 *mm* đã được đo thành công, với thiết kế hai cảm biến riêng biệt của việc biến dạng gia tăng tấm kim loại theo SPIF và TPIF. Ngoài ra, lực cực đại có thể được quan sát ở nơi xảy ra phá hủy tại góc biến dạng lớn nhất α_{max}.

Chủ đề mô phỏng, nhóm tác giả Chenhao Wang [19], tính toán mô hình phá hủy The enhanced Lemaitre cho hiệu ứng dừng nứt tế vi được sử dụng để dự đoán phá hủy trong biến dạng gia tăng đa điểm bằng cách sử dụng phần mềm Abaqus/Explicit với module vật liệu mở rộng VMAT. Vật liệu không thay đổi trong mô hình phá hủy được hiệu chỉnh trong suốt thử nghiệm độ bền kéo bằng cách giảm thiểu sai số lực khi sử dụng phương pháp Newton. Biến dạng gia tăng đa điểm với lưỡi cắt hình bán cầu, dùng mô hình phá hủy cơ học phá hủy liên tục the enhanced Lemaitre trong phần tử hữu hạn cho thấy đồng nhất của sự phân bố chiều dày, chiều sâu đứt và so sánh hướng lực biến dạng với kết quả thực nghiệm tương ứng. Kết luận là mô hình the enhanced CDM-based Lemaitre (Continuum Damage Mechanics – CDM) có thể được sử dụng cho phá hủy dẻo của hộp kim nhôm AA 7075 trong biến dạng gia tăng đa điểm với lưỡi cắt hình bán cầu. R.Perez-Santiago và cộng sự [24]

nghiên cứu lực là một tham số quá trình quan trọng để xác nhận các mô hình FEM xu hướng định tính như phân bố độ dày và lực đạt được cao hơn ở mức Δθ cao hơn được sao chép chính xác. Adil Shbeeb Jaber và các cộng sự [27] nghiên cứu cơ chế biến dạng và biến dạng gia tăng nhiều giai đoạn. Độ lớn bước tiến và bán kính dụng cụ tạo hình lên phân bố độ dày và phân tích biến dạng cho ba giai đoạn biến dạng với góc 90^o. Mô hình 2-D, chi tiết hình nón với góc tạo hình bên phải, góc tạo hình 60^o, độ dày 1 *mm*, hợp kim nhôm (AA1070). Phần mềm ANSYS 11 được sử dụng để thực hiện mô phỏng biên dạng nhiều giai đoạn. Kết quả cho thấy, biến dạng gia tăng vật liệu tấm nhiều giai đoạn, công việc này khó khăn hơn vì kết quả biến dạng và độ dày phân bố từ giai đoạn đầu tiên sẽ ảnh hưởng đến kết quả giai đoạn tiếp theo. Giảm bán kính dụng cụ tạo hình sẽ làm tăng độ dày của sản phẩm do kéo căng quá mức sẽ xảy ra, trong khi độ lớn bước tiến dao (z) tăng không ảnh hưởng đáng kể đến kết quả mô phỏng (độ dày, biến dạng) của sản phẩm. Cuối cùng, mục tiêu để đạt được góc biến dạng 90^o và duy trì độ dày sau biến dạng và biến dạng trên thành chi tiết được hướng đến. Kiểm tra cơ học, chương trình máy tính, hình học và thiết kế được đặt ra. Kết quả mô phỏng bao gồm phân bố độ dày và biến dạng trên thành sản phẩm trong suốt ba giai đoạn đã được kết luận. Haibo Lu và cộng sự [18] nghiên cứu cải thiện độ chính xác trong công nghệ biến dạng gia tang đa điểm với dưỡng tạo hình một phần cố định bằng thuật toán điều khiển dự báo mô hình, hình dạng không đối xứng, chứa cả các phần phẳng và cong, Góc biến dạng là 40^o, độ sâu 35*mm*, nhôm (AA 7075-O), độ dày 1,6 *mm*, đường kính dao 20 *mm*, vận tốc V_{xy} 4000 *mm/ph*. Thuật toán điều khiển đường chạy dao điều chỉnh theo hướng ngang và dọc thông qua tối ưu hóa hai tham số đường chạy dao $(\Delta u_r$ và $\Delta u_z)$ trong hai mô-đun điều khiển riêng biệt. So với kiểu điển hình, quá trình TPIF không có hiệu chỉnh đường chạy dao, cải thiện khá chính xác về độ chính xác hình học đã đạt được với việc sử dụng chiến lược hiệu chỉnh đường chạy dao trong TPIF với dưỡng tạo hình một phần cố định trong khi độ chính xác hình học trong các vùng bo một phần đòi hỏi phải cải thiện hơn. Công việc này cung cấp một cách tiếp cận hữu ích để đạt được kiểm soát hiệu chỉnh đường chạy dao trong quá trình TPIF.

Seyed Ali Asghar Asghari và các cộng sự [28]. Tối ưu hóa bằng phân tích quan hệ màu xám với các yếu tố đáp ứng (độ dày nhỏ nhất, độ co dãng, độ nhám bề mặt), các thông số tối ưu hóa là đường kính dụng cụ 15 *mm*, góc tạo hình 63^{o}, tốc độ trục chính 800 *vòng/phút* và bước tiến theo phương z là 0,2 *mm* với hình dạng hình nón, phân tích khả năng biến dạng của nhôm 1050 bằng TPIF. M. Safari [46] đã nghiên cứu một hình dạng phức tạp với hình nón có cả phần lồi và lõm, hợp kim nhôm 3105, độ dày 1 *mm* bằng TPIF với bước tiến z, số vòng quay trục chính. Một kết hợp tham số tối ưu (cả phần lõm / lồi, bước tiến z= 0,2 *mm* và số vòng quay trục chính = 1000 *vòng/phút*) thu được để có được cả độ cao bên ngoài và bên trong tối đa có thể đạt được bằng cách sử dụng phân tích tỷ lệ nhiễu. Hani Mostafanezhad và cộng sự [26] đã nghiên cứu nghiên cứu thực nghiệm dựa trên phương pháp đáp ứng bề mặt (RSM) được thực hiện để phân tích hiệu ứng của góc biến dạng, đường kính dụng cụ, độ dày tấm ban đầu và bước tiến theo phương z, dựa trên tỷ lệ độ dày sau biến dạng và lực biến dạng trong TPIF của hình nón cụt A1050. Một số thí nghiệm đã được thực hiện dựa trên thiết kế thí nghiệm Box-Bhenken và các mô hình toán học của các đáp ứng được phát triển bằng bằng ý nghĩa đáp ứng bề mặt và phân tích biến đổi. Phương pháp đáp ứng bề mặt thiết lập tham số tối ưu về tỷ lệ độ dày tối thiểu và lực tạo hình.

H. Meier và cộng sự [22] đã sử dụng hai robot công nghiệp trong TPIF, so với các máy tạo hình gia công biến dạng gia tăng khác, hệ thống này linh hoạt, độ chính xác hình học cao mà không cần bất kỳ công cụ hỗ trợ nào thêm. Phương pháp này, chất lượng bề mặt được cải thiện.

Xiaoqiang Li và cộng sự [45] nghiên cứu thực nghiệm và mô phỏng về chất lượng bề mặt công nghệ biến dạng gia tăng đa điểm. Tạo hình với bộ nội suy, ảnh hưởng của các biến quá trình (đường kính dao, bước tiến theo phương z và độ dày của bộ nội suy) đến quá trình tạo hình (ví dụ độ nhám bề mặt, lực tạo hình và lỗi hình học) được nghiên cứu thông qua hệ thống thực nghiệm tiến đến thiết kế trọng tâm vật liệu composite trong TPIF. Việc tăng độ dày của bộ nội suy làm giảm độ nhám bề mặt theo hướng thẳng đứng với đường chạy dao trong khi tăng độ nhám bề mặt theo

hướng ngang với đường chạy dao. ảnh hưởng kết hợp giữa độ dày của bộ nội suy và các tham số quá trình (đường kính dao và bước tiến theo phương z) bị hạn chế. Vị trí của bộ nội suy ít ảnh hưởng đến hiệu quả lực tạo hình của khoảng trống. Lỗi hình học mở rộng với sự gia tăng bước tiến theo phương z và độ dày của bộ nội suy, trước tiên giảm và sau đó tăng đường kính dao. Cơ chế ảnh hưởng của phương pháp nội suy lên chất lượng bề mặt có thể được quy cho việc giảm áp lực tiếp xúc do sự gia tăng diện tích tiếp xúc với lực tiếp xúc không thay đổi.

Tóm lại, phương pháp TPIF có nhiều ưu việt hơn SPIF, SPIF kết cấu đồ gá đơn giản, giá thành thấp nhưng hạn chế là không thể tạo hình các chi tiết tấm vừa lõm vừa có vùng lồi. TPIF phải dùng thêm dưỡng tạo hình, kết cấu đồ gá cần chuyển động hạ xuống, nâng lên cùng với đầu dụng cụ tạo hình, do đó giá thành chế tạo đồ gá cao nhưng phạm vi tạo hình rộng hơn có thể tạo hình các chi tiết tấm vừa lõm vừa có vùng lồi. TPIF có thể tạo ra hình hình dạng phức tạp, những biên dạng không đối xứng, tạo hình có độ chính xác hình học, kích thước và chất lượng bề mặt hơn SPIF. Từ các ưu việt kể trên của TPIF, nên có nhiều phương pháp nghiên cứu về TPIF đang được đặt ra, thiết kế đồ gá tạo hình TPIF, dự đoán vết nứt xuất hiện bằng phần mềm FEM, ảnh hưởng của thông số công nghệ đến khả năng tạo hình và độ nhám bề mặt, …

- **Các thông số trong nghiên cứu TPIF**

Attanasio cùng cộng sự [25] dùng thông số đường kính dụng cụ, tốc độ trục chính, vận tốc dụng cụ V_{xy}, bước tiến theo phương z nghiên cứu hiện tại nhằm hoàn chỉnh kiến thức về quá trình biến dạng gia tăng tấm cho hai phương pháp TPIF và SPIF. Isabel Bagudanch cùng cộng sự [21] dùng thông số, đường kính dụng cụ, tốc độ trục chính, vận tốc dụng cụ V_{xy}, bước tiến theo phương z xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ chính để tạo ra hình tứ diện chóp cụt với đường sinh tròn xoay dùng vật liệu PVC và PC. J. Jeswiet [20] cùng cộng sự dùng thông số đường kính dụng cụ, tốc độ trục chính, vận tốc dụng cụ V_{xy}, bước tiến theo phương z đo lực xảy ra trong gia công biến dạng tấm nhôm 3003-0 dày 1,21 *mm*. ... Nhìn chung, các

nghiên cứu đều tập trung khảo sát các thông số công nghệ đường kính dụng cụ, tốc độ trục chính, vận tốc dụng cụ V_{xy}, bước tiến theo phương z. Trong nghiên cứu này, tác giả dùng các thông số đầu vào đường kính dụng cụ *D*, số vòng quay trục chính *n*, vận tốc dụng cụ V_{xy}, bước tiến theo phương z để khảo sát khả năng tạo hình của hợp kim nhôm A 1050 H14 dày 1,5 *mm* trong công nghệ tạo hình TPIF.

❖ **Các nghiên cứu về bôi trơn trong TPIF**

J. Diabb cùng cộng sự [48] nghiên cứu chất bôi trơn nano dầu thực vật và mòn trong công nghệ SPIF. hướng dương và cornoils, được bổ sung 0,0125; 0,025; 0,05 và 0,1% trọng lượng của hạt nano SiO_2 được sử dụng để bôi trơn hợp kim nhôm tấm 6061 trong SPIF. Bề mặt tấm nhôm 6061 mài mòn không đáng kể và giảm khi hạt nano SiO_2 0,025% trọng lượng được thêm vào dầu thực vật. Nuttaphong Sornsuwit và cộng sự [49] nghiên cứu chất bôi trơn và tính chất vật liệu về khả năng tạo hình trong SPIF. Độ nhám bề mặt của SUS 304 và SUS 316L thấp khi thổi khí làm chất bôi trơn. Độ nhám bề mặt của $TiGr_2$ thấp với chất bôi trơn MoS_2. Kishore Jawale, cùng cộng sự [50] nghiên cứu nghiên cứu bôi trơn bằng công nghệ SPIF cho đồng. Kết quả nghiên cứu này, dầu khoáng được sử dụng để bôi trơn. Đây là một sự lựa chọn kinh tế và tối ưu để biến dạng gia tăng vật liệu đồng và có tác động tích cực và đáng kể đến bề mặt hoàn thiện. Cũng có thể kết luận rằng các điều kiện bôi trơn, trong trường hợp đồng, không ảnh hưởng đến khả năng tạo hình. Meghshyam Prabhakar Shisode và cộng sự [51] nghiên cứu bôi trơn hỗn hợp để tạo hình kim loại tấm. Một hỗn hợp bôi trơn đã được sử dụng để xác định hệ số ma sát. Nó dựa trên các điều kiện tiếp xúc vị trí và kết quả hệ thống. Ma sát biên ảnh hưởng trực tiếp đến dụng cụ đo và bề mặt phôi. Phương trình Reynolds được sử dụng để tính các ảnh hưởng của độ nhám. Mặt khác, phần mềm FE được sử dụng để mô phỏng mô hình ma sát liên kết (ma sát biên và mô hình ma sát thủy động lực học). Kết quả mô phỏng được thể hiện rõ ràng.

Nhìn chung, tất cả các nghiên cứu đều tập trung vào chất bôi trơn thích hợp với SPIF. Trong nghiên cứu này, bột than chì, dầu bôi trơn (Gear VG 150 EP), mỡ

bôi trơn công nghiệp và hỗn hợp bôi trơn đã được nghiên cứu với phương pháp bôi trơn là nhúng chìm đầu dụng cụ tạo hình, ảnh hưởng của bôi trơn lên khả năng biến dạng nhôm tấm bằng công nghệ biến dạng gia tăng đa điểm. Chúng ta sẽ chọn chất bôi trơn phù hợp từ bốn chất bôi trơn kể trên cho nhôm tấm bằng công nghệ TPIF để đạt được chất lượng bề mặt sản phẩm tốt nhất thông qua việc khảo sát một hình côn nón chóp cụt bằng công nghệ TPIF cho tấm nhôm ở nhiệt độ phòng.

❖ **Các nghiên cứu về phần mềm mô phỏng TPIF**

Chenhao Wang cùng cộng sự [19], sử dụng phần mềm Abaqus trong tiên đoán phá hủy dẻo, trong biến dạng gia tăng đa điểm kim loại tấm. R. Perez-Santiago cùng cộng sự [24], sử dụng phần mềm LS-DYNA, trong biến dạng gia tăng cục bộ đa điểm. Adil Shbeeb Jaber cùng cộng sự [27], sử dụng phần mềm ANSYS mô phỏng biến dạng gia tăng cục bộ nhiều lớp, đa điểm của kim loại tấm. Lu Ou cùng cộng sự [47], sử dụng phần mềm LS-DYNA mô phỏng biến dạng gia tăng đa điểm kim loại tấm. Nhìn chung, có nhiều phần mềm mô phỏng TPIF như LS-DYNA, ANSYS, Abaqus,… mỗi phần mềm có ưu nhược điểm khác nhau, cách sử dụng chúng sao cho phù hợp, tiện lợi và dễ sử dụng... Trong nghiên cứu này, luận án sử dụng phần mềm Abaqus cho dự báo khuyết tật khả năng biến dạng nhôm tấm A1050 H14, dày 1,5 *mm* trong quá trình TPIF.

Chenhao Wang cùng cộng sự [19] dùng phần mếm Abaqus tiên đoán phá hủy vật liệu hợp kim nhôm AA 7075 trong công nghệ TPIF và thực nghiệm cho kết quả chiều dày biến và chiều sâu mô hình trùng với thực nghiệm. Lu Ou cùng cộng sự [47] dùng phần mếm LS-DYNA mô phỏng và thực nghiệm hợp kim nhôm AA1060 dày 1 *mm* kích thước phôi 200x200 *mm*, kích thước lưới 1,5 *mm* bằng công nghệ TPIF nhiều bước. Kết quả tăng số bước tạo hình thì góc tạo hình giảm, độ đồng đều về độ dày của chi tiết tạo hình được cải thiện một cách hiệu quả. R. Perez-Santiago cùng cộng sự [24] phần mếm LS-DYNA mô phỏng và thực nghiệm $FeP0_4$ trong công nghệ TPIF, kết quả phân bố độ dày biến dạng khá chính xác. Nhìn chung, các nghiên cứu

thực nghiệm kiểm chứng các nghiên cứu mô phỏng khá chính xác về phân bố độ dày, kích thước chi tiết,...

TÓM TẮT CHƯƠNG 1

Trong chương 1 luận án đã trình bày:

-Công nghệ tạo hình tấm không dùng khuôn ISF, công nghệ SPIF và TPIF.

-Tình hình nghiên cứu ISF trong và ngoài nước.

- Các thông số trong nghiên cứu TPIF

-Các nghiên cứu về bôi trơn trong TPIF

- Các nghiên cứu về phần mềm mô phỏng TPIF

Sau khi khảo sát các công trình nghiên cứu SPIF đã thực hiện trong những năm gần đây, luận án tập trung nghiên cứu TPIF, dựa trên bốn thông số công nghệ vận tốc dụng cụ V_{xy} (*mm/phút*), bước tiến theo phương z của dụng cụ Δz (*mm*), đường kính dụng cụ D (*mm*) và số vòng quay trục chính n (*vòng/phút*); lựa chọn thông số máy phù hợp nhằm tối đa hóa hàm mục tiêu góc tạo hình α (là góc hợp bởi tiếp tuyến của bề mặt tạo hình và phương ngang).

-Nhôm A1050 H14 dày 1,5 *mm*, đại diện cho kim loại màu thường được ứng dụng rộng rãi, chế tạo các loại carter, vỏ máy, thiết bị thực phẩm, đồ dung gia dụng,…

Chương 2
CƠ SỞ LÝ THUYẾT

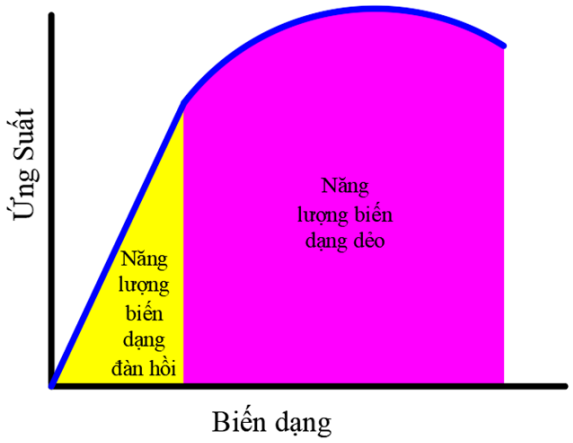
2.1 Lý thuyết biến dạng kim loại

Biến dạng kim loại gồm các dạng biến dạng sau: biến dạng trong miền đàn hồi, biến dạng dẻo tuyệt đối và biến dạng đàn dẻo (elasto-plastic) trong vùng chảy dẻo (Hình 2.1). Biến dạng dẻo là một quá trình biến dạng không thuận nghịch và xẩy ra khi ứng suất trong vật liệu vượt quá giới hạn chảy, định luật HOOKE chỉ phù hợp với miền đàn hồi tuyến tính của vật liệu và hoàn toàn không thể áp dụng trong vùng chảy dẻo phi tuyến của vật liệu phải dùng công thức Ramberg– Osgood [88]

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma_R}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_R}\right)^m \qquad (2.1)$$

Hoặc dùng kết hợp công thức Ludwik [88]

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & \varepsilon \le \frac{\sigma_E}{E} \\ \sigma_E \left(\frac{E\varepsilon}{\sigma_E}\right)^n, & \varepsilon \ge \frac{\sigma_E}{E} \end{cases} \qquad (2.2)$$

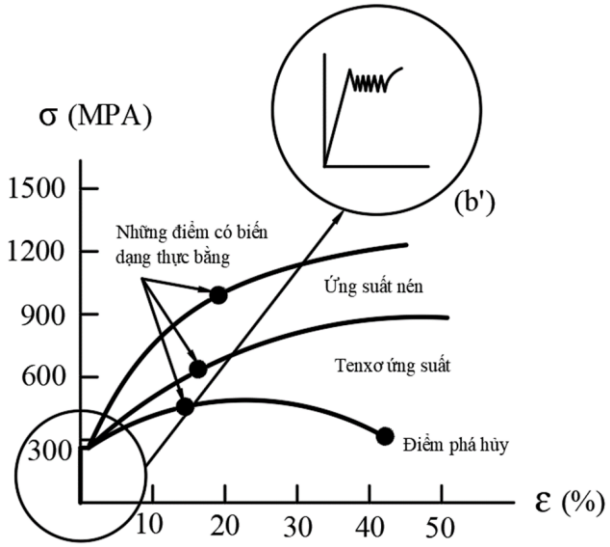


Hình 2.1 Biến dạng đàn hồi và biến dạng dẻo [52]

Trong công nghệ tạo hình tấm ISF trong đó có SPIF và TPIF thì vật liệu làm việc trên miền đàn hồi nên biến dạng dẻo cần cần phải được nghiên cứu vì tạo hình

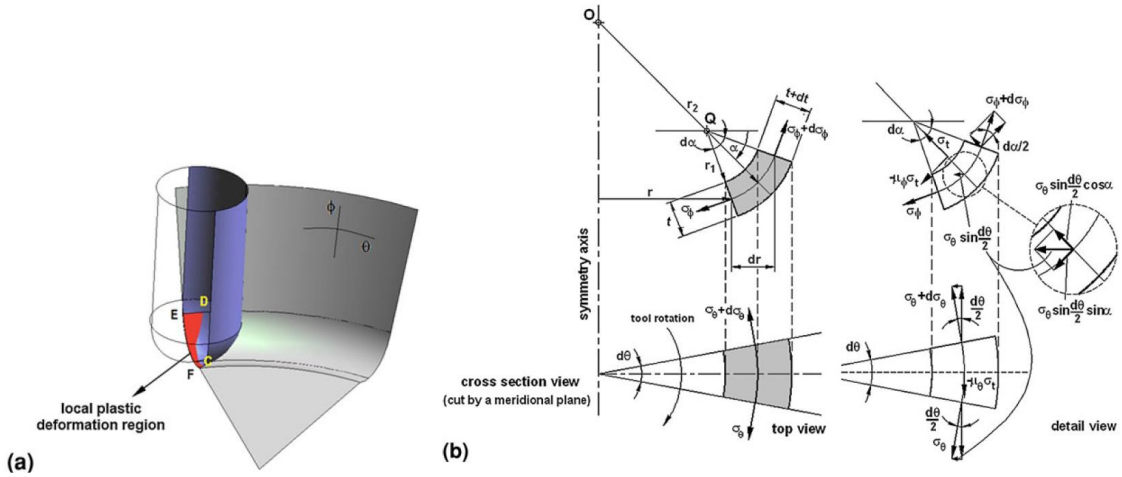
sản phẩm từ tấm phẳng luôn là một quá trình biến dạng dẻo phức tạp vì tính chất đàn dẻo của hầu hết các vật liệu. Ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào như thông số công nghệ (đường kính dụng cụ, vận tốc tiến dụng cụ, bước xuống dụng cụ …) là rất quan trọng. Chính vì thế, nó phải phù hợp với các thông số của kim loại tấm của vật liệu,... thì gia công tạo hình mới đạt được khả năng biến dạng lớn nhất (góc tạo hình α_{max}).

Ứng suất biến dạng của vật liệu dẻo được thể hiện qua giản đồ sau:



Hình 2.2 Giản đồ ứng suất biến dạng σ-ε [39]

Ứng suất tại một điểm bất kỳ được mô tả trong *hình 2.3*.



Hình 2.3 Ứng suất tại một điểm bất kỳ [23].

Trong miền đàn hồi, ứng suất nhỏ hơn giới hạn chảy (Yield point), không thể tạo hình được trong biến dạng cục bộ. Khi ứng suất nằm trong vùng chảy $\sigma_Y < \sigma < \sigma_u$ thì biến dạng cục bộ có thể tạo hình được. Khi ứng suất lớn hơn hoặc bằng giá trị ứng suất phá hủy σ_U thì vết nứt, gãy, vỡ xuất hiện trên vật liệu. Vùng biến dạng dẻo là vùng có khả năng tạo hình (góc tạo hình α) bằng biến dạng dẻo. Cơ sở lý thuyết trong tài liệu [23] được xem là nền tảng cơ sở lý thuyết tạo hình ISF. Ứng suất tại một điểm bất kỳ theo tài liệu [23] thể hiện qua bảng sau:

Bảng 2.1 Tính ứng suất tại một điểm bất kỳ

Mối quan hệ giữa ứng suất và biến dạng trong SPIF và TPISF dạng đối xứng				
Giả thuyết		**Trạng thái ứng suất**	**Trạng thái biến dạng**	**Ứng suất thủy tĩnh**
SPIF	Điều kiện biến dạng trong mặt phẳng	$d\varepsilon_\emptyset = -d\varepsilon_t > 0$ $d\varepsilon_\theta = 0$ $d\varepsilon_t < 0$	$\sigma_\emptyset = \sigma_1 = \frac{\sigma_Y r_{tool}}{r_{tool}+t} > 0$ $\sigma_\theta = \sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ $\sigma_t = \sigma_3 = -\frac{\sigma_Y t}{r_{tool}+t} < 0$	$\sigma_m = \frac{\sigma_Y (r_{tool} - t)}{2(r_{tool}+t)}$
TPISF	Điều kiện biến dạng trong mặt phẳng	$d\varepsilon_\emptyset = -d\varepsilon_t > 0$ $d\varepsilon_\theta = 0$ $d\varepsilon_t < 0$	$\sigma_\emptyset = \sigma_1 = \frac{\sigma_Y r_{tool} - \sigma_\emptyset^{bh} t}{r_{tool}+t} > 0$ $\sigma_\theta = \sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ $\sigma_t = \sigma_3 = -\frac{(\sigma_Y + \sigma_\emptyset^{bh})t}{r_{tool}+t} < 0$	$\sigma_m = \frac{\sigma_Y (r_{tool} - t) - 2\sigma_\emptyset^{bh} t}{2(r_{tool}+t)}$

– Ứng suất tại một điểm bất kỳ là một hằng số và được phân tích theo 3 phương σ_ϕ, σ_θ, σ_t, là các ứng suất chính, các ứng suất này phụ thuộc vào ứng suất chảy σ_Y của vật liệu, bề dày tấm t và bán kính dụng cụ r_{tool}. Ứng suất thủy tĩnh cũng chịu ảnh hưởng tương tự.

– Các ứng suất này không ảnh hưởng đến chiều cao tạo hình, do đó khó xác định nguyên nhân phá hủy của vật liệu.

Tiêu chuẩn phá huỷ kim loại tấm trong quá trình ISF

Ứng suất khối

Theo các nghiên cứu cho thấy ứng suất khối ảnh hưởng quan trọng đến biến dạng dẻo của vật liệu trước khi mặt gãy dẻo xuất hiện.

$$\eta = \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} \tag{2.3}$$

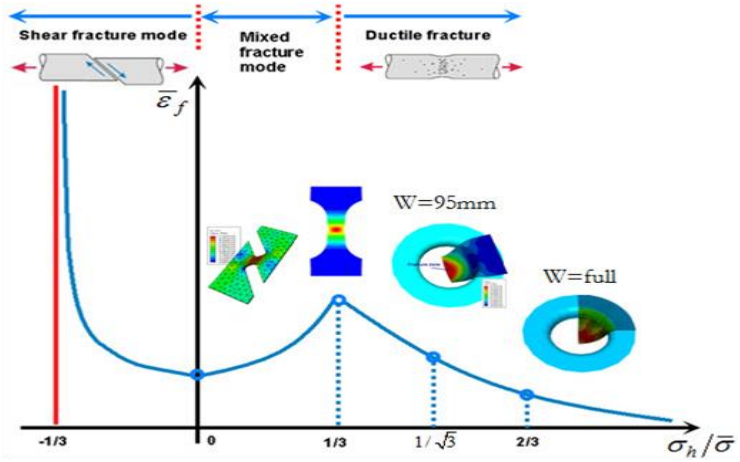
$$\sigma_h = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \tag{2.4}$$

Trong đó

σ_h : ứng suất trung bình (ứng suất thuỷ tĩnh),

$\bar{\sigma}$ là ứng suất thực Von Mises,

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: ứng suất chính, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.



Hình 2.4 Ứng suất khối so với đại lượng biến dạng [5].

Theo *hình 2.4* phạm vi của ứng suất khối trong biến dạng là từ -1/3 đến 2/3, được chia ra làm ba phạm vi. Giới hạn -1/3 tương ứng với giá trị cắt cho ứng suất khối âm đươc phát hiện bởi Bao và các cộng sự [22]. Giới hạn lớn hơn 2/3 là giá trị tối đa của ứng suất khối, thể hiện nhiều mẫu vật với cấu trúc hình học khác nhau. Ứng suất khối [-1/3,0]: thí nghiệm nén mẫu vật hình trụ với chiều cao khác nhau, tiệm cận đứng ở giá trị $\sigma_h / \sigma_e = -1/3$. Sự phá huỷ xảy ra khi trạng thái ứng suất hoặc biến dạng đạt đến giá trị giới hạn C.

$$\bar{\varepsilon} \text{ or } \bar{\sigma} = C \tag{2.5}$$

$$\tau_{\max} = C \tag{2.6}$$

Tiêu chuẩn rạn nứt dựa trên trạng thái ứng suất, biến dạng.

Dựa trên trạng thái ứng suất: Ứng suất chính tối đa, Tresca's and von Mises, Tiêu chuẩn rạn nứt của Mohr. Dựa trên trạng thái biến dạng: biến dạng chính tối đa, hằng số biến dạng tương đương, giản đồ giới hạn tạo hình. Dựa trên trạng thái ứng suất và biến dạng: Cockcroft-Latham.

2.2 Lý thuyết về quy hoạch thực nghiệm

2.2.1 Tổng quan và phương pháp quy hoạch thực nghiệm

Quy hoạch thực nghiệm (QHTN) là nhằm xác định mối liên hệ giữa các thông số kỹ thuật bằng cách thực nghiệm và xử lý số liệu từ kết quả thực nghiệm. Mô hình thực nghiệm hợp lý được lựa chọn dựa trên các PPQHTN chuẩn.

Theo các nghiên cứu trước [51], các thông số công nghệ : bước tiến theo phương z (Δz), vận tốc dụng cụ V_{xy}, đường kính dụng cụ D, số vòng quay n của dụng cụ ảnh hưởng đến khả năng tạo hình (góc tạo hình α) theo hàm bậc hai.

Quy hoạch thực nghiệm bậc hai

Theo [41], TNT và TNR thu được phương trình hồi quy tuyến tính phụ thuộc giữa đáp ứng và các nhân tố thay đổi. Khi phân tích chi tiết thì phương trình này cho ta các sai số lớn và không thích hợp để mô tả thực nghiệm. Do đó, cần tiến hành quy hoạch thực nghiệm bậc hai, phương trình hồi quy bậc hai có dạng tổng quát sau:

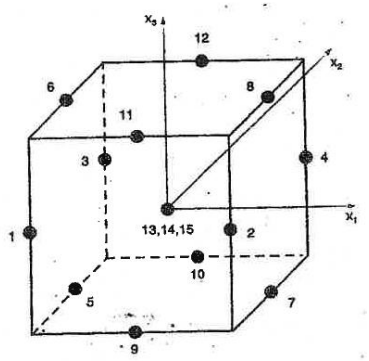
$$y = b_0 + \sum_{i=1}^{k} b_i x_i + \sum_{i=1}^{k} b_{ii} {x_i}^2 + \sum_{i,j=1}^{k} b_{ij} x_i x_j$$

với i<j (2.7)

Số hệ số hồi quy của phương trình là $p=1+2k+k(k-1)/2=\frac{(k+1)(k+2)}{2}$

Số thực nghiệm N phải lớn hơn số hệ số p: N≥p.

Quy hoạch Box-Behnken là quy hoạch thực nghiệm bậc hai độc lập không chứa các quy hoạch TNT hoặc TRT. Các điểm thực nghiệm là điểm giữa các cạnh của không gian quy hoạch và tại điểm tâm (hình 2.5).



Hình 2.5 Quy hoạch Box-Behnken ba nhân tố.

Quy hoạch thực nghiệm bậc hai được thực hiện theo các bước sau [39]:

– Lựa chọn phương pháp quy hoạch sẽ thực hiện, số thông số ảnh hưởng (thông số đầu vào), giá trị của các thông số này, số thông số cần khảo sát (thông số đầu ra).

– Xác định số mẫu thực nghiệm, lập bảng thực nghiệm cho thí nghiệm.

– Thực nghiệm số mẫu theo bảng thực nghiệm, đo đạc lấy số liệu đầu ra trên từng mẫu.

– Xử lý số liệu đầu ra từ các mẫu có thể sử dụng phần mềm QHTN như MiniTab, Design Of Expert (DOE), Statis... Luận án sử dụng phần mềm MiniTab để tính toán, thiết lập phương trình hồi quy (PTHQ), thể hiện mối quan hệ giữa các thông số đầu vào và thông số đầu ra dựa trên lý thuyết QHTN.

2.2.2 Xác định các yếu tố đầu vào

Các thông số đầu vào của nghiên cứu thực nghiệm thõa các điều kiện sau

– Là thông số độc lập, điều chỉnh được, sự thay đổi theo các mức quy hoạch là hoàn toàn độc lập, không phụ thuộc. Các véc tơ của chúng trong ma trận kế hoạch phải độc lập tuyến tính.

– Là thông số định lượng

– Thông số có hiệu ứng ảnh hưởng rõ nét đến hàm mục tiêu. Các căn cứ lựa chọn các thông số đầu vào: thông tin tiên nghiệm, kết quả nghiên cứu lý thuyết, ý kiến chuyên gia, các thực nghiệm thăm dò và thực nghiệm sàng lọc...

2.3 Mô phỏng phần tử hữu hạn trong ISF

Phương pháp phần tử hữu hạn (PPPTHH) là phương pháp số để giải các bài toán cơ học trong môi trường liên tục trong đó các yếu tố cơ học như chuyển vị, biến dạng, ứng suất, nhiệt độ, lưu lượng dòng chảy, lượng mưa…được mô tả bởi các phương trình vi phân riêng phần cùng với các điều kiện biên cụ thể.

Cơ sở của phương pháp này là rời rạc hóa các miền liên tục phức tạp của bài toán. Các miền liên tục lớn được chia thành nhiều miền nhỏ của từng phần tử. Các phần tử này được liên kết với nhau tại các điểm nút. Trên phần tử này, dạng biến phân tương đương với bài toán được giải xấp xỉ dựa trên các hàm xấp xỉ trên từng phần tử, thoả mãn điều kiện biên trên, cùng với sự cân bằng và liên tục giữa các phần tử. Trong PPPTHH, miền xác định V của tấm được chia thành một số hữu hạn các miền con, gọi là phần tử. Các miền này liên kết với nhau tại các điểm định trước trên biên của phần tử được gọi là nút. PPPTHH không tìm dạng xấp xỉ của hàm trên toàn miền xác định *V* của nó mà chỉ tìm trong những miền con V_e của từng phần tử thuộc miền xác định của hàm. Một số phần mềm mô phỏng như: SAP, FEAP (Finite Element Application Program), RDM, ANSYS, ABAQUS. Mỗi phần mềm có tính ưu việt riêng. Trong gia công biến dạng gia tăng thì phần mềm ABAQUS mang tính ưu việc hơn, ABAQUS là phần mềm chuyên dùng để tính toán mô phỏng đa dụng của hãng SIMULIA, thuộc tập đoàn Dassault Systeme (Pháp).

2.3.1 Phương pháp tích phân tường minh (Explicit)

Xét phương trình vi phân [35],[36]:

$$\dot{x} = f(x, t)$$

Nếu t là tập các giá trị rời rạc: $t = t_0, t_0 + \Delta t, t_0 + 2\Delta t, \dots., t_0 + n\Delta t$

$$\dot{x_n} = f(x_n, t_n)$$

Mặt khác, đạo hàm $\dot{x}_n$ có thể viết

$$\dot{x}_n = \frac{(x_{n+1} - x_n)}{\Delta t}$$

$$\frac{(x_{n+1} - x_n)}{\Delta t} = f(x_n, t_n)$$

$$\boldsymbol{x_{n+1} = x_n + \Delta t. f(x_n, t_n)} \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + \Delta t. f(x_0, t_0) \\ x_2 = x_1 + \Delta t. f(x_1, t_1) \\ \quad . \\ \quad . \\ \quad . \end{cases}$$

x_{n+1} phụ thuộc vào x_n và bước thời gian Δt.

2.3.2 Ổn định của tích phân tường minh

Xét phương trình:

$$\dot{x} = \lambda. x(t)$$

Nếu $x(0) = c$ thì phương trình có nghiệm chính xác là

$$x(t) = c. e^{\lambda t}$$

Nghiệm ổn định khi $\lambda \leq 0$

$$\boldsymbol{x_{n+1} = \lambda \Delta t x_n + x_n = (1 + \lambda \Delta t) x_n = (1 + \lambda \Delta t)^2 x_{n-1} = \cdots = (1 + \lambda \Delta t)^{n+1} x_0} \quad (2.9)$$

Khi n tăng thì x_{n+1} không tăng nếu

$$|1 + \lambda \Delta t| \leq 1 \; hay \; \Delta t \leq \frac{2}{\lambda}$$

Vì vậy, mặc dù cách tính x_{n+1} ở mỗi bước là đơn giản nhưng bước thời gian Δt phải đủ nhỏ để đảm bảo ổn định.

Phương pháp tường minh bắt đầu bằng phương trình vi phân của nút tại t=0. Vị trí của nút tại t=Δt được nội suy qua vị trí nút ban đầu và gia tốc.

Phương pháp tường minh ổn định có điều kiện, nghĩa là lời giải sẽ không khác thực tế, cung cấp độ rộng của Δt phải luôn bé hơn giá trị giới hạn. Giá trị này phụ thuộc vào kích thước nhỏ nhất của phần tử, thông số đàn hồi (modun đàn hồi E, hệ số

Poison) và khối lượng riêng. Giá trị này luôn rất nhỏ, trong khoảng 10^{-7}s, nên sẽ tạo ra số lượng lớn Δt trước khi kết thúc mô phỏng. Tuy nhiên, việc tính toán gia tốc nút ban đầu không yêu cầu giải bất kì hệ phương trình nào. Do vậy, mỗi bước Δt sẽ được tính rất nhanh.

Nói tóm lại, kích thước của hệ phương trình có thể giảm xuống, khi đó giới hạn Δt sẽ lớn hơn mà vẫn không mất độ chính xác cao giúp cho động năng luôn nhỏ hơn nội năng, khoảng nhỏ hơn 5-10%. Thủ thuật này được gọi là mass-scaling. Thủ thuật tương đương được gọi là time-scaling được dùng để tăng tốc độ của dụng cụ.

2.3.3 Phương pháp tích phân tiềm ẩn (Implicit)

$\dot{x}_n$ cũng có thể được tính như sau:

$$\dot{x}_n = \frac{(x_n - x_{n-1})}{\Delta t}$$

$$\frac{(x_n - x_{n-1})}{\Delta t} = f(x_n, t_n)$$

$$x_n = \Delta t.\, f(x_n, t_n) + x_{n-1}$$

$$\boldsymbol{x_{n+1} = \Delta t.\, f(x_{n+1}, t_{n+1}) + x_n} \qquad (2.10)$$

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + \Delta t.\, f(x_1, t_1) \\ x_2 = x_1 + \Delta t.\, f(x_1, t_{11}) \\ \quad . \\ \quad . \\ \quad . \end{cases}$$

2.3.4 Ổn định của tích phân tiềm ẩn

Cũng từ phương trình: $\dot{x} = \lambda.\, x(t)$ (2.11)

$$x_{n+1} = \lambda \Delta t x_{n+1} + x_n$$

$$x_{n+1} - \lambda \Delta t x_{n+1} = x_n$$

$$(1 - \lambda \Delta t) x_{n+1} = x_n$$

$$x_{n+1} = \frac{x_n}{(1 - \lambda \Delta t)} = \frac{x_{n-1}}{(1 - \lambda \Delta t)^2} = \cdots = \frac{x_0}{(1 - \lambda \Delta t)^{n+1}}$$

Với $\lambda \leq 0$ thì $|1-\lambda \Delta t| \geq 1$ luôn luôn đúng. Tích phân ẩn ổn định không cần điều kiện.

Đối với phương pháp này, giả thiết là có vận tốc tại nút ở đầu bước thời gian. Vị trí của nút ở cuối time step có thể được ngoại suy. Vị trí liên quan đến biến dạng, từ biến dạng tính được ứng suất thông qua phương trình cơ bản. Tích phân ứng suất trên một đơn vị thể tích, tức là nội lực phải thỏa phương trình cân bằng. Chính vì vậy, điều kiện ban đầu là giá trị vận tốc tại nút phải chính xác và đòi hỏi lặp lại liên tục nhiều lần để hội tụ đến trạng thái cân bằng.

Ưu điểm là ổn định không cần điều kiện (tự ổn định) nghĩa là lời giải chính xác mà không cần biết độ dài bước thời gian. Hạn chế của nó là phải yêu cầu tính lặp nhiều lần trước khi hội tụ về kết quả chính xác, đặc biệt đối với các bài toán phi tuyến. Ngoài ra, tại mỗi lần lặp, phải tính một hệ phương trình tuyến tính lớn. Do vậy, thời gian tính toán sẽ rất lớn.

Trong mô phỏng FEM của quá trình TPIF, những nhà nghiên cứu trước đây cho rằng cách giải quyết bằng phương pháp tiềm ẩn thường gặp vấn đề về hội tụ và mất nhiều thời gian tính toán. Đó là do mô hình phân tích lớn và nhiều vấn đề về phi tuyến gặp phải trong phương pháp. Khắc phục hạn chế, dùng phương pháp tường minh là sự lựa chọn đầu tiên cho mô phỏng FEM trong đó tỉ lệ khối lượng và tỉ lệ thời gian được sử dụng giúp rút ngắn thời gian tính toán [5].

TÓM TẮT CHƯƠNG 2

Hệ thống hóa các cơ sở lý thuyết biến dạng kim loại, tiêu chuẩn phá hủy; quy hoạch thực nghiệm bậc hai; phần tử hữu hạn trong ISF.

Chương 3 HỆ THỐNG THÍ NGHIỆM

3.1 Thiết bị và đồ gá cho ISF

3.1.1 Thiết bị thí nghiệm

Thiết bị tạo hình biến dạng gia tăng cục bộ có nhiều kiểu thiết bị thí nghiệm như: máy CNC, dùng một cánh tay robot, dùng hai cánh tay robot, máy ISF thông thường, máy ISF chuyên dùng như hình.

Thời gian đầu, các nhà nghiên cứu dùng máy phay CNC để tạo hình ISF. Sau đó người ta chế tạo ra một số máy chuyên dùng ra đời như máy SPIF của AMINO corp., Ford, Honda, BMW, máy SPIF chuyên dùng của DCSELAB...

Hình 3. 1 Máy chuyên dùng ISF Của DCSELAB.

Thí nghiệm này được tiến hành trên máy SPIF của DCSELAB với các đặc tính kỹ thuật như sau: hành trình theo ba phương OX, OY, OZ: X = 800 *mm*, Y = 500 *mm*, Z = 300 *mm*; kích thước bàn máy 1200 *mm* x 800 *mm*; công suất trục chính 4.5 *kW*, tốc độ 400-4000 *vòng/phút*; khoảng tốc độ ổn định của trục chính 300 vòng/phút–2000 *vòng/phút*.

3.1.2 Dụng cụ tạo hình

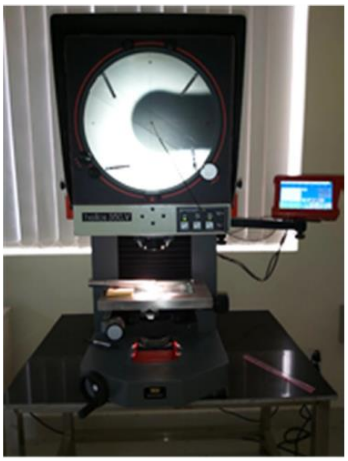
Dụng cụ tạo hình được phân theo ba loại chính như sau:

Kiểu dụng cụ tạo hình, vật liệu dụng cụ tạo hình và kích thước dụng cụ tạo hình. Dụng cụ tạo hình được chế tạo với nhiều hình dạng, kích thước, kết cấu và vật liệu khác nhau. Trong thí nghiệm này, dụng cụ tạo hình làm thí nghiệm có hình dạng gần giống như dao phay ngón có đầu bán cầu, không có lưỡi cắt. Dụng cụ tạo hình được chế tạo từ thanh thép hình trụ, một đầu hàn với viên bi thép sau đó tiện lại thân dụng cụ tạo hình cho đồng tâm *hình 3.2, 3.3, 3.4,* ba loại đường kính bán cầu là *Ø* 6, *Ø* 12, *Ø* 18 *mm* được dùng làm thí nghiệm.

Hình 3. 2 Dụng cụ tạo hình có đường kính bán cầu Ø6 *mm*.

Hình 3. 3 Dụng cụ tạo hình có đường kính bán cầu Ø12 *mm*.

Hình 3. 4 Dụng cụ tạo hình có đường kính bán cầu Ø18 *mm*.



Hình 3. 5 Kiểm tra biên dạng đầu dụng cụ

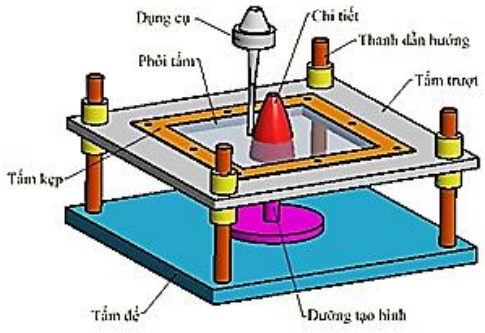
3.1.3 Đồ gá

Đồ gá dùng cho TPIF là đồ gá chuyên dùng gồm bốn thanh dẫn hướng lắp chặt vào tấm đế, tấm trượt rỗng ở giữa được lắp chặt vào bốn bạc trượt, bạc trượt lắp vào thanh dẫn hướng; phôi được kẹp chặt giữa tấm kẹp và tấm trượt bằng tám bu lông,

phôi trượt xuống dọc theo thanh dẫn hướng cùng với khung trượt, dưới phôi là dưỡng tạo hình như *hình 3.7*.

3.2 Thiết kế đồ gá TPIF

Đồ gá được thiết kế dựa trên đồ gá SPIF [51], với vật liệu là thép CT3 và kích thước (phụ lục A.1.3.2) như hình sau:



Hình 3. 6 Mô hình CAD

Hình 3. 7 Mô hình thực tế Đồ gá TPIF.

3.3 Chất bôi trơn

Chất bôi trơn trong thí nghiệm của luận án là một yếu tố quan trọng quyết định chất lượng bề mặt và khả năng tạo hình trong công nghệ TPIF. Vai trò của chất bôi trơn là làm giảm ma sát tăng khả năng tạo hình. Thí nghiệm này sử dụng hỗn hợp bôi trơn gồm mỡ GADUS V220, nhớt (Gear VG 150 EP) và than chì trộn đều với tỷ lệ như sau: 1:1. Phương pháp bôi trơn là bôi lên bề mặt tấm nhôm bị biến dạng hợp chất bôi trơn, đảm bảo bề mặt tiếp xúc giữa đầu dụng cụ tạo hình và tấm nhôm luôn được bôi trơn.

Mỡ GADUS V220 Gear VG 150 EP Than chì Hỗn hợp bôi trơn

Hình 3. 8 Hợp chất bôi trơn.

3.4 Hình dạng chi tiết khảo sát

Phôi tạo hình là dạng phôi tấm với các tính chất như hình dạng phôi, kiểu vật liệu, chiều dày, tính chất cơ lý.

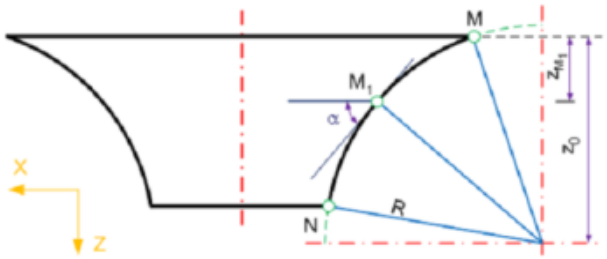
Hình dạng chi tiết: Việc chọn hình dạng chi tiết khảo sát nhằm xác định được khả năng biến dạng của vật liệu là một yêu cầu cần thiết quyết định sự thành công của luận án. Đối với quá trình SPIF, mô hình khảo sát khả năng biến dạng được các nghiên cứu chọn là mô hình côn cong [5], góc biến dạng tuyến tính từ 0 – 90°, góc biến dạng tính theo công thức:

$$\propto = \arccos\left(\frac{R-z}{R}\right) \quad (3.1)$$

Trong đó: α: Góc tạo hình lớn nhất tại vị trí rách

R: bán kính biên dạng mẫu,

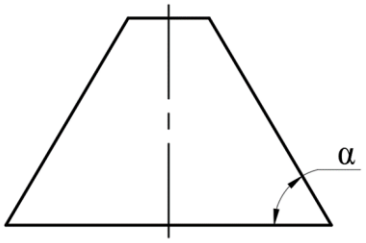
z: chiều sâu từ mặt trên đến chỗ rách



Hình 3. 9 Mẫu côn cong và cách tính góc tạo hình α theo qúa trình SPIF [5]

Tuy nhiên, đối với quá trình TPIF với dưỡng tạo hình bán phần mô hình côn cong không còn phù hợp vì đường chạy dao từ trong ra ngoài, đó là yếu tố khác biệt của quá trình này. Chính vì thế, mô hình để khảo sát khả năng biến dạng cho quá trình TPIF với dưỡng tạo hình bán phần cần được nghiên cứu. Các nghiên cứu trước [5,52] sử dụng mô hình côn nón cụt để kiểm chứng mô hình côn cong. Tuy nhiên, đối với quá trình TPIF với dưỡng tạo hình bán phần, nếu sử dụng mô hình côn nón cụt để khảo sát thì tốn thời gian và công sức vì góc tạo hình α sẽ thay đổi trong phạm vi rộng. Do đó, luận án tích hợp nhiều bậc côn nón cụt trên một mô hình để khảo sát (*hình 3.12*), góc biến dạng tăng dần, mỗi bậc là một độ. Với mô hình này, có nhiều

ưu điểm là dải khảo sát khả năng biến dạng trong phạm vi rộng, góc biến dạng tuyến tính tăng dần; cùng một mô hình khảo sát, cho phép ứng dụng bài toán quy hoạch thực nghiệm để xây dựng phương trình hồi quy thiết lập mối quan hệ giữa góc biến dạng và các tham số công nghệ.



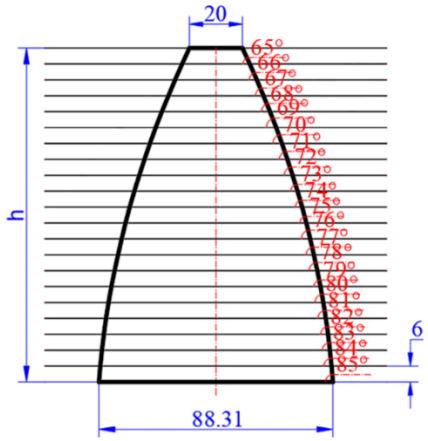
Hình 3. 10 Mô hình côn nón khảo sát khả năng biến dạng với góc tạo hình α

Trong luận án này, tác giả khảo sát khả năng biến dạng vật liệu nhôm tấm A 1050 H14 dày 1,5 *mm*, thông qua góc tạo hình của vật liệu. Góc tạo hình tăng dần nằm trong vùng khảo sát tạo hình mẫu cho phép tính được giá trị góc biến dạng thông qua cao độ của vết rách đến đỉnh chi tiết (như hình 3.19). Với hình dạng mẫu côn dốc tròn xoay, mẫu có hình nón cụt có độ dốc tăng mỗi bậc là 1^o *(hình 3.12).* Góc tạo hình tăng từ $65^o – 85^o$, phù hợp với biến dạng gia tăng của vật liệu nhôm tấm A 1050 H14. Hơn nữa, với hình dáng này, mẫu trên cho phép tính được giá trị góc biến dạng thông qua độ cao tại điểm bị rách đến đỉnh côn.

Bảng 3.1 Chuyển đổi từ cao độ vết rách sang góc biến dạng

Chiều cao vết rách (*mm*)	**Góc tạo hình (*độ*)**
0-6	65
6-12	66
12-18	67
18-24	68
24-30	69
30-36	70
36-42	71
42-48	72
48-54	73
54-60	74
60-66	75
66-72	76

72-78	77
78-84	78
84-90	79
90-96	80
96-102	81
102-108	82
108-114	83
114-120	84
120-126	85



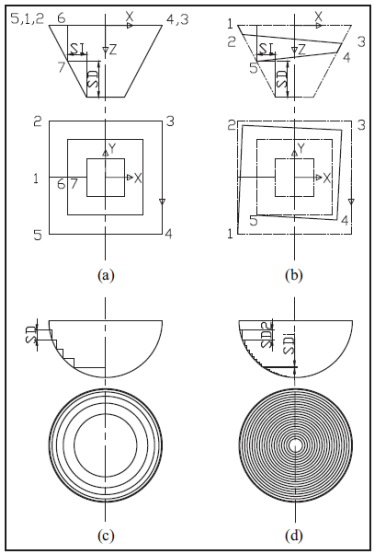
Hình 3. 11 Kích thước của mô hình CAD

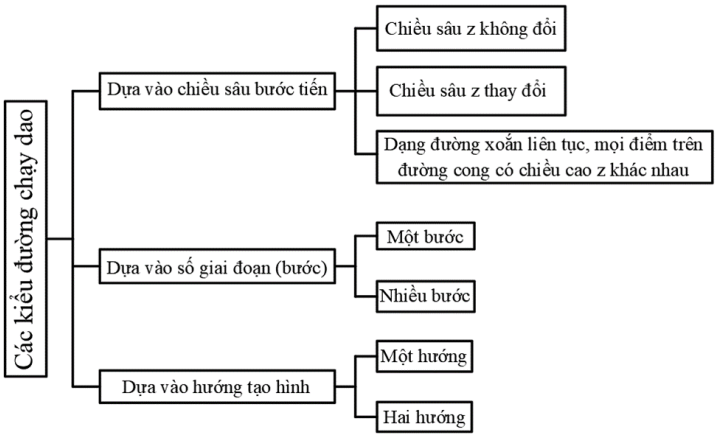
Hình 3. 12 Mô hình CAD

Mô hình CAM

Đường chạy dao

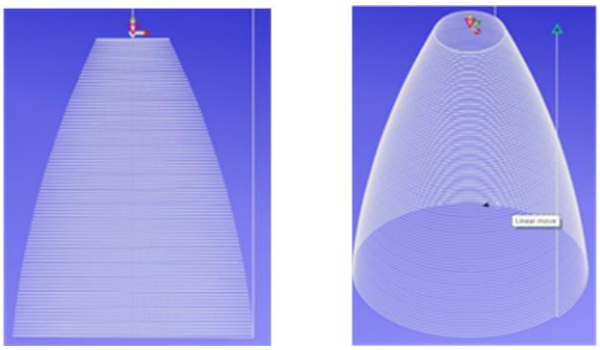
Đường chạy dao là quỹ tích điểm mà dụng cụ sẽ đi qua trong quá trình tạo hình. Đường chạy dao được phân thành ba loại chính (hình 3.14) như sau: dựa trên chiều sâu bước tiến z, dựa trên số bước, dựa trên hướng tạo hình.





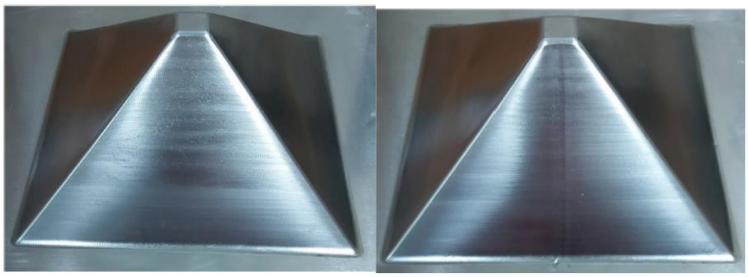
Hình 3. 13 Các kiểu đường chạy dao [55]

(a) hiều sâu bước tiến z không đổi, (b)đường chạy dao Helical, (c) chiều sâu bước tiến z thay đổi, (d) chiều sâu bước tiến z trong không đổi



Hình 3. 14 Đường chạy dao xoắn ốc (Helical).

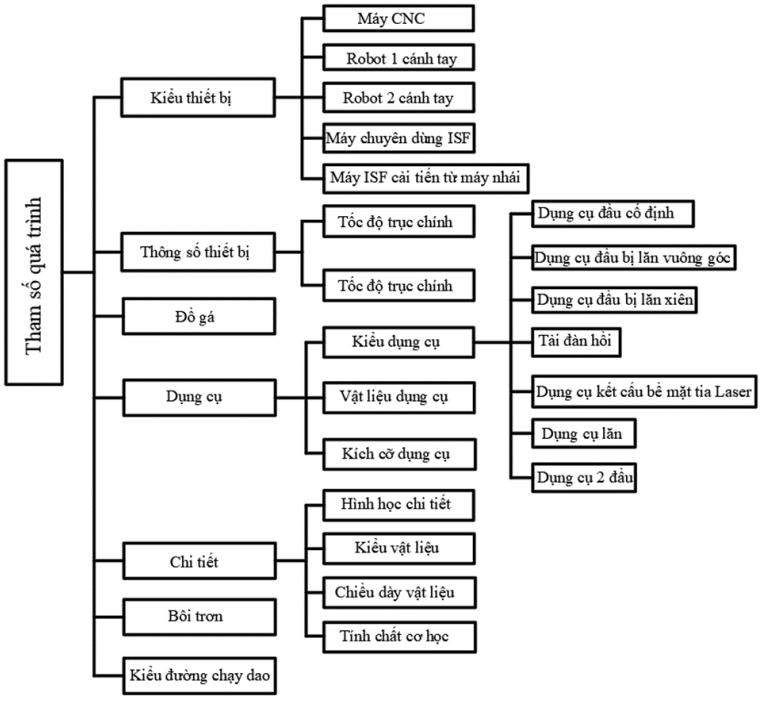
Trong luận án này, luận án sử dụng đường chạy dao xoắn ốc (Helical): là dạng đường xoắn liên tục, mọi điểm trên đường cong có chiều cao *z* khác nhau, vì với đường chạy dao Helical cho sản phẩm có chất lượng bề mặt tốt hơn và khả năng gia công cao hơn so với sản phẩm có đường chạy dao bậc thang. Trên bề mặt sản phẩm chạy dao bậc thang có vết lằn mỗi khi xuống dao (hình 3.16 b).



a b

Hình 3. 15 a. Sản phẩm có đường chạy dao Helical, b Sản phẩm có đường chạy dao bậc thang (spiral).

3.4.1 Các yếu tố ảnh hưởng



Hình 3. 16 Tham số quá trình tạo hình biến dạng gia tăng [55]

Quá trình tạo hình ISF gồm nhiều yếu tố ảnh hưởng như dụng cụ tạo hình, thiết bị, vật liệu tấm, bôi trơn ... nên tham số quá trình ISF là tổng hợp từ nhiều tham số và được phân theo sau (*hình 3.16*) : Kiểu thiết bị, tham số thiết bị (vận tốc biến dạng, số vòng quay trục chính), phức hợp, dụng cụ tạo hình, tấm tạo hình, bôi trơn, kiểu đường chạy dao.

Theo các kết quả của một số nhà nghiên cứu trước [5, 52,...] cho thấy một số thông số sau đây có ảnh hưởng lớn đến khả năng tạo hình bằng công nghệ ISF:

a) Hình dạng quỹ đạo dụng cụ (tool path).

b) Bước tiến theo phương z, Δz (*mm*).

c) Vận tốc chạy dụng cụ V_{xy} (*mm/phút*) trong mặt phẳng xy.

d) Số vòng quay *n* (*vòng/phút*) của trục chính

e) Đường kính dụng cụ tạo hình *D* (*mm*).

f) Bề dày tấm trước khi gia công (*mm*).

Trong thí nghiệm này, luận án nghiên cứu bước tiến theo phương trục chính Δz, vận tốc dụng cụ V_{xy}, số vòng quay trục chính *n* và đường kính dụng cụ *D* là các thông số chính ảnh hưởng đến quá trình tạo hình TPIF theo gợi ý của các nhà nghiên cứu trước đây. Các giá trị của tham số phù hợp với điều kiện máy hiện có tại phòng thí nghiệm và khả năng công nghệ với mô hình thực nghiệm. Mục đích xác định mối quan hệ tương quan chặt chẽ giữa góc biến dạng và tham số công nghệ. Thuộc tính các thông số đó được trình bày trong *bảng 3.2*.

Bảng 3.2 Mức của các yếu tố đầu vào thí nghiệm

TT	Yếu tố	Kí hiệu	Đơn vị	Mức		
				Mức thấp	Trung bình	Mức cao
1	Bước tiến theo phương z	Δz	*mm*	0,1	0,8	1.5
2	Vận tốc dụng cụ	V_{xy}	*mm/phút*	300	900	1500
3	Số vòng quay trục chính	*n*	*vòng/phút*	300	1050	1800
4	Đường kính dụng cụ	*D*	*mm*	6	12	18

3.4.2 Ma trận thực nghiệm

Thực nghiệm khảo sát khả năng biến dạng của vật liệu nhôm tấm A 1050 H14 dày 1,5 *mm* với bốn yếu tố. Mỗi yếu tố có ba mức. Theo quy hoạch thực nghiệm bậc hai Box-Benken, thông số đầu vào bao gồm bốn yếu tố, năm điểm ở tâm, số lần lặp là 3. Dựa trên các thông số đầu vào, chạy phần mềm DOE/Minitab với 29 thí nghiệm, (12 điểm ở tâm cạnh hình lập phương và 1 điểm ở tâm khối lập phương nên số thí nghiệm sẽ là : $2^4 + 12 + 1 = 16 + 12 + 1 = 29$ thí nghiệm), thông số đầu ra là góc biến dạng α đặc trưng cho khả năng tạo hình.

Bảng 3.3 Ma trận thực nghiệm

STT	Δz (*mm*)	V_{xy} (*mm/phút*)	n (*vòng/phút*)	D (*mm*)
1	0,1	300	1050	12
2	1,5	300	1050	12
3	0,1	1500	1050	12
4	1,5	1500	1050	12
5	0,8	900	300	6
6	0,8	900	1800	6
7	0,8	900	300	18
8	0,8	900	1800	18
9	0,1	900	1050	6
10	1,5	900	1050	6
11	0,1	900	1050	18
12	1,5	900	1050	18
13	0,8	300	300	12
14	0,8	1500	300	12
15	0,8	300	1800	12
16	0,8	1500	1800	12
17	0,1	900	300	12
18	1,5	900	300	12
19	0,1	900	1800	12
20	1,5	900	1800	12
21	0,8	300	1050	6
22	0,8	1500	1050	6
23	0,8	300	1050	18
24	0,8	1500	1050	18
25	0,8	900	1050	12
26	0,8	900	1050	12
27	0,8	900	1050	12

STT	Δz (*mm*)	V_{xy} (*mm/phút*)	*n* (*vòng/phút*)	*D* (*mm*)
28	0,8	900	1050	12
29	0,8	900	1050	12

Góc biến dạng α (°) là thông số đáp ứng, không đo được trực tiếp mà suy ra từ mục 4.3.2.

3.4.3 Trình tự thực nghiệm:

Về trình tự thực nghiệm, được tóm tắt như sau: gá đặt phôi lên đồ gá, gá dụng cụ tạo hình lên máy, khởi động máy SPIF, set tâm, mở chương trình NC, chạy chương trình, luôn bôi trơn để đảm bảo giảm ma sát, đến khi xuất hiện vết rách trên chi tiết thì dừng chương trình, tháo chi tiết ra khỏi đồ gá, vệ sinh để đo đạt cao độ vết rách.

Hình 3. 17 Thực nghiệm chạy mẫu.

3.5 Thông số kỹ thuật thiết bị đo sử dụng trong quá trình thực nghiệm

Các thiết bị đo tại phòng thí nghiệm đo lường cơ khí ĐHBK Tp. HCM được sử dụng đo như sau:

1/ Thước Panme Mitutoyo đo chiều dày, phạm vi đó 0-25 *mm*, dung sai 0,001*mm*.

Hình 3. 18 Thước Panme Mitutoyo

2/ thước đo cao độ Mitutoyo phạm vi đo 0-12”, độ chính xác 0,02 *mm*

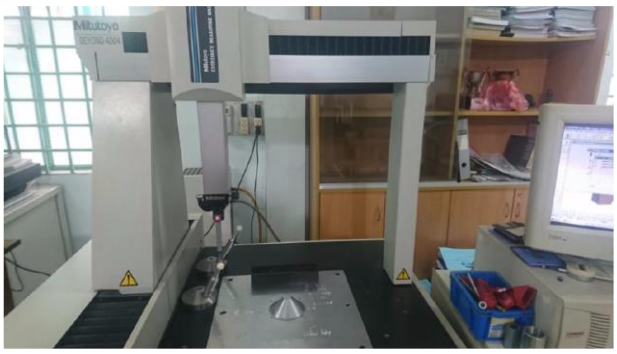
Hình 3. 19 Thước đo cao độ Mitutoyo

3/ Máy đo độ nhám Mitutoyo SJ 301

Thông số kỹ thuật: Khoảng đo: 12,5 *mm*, đo tốc độ: 0,25, 0.5 *mm/s* (loại 0.25 *mm/s: s*)

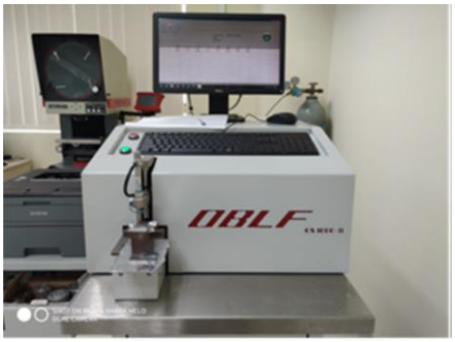
Hình 3. 20 Máy đo độ nhám Mitutoyo SJ 301

4/ Máy đo tọa độ CMM Mitutoyo BEYOND-A504



Hình 3. 21 Máy đo tọa độ CMM Mitutoyo BEYOND-A504

5/ Máy phân tích thành phần hóa học DBLF



Hình 3. 22 Máy phân tích thành phần hóa học tại phòng thí nghiệm Cơ-Lý trường ĐH Dầu Khí

Thông số kỹ thuật của máy

Nguyên tố	**Phạm vi của thành phần, %**	
	Phạm vi áp dụng thành phần khối lượng %[A]	**Phạm vi định lượng, thành phần khối lượng %[B]**
Nhôm	0 đến 0,093	0,006 đến 0,093
Canxi	0 đến 0,003	0,002 đến 0,003
Cacbon	0 đến 1,1	0,02 đến 1,1
Crom	0 đến 8,2	0,07 đến 8,4
Phạm vi áp dụng thành phần khối lượng %[A] phù hợp với tiêu chuẩn ASTM E 1763 và các kết quả báo cáo phù hợp với ASTM E 1950.		
Phạm vi định lượng, thành phần khối lượng %[B] phù hợp với tiêu chuẩn ASTM E 1601		

6/ Máy thử kéo nén vạn năng

Hình 3. 23 Máy thử kéo nén vạn năng

THÔNG SỐ KỸ THUẬT MÁY THỬ KÉO NÉN VẠN NĂNG 50KN

Tải cho phép lớn nhất 50 kN.Cảm biến lực danh nghĩa (Thử kéo và nén) 50 kN Độ chính xác lặp lại vị trí thử 0.002 mm (2 µm). Chiều dài hành trình (A) (mm) 1,000 1,500 1,750. Khoảng cách từ cột đến trục gá mẫu (B) [mm] 410

7/ Máy SEM- Scanning Electronic Microscope

Hình 3. 24 Máy SEM- Scanning Electronic Microscope của Trung tâm nghiên cứu triển khai khu công nghệ cao TP. HCM.

HITACHI S-4800 HIGH RESOLUTION SCANNING ELECTRON MICROSCOPE

Thông số kỹ máy như sau

Electron optics Quang học điện tử	Cold field emission electron source Nguồn điện
Accelerating voltage	0.5 - 30 kV (variable at 0.1kV/step)
Magnification range	x20 ~ x800,000

Phạm vi phóng đại	
Electron optics Quang học điện tử	4 opening, selectable and alignable outside the vacuum (Heater built-in)
Imaging mode Chế độ chụp ảnh	Secondary electron detector
Specimen stage	X = 0˜110mm, Y = 0˜110mm, T= -5 +70°, Z = 1.5˜40mm, rotation = 360°

TÓM TẮT CHƯƠNG 3

-Thiết bị và đồ gá cho ISF, dụng cụ tạo hình

-Máy SPIF thiết kế và chế tạo tại phòng thí nghiệm được dùng nghiên cứu tạo hình mẫu khảo sát trong luận án và một số sản phẩm của công nghệ mới này

Chất bôi trơn; Hình dạng chi tiết khảo sát; Đường chạy dao; Các yếu tố ảnh hưởng; Ma trận thực nghiệm

-Thông số kỹ thuật thiết bị đo sử dụng trong quá trình thực nghiệm

Chương 4
MÔ PHỎNG QUÁ TRÌNH TPIF

4.1 PPPTHH trong ISF

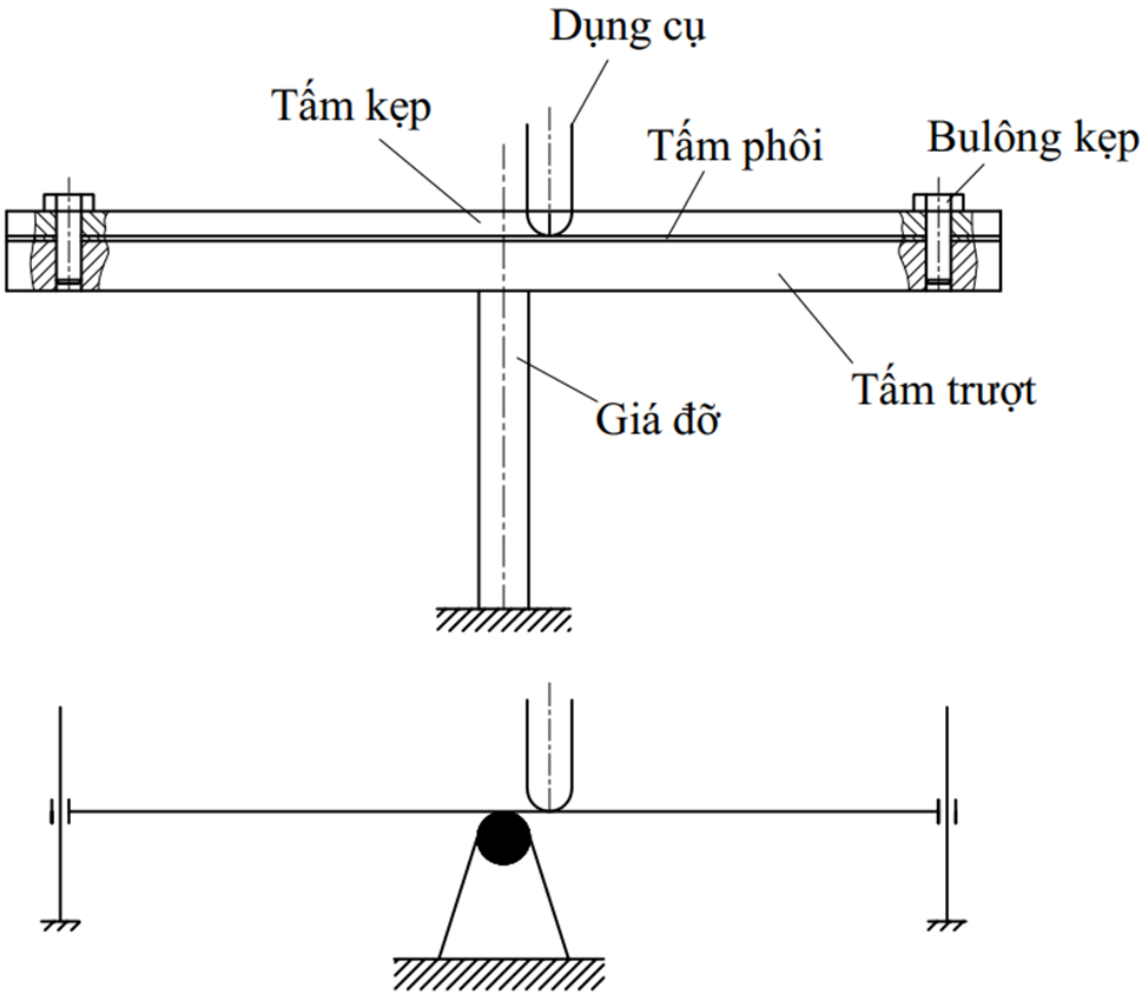
Phương pháp phần tử hữu hạn (PPPTHH) là phương pháp số để giải các bài toán cơ học trong môi trường liên tục trong đó các yếu tố cơ học như chuyển vị, biến dạng, ứng suất, nhiệt độ, … được mô tả bởi các phương trình vi phân riêng phần cùng với các điều kiện biên cụ thể.

Bản chất của phương pháp là rời rạc hóa các miền liên tục phức tạp của bài toán. Các miền liên tục lớn được chia thành nhiều miền nhỏ của từng phần tử. Các phần tử này được liên kết với nhau tại các điểm nút. Trên phần tử này, dạng biến phân tương đương với bài toán được giải xấp xỉ dựa trên các hàm xấp xỉ trên từng phần tử, thoả mãn điều kiện biên trên, cùng với sự cân bằng và liên tục giữa các phần tử. Trong PPPTHH, miền xác định V của tấm được chia thành một số hữu hạn các miền con, gọi là phần tử. Các miền này liên kết với nhau tại các điểm định trước trên biên của phần tử được gọi là nút. PPPTHH không tìm dạng xấp xỉ của hàm trên toàn miền xác định V của nó mà chỉ tìm trong những miền con V_e của từng phần tử thuộc miền xác định của hàm. Một số phần mềm mô phỏng như: SAP, FEAP (Finite Element Application Program), RDM, ANSYS, ABAQUS. Mỗi phần mềm có tính ưu việt riêng. Trong gia công biến dạng gia tăng thì phần mềm ABAQUS mang tính ưu việc hơn, ABAQUS là phần mềm chuyên dùng tính toán mô phỏng đa dụng của hãng SIMULIA, thuộc tập đoàn Dassault Systeme (Pháp).

4.2 Mô hình hóa

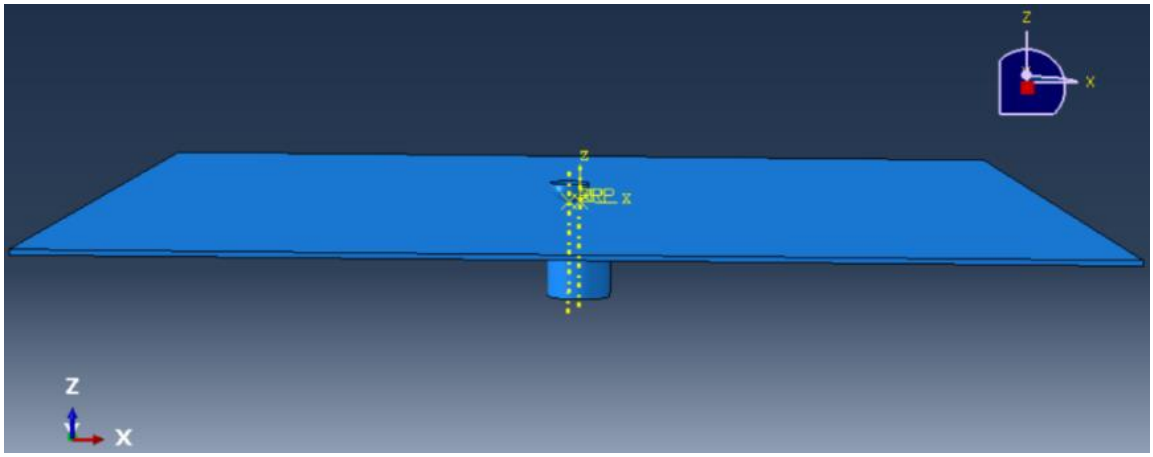
Mô hình thực nghiệm được thể hiện qua cách thức gá đặt và gia công như thực tế thực nghiệm. Về kết cấu, chi tiết được kẹp chặt bốn cạnh biên, phía dưới phôi tấm được đỡ bởi dưỡng tạo hình. Mô hình hóa (*Hình 4.1*) được xây dựng từ mô hình thực tế. Trong đó, tấm kim loại được cố định bốn biên, phần tâm phôi tiếp xúc với dưỡng

tạo hình. Dưỡng tạo hình và dụng cụ tạo hình được khai báo là cứng tuyệt đối. Dụng cụ tạo hình chuyển động theo ba phương x, y và z.



Hình 4. 1 Mô hình thực và mô hình hóa của TPIF.

Có thể nói rằng, một số nghiên cứu trước đây xem quá trình biến dạng gia tăng cục bộ của chi tiết có hình dạng đối xứng là quá trình đối xứng. Vì thế, người ta chỉ tiến hành khảo sát 1/4 mô hình và đi đến kết luận tổng thể. Tuy nhiên, theo tài liệu [5] thì quá trình TPIF là bất đối xứng, mặc dù hình dạng hình học của chi tiết khảo sát có đối xứng đi chăng nữa. Lê Văn Sỹ chứng minh tại mỗi thời điểm, ứng suất và biến dạng của tấm là khác nhau.

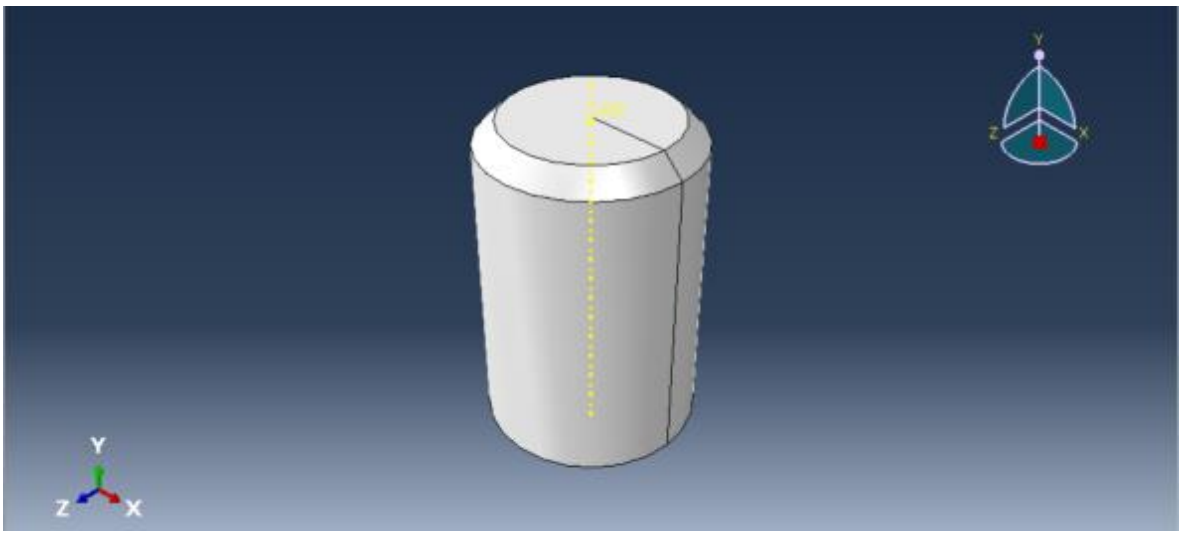


Hình 4. 2 Mô hình 3D dự đoán trong Abaqus

4.3 Điều kiện biên, tạo lưới

4.3.1 Dưỡng tạo hình

Dưỡng tạo hình được cố định trong không gian (hạn chế 6 bậc tự do).



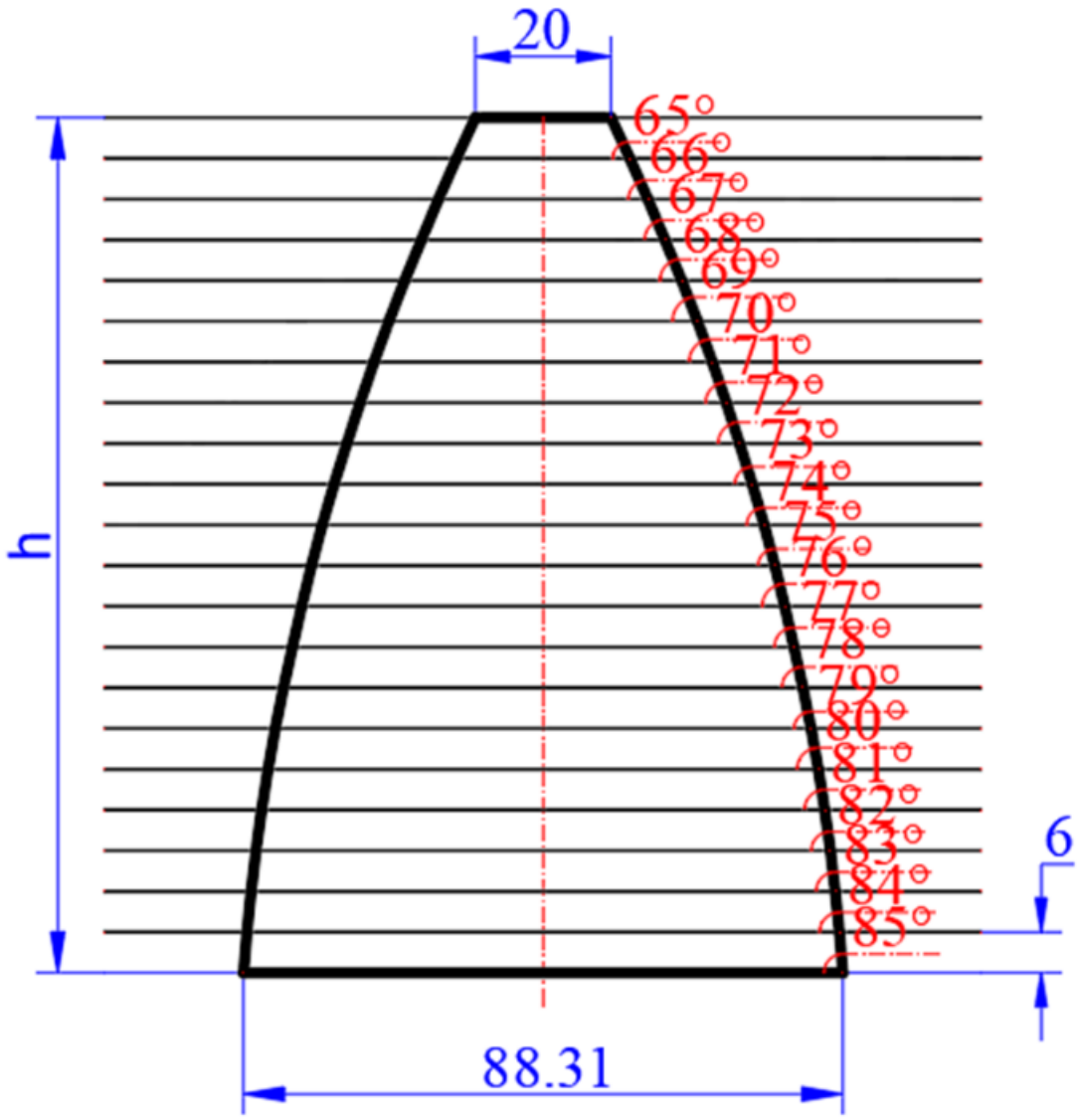
Hình 4. 3 Dưỡng tạo hình

4.3.2 Chi tiết

Hình dạng chi tiết khảo sát là côn nón theo bậc với góc biến dạng từ $65^o – 85^o$, chúng tôi đo được khả năng biến dạng của vật liệu. Đây là một thao tác cần thiết quyết định sự thành công của luận án. Trong nghiên cứu này, chúng tôi đo khả năng biến dạng của vật liệu thông qua góc tạo hình của vật liệu. Góc tạo hình vật liệu tăng dần trong vùng biến dạng. Từ góc tạo hình mẫu, chúng tôi tính được giá trị góc biến dạng thông qua độ cao tại vết rách đến đỉnh chi tiết. Với mẫu côn dốc tròn xoay có hình nón cụt độ dốc tăng mỗi bậc là 1^o *(hình 4. 5)*, góc tạo hình tăng từ $65^o – 85^o$, cho thấy dãi tạo hình phù hợp với khả năng biến dạng gia tăng của vật liệu nhôm tấm A 1050 H14. Hơn nữa, với hình dáng này, mẫu côn nón vừa nêu cho phép tính được giá trị góc biến dạng thông qua độ cao tại vết rách đến đỉnh côn.

Mô Hình CAD

Hình 4. 4 Mô hình CAD



Hình 4. 5 Kích thước của mô hình CAD

Bốn cạnh của chi tiết được cố định trong khung trượt, chi tiết trượt xuống theo đầu dụng cụ tạo hình theo phương z.

4.3.3 Dụng cụ tạo hình

Dụng cụ tạo hình di chuyển theo phương x, phương y, phương z theo quỹ đạo dụng cụ tạo hình (từ dữ liệu đường chạy dao xoắn ốc) theo bước thời gian t. Sử dụng module Amplitudes để nhập tọa độ theo ba phương x, y, z và bước thời gian t.

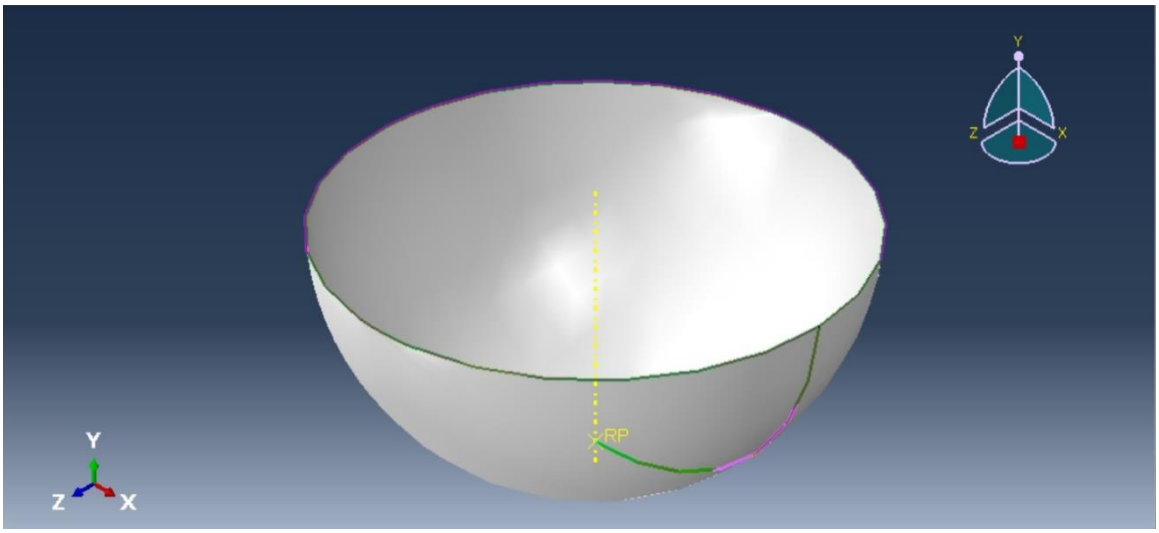
$$t_{tổng} = \frac{\text{chiều dài quỹ đạo}}{\text{tốc độ dụng cụ}} = \frac{\sum_0^N(\sqrt{(x_{i+1}-x_i)^2+(y_{i+1}-y_i)^2+(z_{i+1}-z_i)^2})}{V_{xy}} \quad (4.1)$$

Trong đó: N là tổng số điểm trên quỹ đạo

$$t_{tt} = \frac{t_{tổng}}{N} \quad (4.32)$$

Giá trị bước thời gian tính toán (t_{tt}) có thể lớn hơn bước lưới. Khi đó mô phỏng không thực hiện được. Abaqus cho phép giảm thời gian này bằng hệ số time scale mà không làm thay đổi ảnh hưởng của V_{xy}. Giá trị time scale được suy ra từ những lần mô phỏng thử nghiệm mà ở đó quá trình mô phỏng thực hiện được.

$$t = t_{tt}.(\text{time scale factor}) \quad (4.3)$$

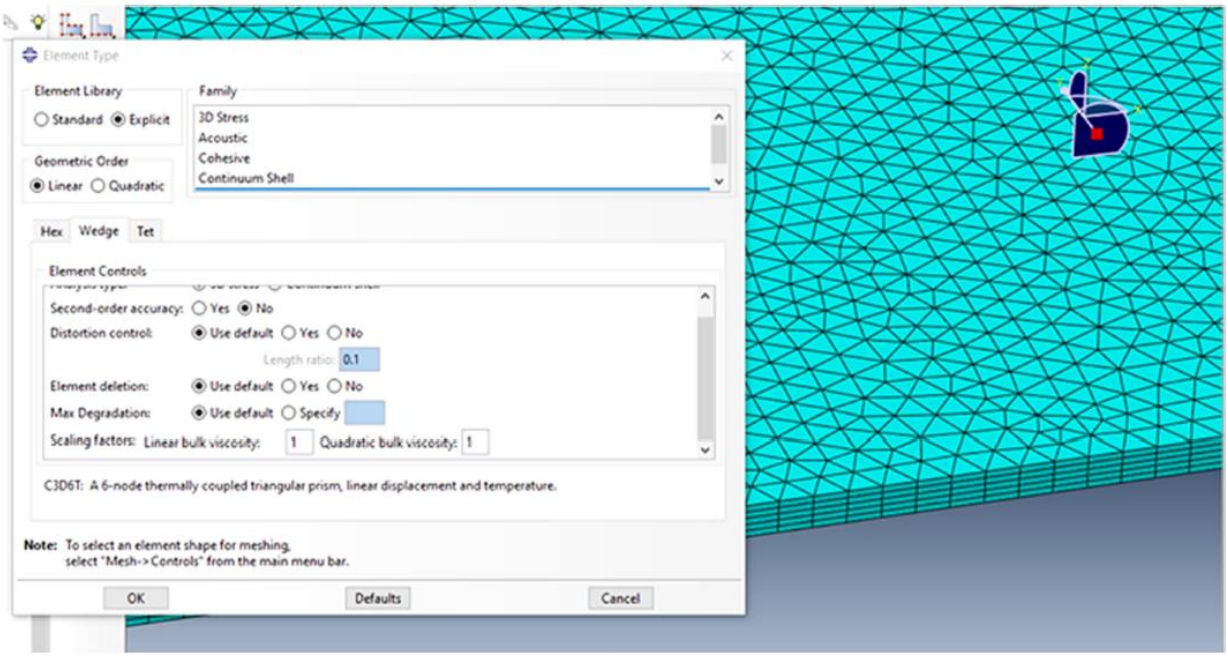


Hình 4. 6 Đầu dụng cụ tạo hình.

4.3.4 Tạo lưới

Kết quả nghiên cứu cho thấy kiểu phần tử C3D6T cho kết quả tốt nhất trong mô phỏng TPIF. Có thể dùng nó để khảo sát về biến dạng, về uốn, về cơ chế xuất hiện vết nứt, … Nếu xét về uốn và nứt thì khi chia lưới phần tử, bề dày của tấm được chia ít nhất là ba lớp [5]. Kích thước phần tử phải lớn hơn bước thời gian (kích thước phần tử tính bằng *mm* và bước thời gian tính bằng giây). Quá trình mô phỏng chứng minh rằng kích thước phần tử nhỏ hơn bước thời gian thì bài toán không hội tụ và mô phỏng không thực hiện được.

Kiểu phần tử C3D6T, kích thước phần tử là 1,5 *mm* với chiều dày lưới là 5 lớp. Nó không làm thay đổi hình học liên kết của lưới mà bao hàm một số giới hạn về khả năng của phương pháp để duy trì lưới chất lượng cao trên biến dạng cực đại.



Hình 4. 7 Mô hình lưới trong Abaqus.

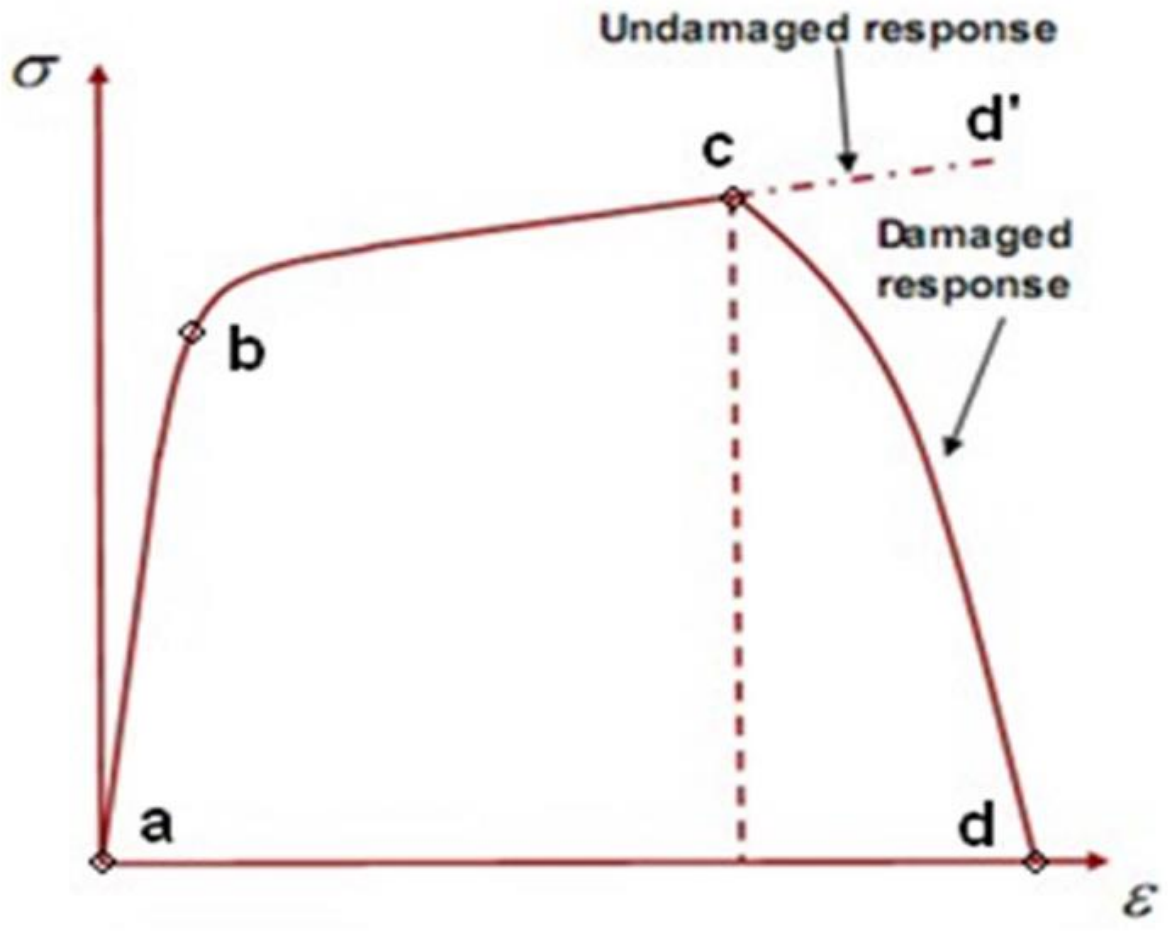
4.4 Thông số vật liệu trong Abaqus

Tính chất vật lý hợp kim nhôm tấm A 1050 H14 dày 1,5 *mm* thể hiện qua bảng. Đồ thị ứng suất và biến dạng thật thể hiện qua *đồ thị 4.2*.

Rạn nứt và phá huỷ cho kim loại dẻo trong ABAQUAS

Đối với kim loại dẻo, ABAQUS cung cấp hai tuỳ chọn để dự đoán phá huỷ với các loại khác nhau của các tiêu chuẩn rạn nứt. Tiêu chuẩn rạn nứt cho việc rạn nứt kim loại và các tiêu chuẩn rạn nứt cho sự không ổn định co thắt của tấm kim loại. Các tiêu chuẩn rạn nứt theo phương pháp tiếp cận tường minh (ABAQUS/Explicit).

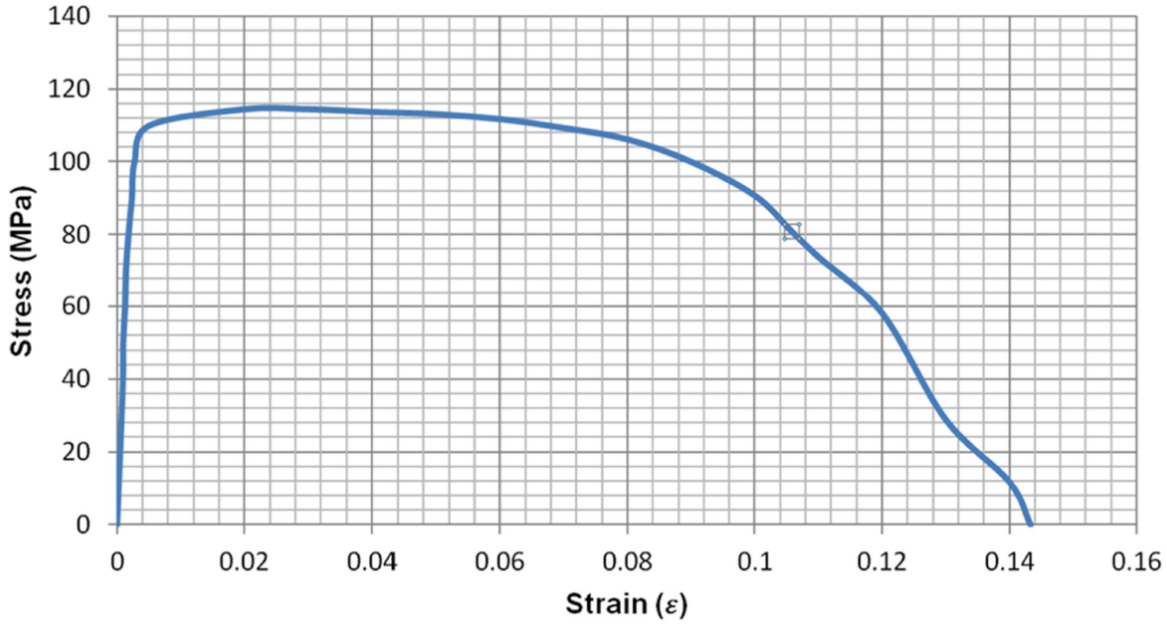
ABAQUS cung cấp nhiều tiêu chuẩn phá huỷ; có thể thiết lập nhiều cho nhiều vật liệu được đưa ra. Trong trường hợp nhiều tiêu chuẩn rạn nứt được thiết lập cho cùng một vật liệu thì chúng được xử lý độc lập. Khi tiêu chuẩn ban đầu cụ thể được thoả mãn, thì độ bền của vật liệu sẽ bị giảm theo định luật về sự thay đổi phá huỷ được thiết lập cho tiêu chuẩn đó.



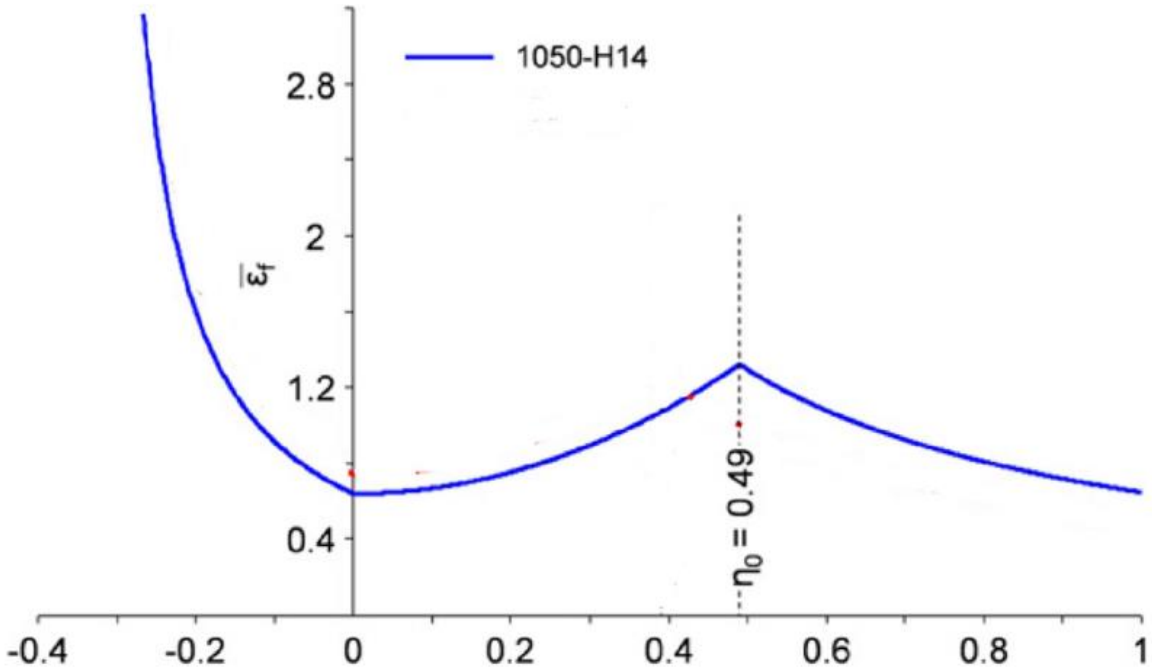
Đồ thị 4. 1 Ứng suất và biến dạng của vật liệu [23]

Đồ thị 4.1 chia theo bốn giai đoạn: (a-b-c-d'). Vùng a-b, vật liệu biến dạng biến dạng đàn hồi; vùng b-c là vùng biến dạng dẻo. Điểm c bắt đầu phá huỷ, vùng c-d là vùng phá huỷ, thay đổi theo quy luật. Điểm d vật liệu bị phá huỷ hoàn toàn. Sự phá huỷ vật liệu khi vật liệu mất hoàn toàn khả năng chịu tải dẫn đến sự sụt giảm của

độ bền vật liệu. Quá trình suy giảm độ bền của vật liệu được mô hình hoá bằng cách sử dụng cơ học phá huỷ.



Đồ thị 4. 2 Ứng suất và biến dạng thực của hợp kim nhôm tấm A 1050 H14 [54].



Đô thị 4. 3 Ưng suất khôi so với đại lượng biên dạng của hợp kim nhôm A 1050 H 14 [54].

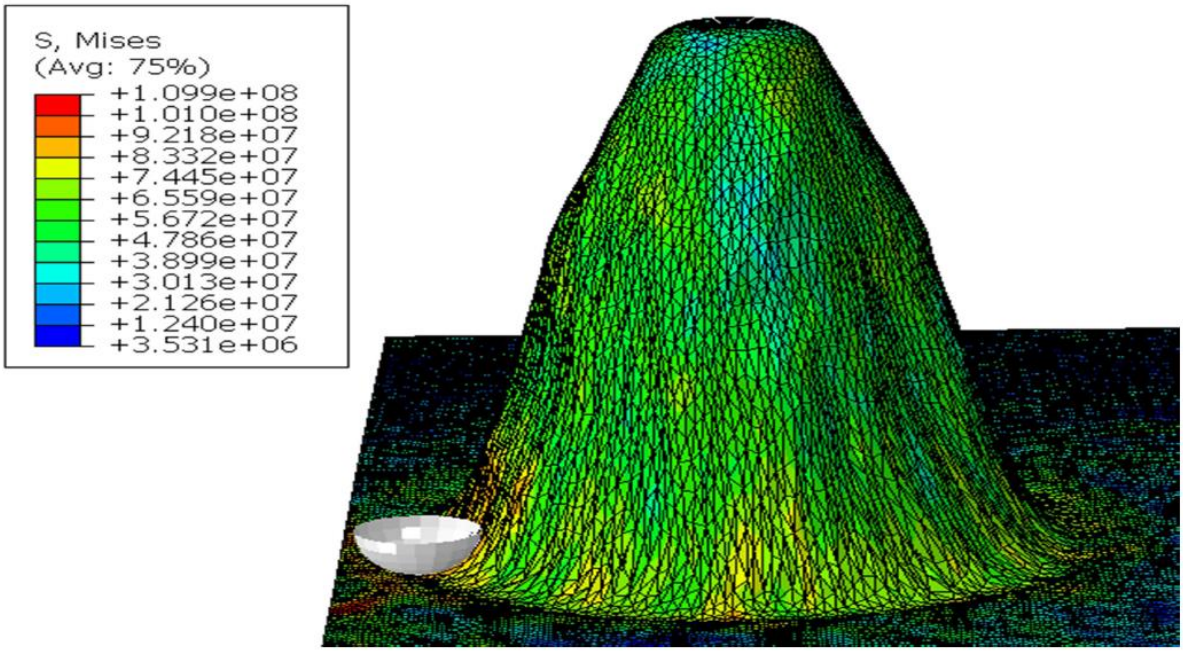
4.5 Kết quả mô phỏng

Từ bảng ma trân thực nghiệm theo DOE ta chọn ra vài trường hợp tiêu biểu để dự đoán bằng phần mềm ABAQUS.

Trường hợp 1:

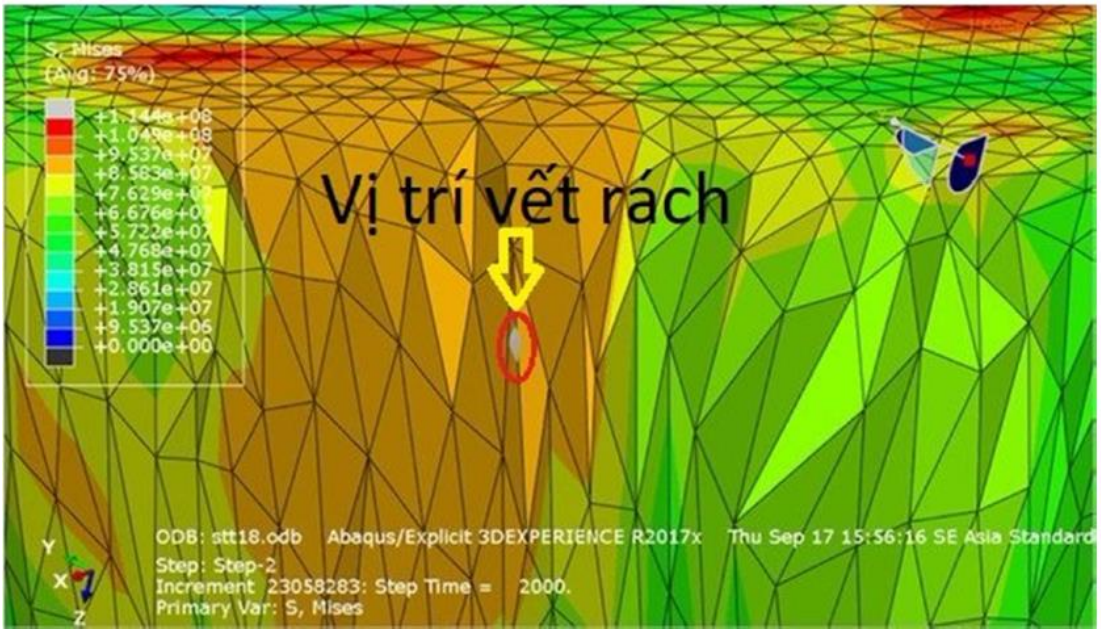
Bảng 4. 1 Giá trị mô phỏng cho trường hợp 1.

TT	Yếu tố	Kí hiệu	Đơn vị	Giá trị	Góc tạo hình α (°)
1	Số vòng quay trục chính	n	*Vòng/phút*	1800	82°
2	Bước tiến theo phương z	Δz	*mm*	0,8	
3	Vận tốc dụng cụ	V_{xy}	*mm/phút*	900	
4	Đường kính dụng cụ	D	*mm*	18	



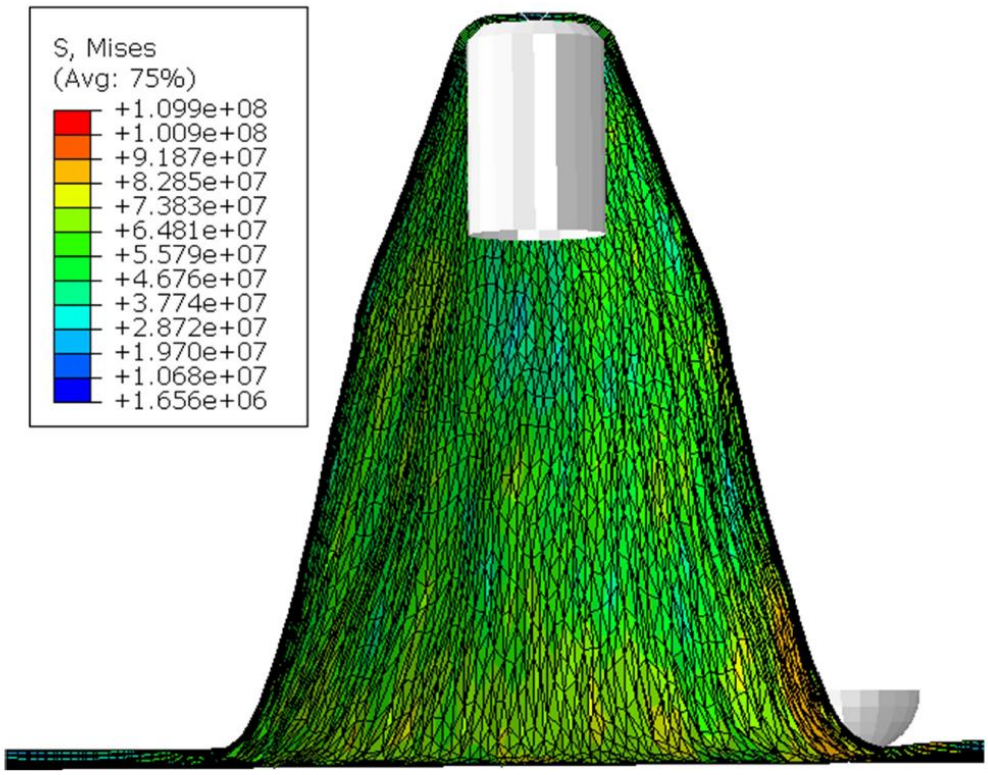
Hình 4. 8 Hình dạng tổng thể chi tiết sau biến dạng bằng công nghệ TPIF

Hình dạng chi tiết sau mô phỏng giống hình dạng thiết kế CAD và thực



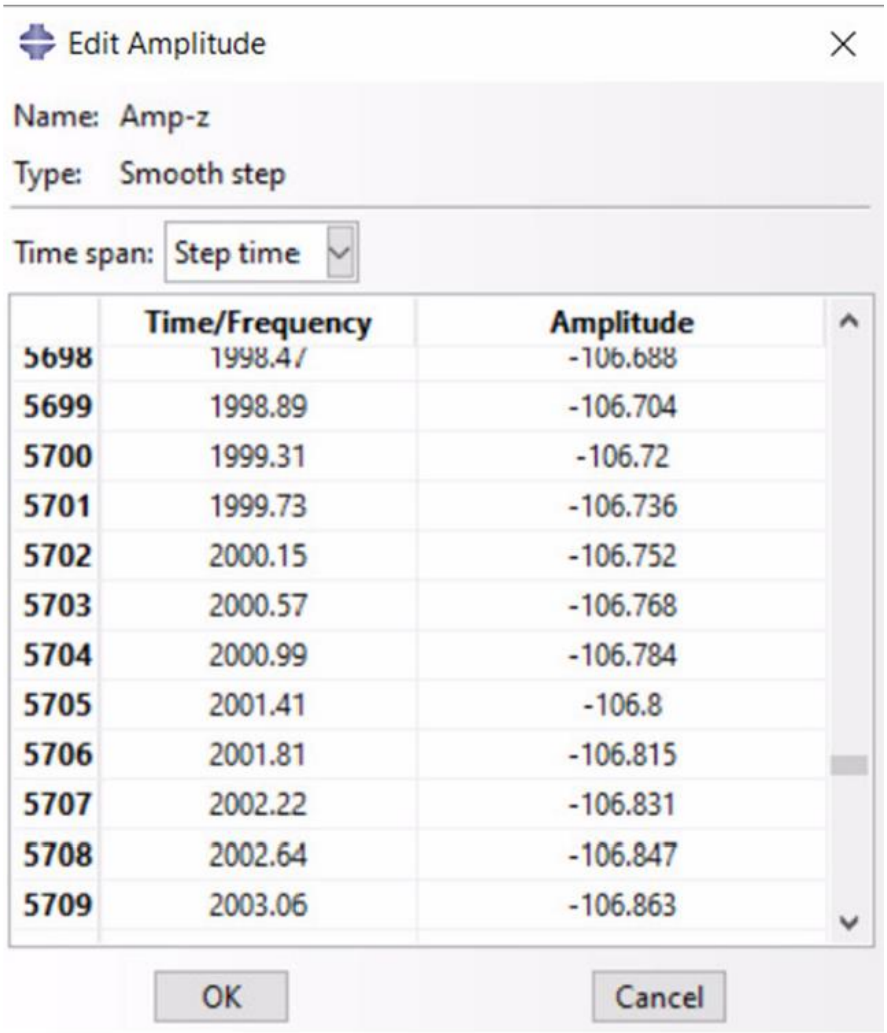
Hình 4. 9 Vị trí tấm bị rách

Vị trí vết rách (*hình 4.9*) tại ứng suất 114.4 *MPa* phù hợp với đồ thị 4.2.



Hình 4. 10 Mặt cắt của tấm bị rách trường hợp 1.

Trong mô phỏng, dấu hiệu nhận biết phá huỷ vật liệu được xác định dựa trên việc so sánh ứng suất trên tấm với ứng suất phá huỷ của vật liệu gán cho tấm. Khi đến độ cao h = 106.752 *mm* (*hình 4.11*) mà ứng suất trên tấm vượt quá giá trị ứng suất phá huỷ cho phép 114.439 *MPa* tại thời gian t = 2000 *s* thì tấm bị xem như rách tại vị trí đó, góc α_{max} =82^o cũng được xác định theo độ cao của vết rách h tương tự như trong thực nghiệm.

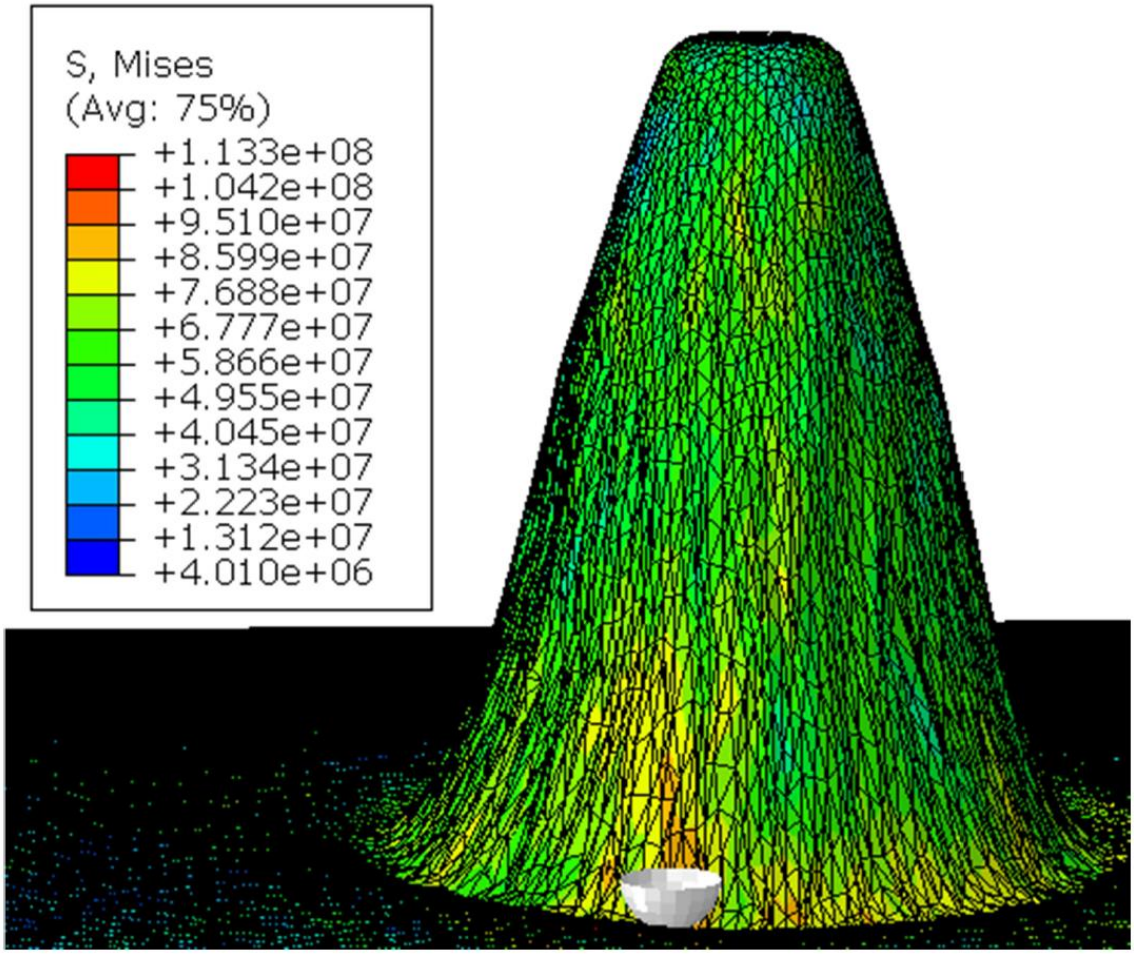


Hình 4. 11 Cao độ vị trí tấm bị rách trường hợp 1.

<u>Trường hợp 2:</u>

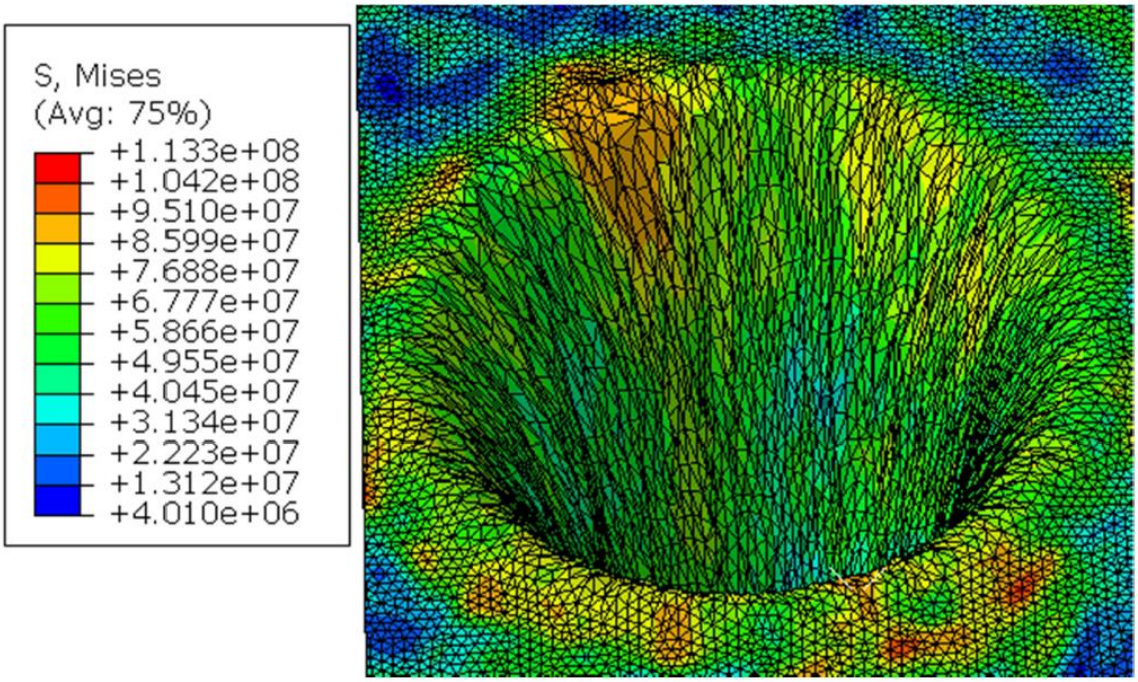
Bảng 4. 2 Giá trị mô phỏng trường hợp 2

TT	Yếu tố	Kí hiệu	Đơn vị	Giá trị	Góc tạo hình α (°)
1	Số vòng quay trục chính	*n*	*Vòng/phút*	1050	81°
2	Bước tiến theo phương *z*	*Δz*	*mm*	0,8	
3	Vận tốc dụng cụ	V_{xy}	*mm/phút*	900	
4	Đường kính dụng cụ	*D*	*mm*	12	



Hình 4. 12 Hình dạng tổng thể chi tiết sau biến dạng bằng công nghệ TPIF trường hợp 2.

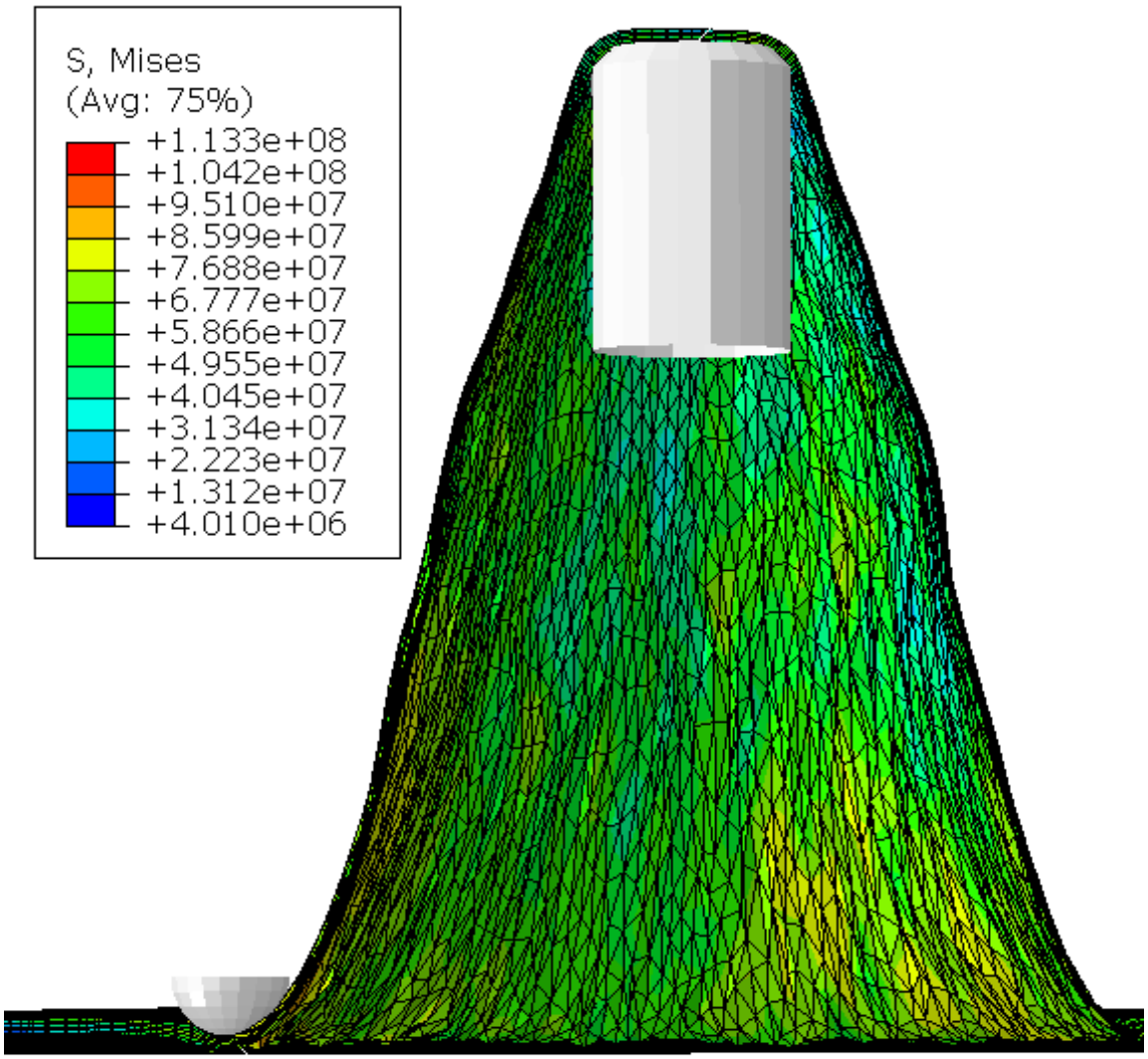
Hình dạng chi tiết sau mô phỏng giống hình dạng thiết kế CAD và thực nghiệm.



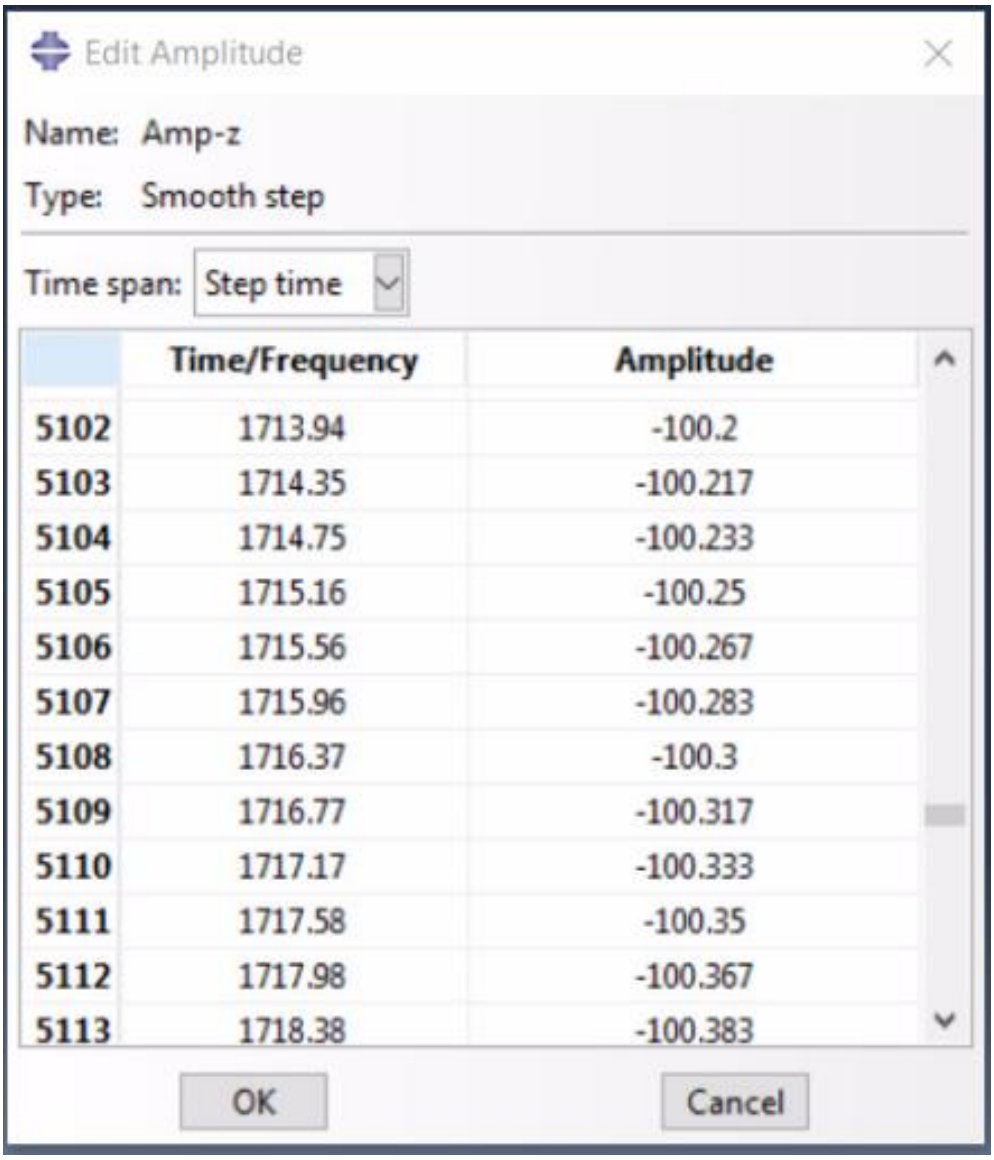
Hình 4. 13 Vị trí tấm lưới biến dạng quá mức**.**

Vị trí lưới biến dạng quá mức (*hình 4.13*) tại ứng suất 113,3 *MPa* phù hợp với đồ thị 4.2.

Theo kết quả mô phỏng (*hình 4.13*), khi đạt đến độ cao *h* = 100,3 *mm* (hình 4.15) mà ứng suất trên tấm vượt quá giá trị ứng suất phá huỷ cho phép 113,3 *MPa* tại thời gian *t* = 1716 *s* thì tấm có lưới bị biến dạng quá mức. Tại vị trí đó, góc α_{max} =81^o được xác định theo độ cao của vết rách *h* tương tự như trong thực nghiệm.



Hình 4. 14 Mặt cắt của chi tiết trường hợp 2.



Hình 4. 15 Cao độ vị trí tấm bị rách trong trường hợp 2.

TÓM TẮT CHƯƠNG 4

Chương 4 nghiên cứu mô phỏng số TPIF bằng phần mềm ABAQUS.

Thiết lập mô hình TPIF (lựa chọn lưới, thông số ban đầu, các điều kiện biên, gán vật liệu,…) mô phỏng sử dụng phần mềm Abaqus.

Kết quả mô phỏng khả năng tạo hình (góc tạo hình α) của vật liệu kim loại tấm A 1050 H14 dày 1,5 mm được trình bày bằng kết quả số và đồ thị.

Chương 5
KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

Trong chương này, luận án tiến hành thực nghiệm kéo và phân tích thành phần hóa học vật liệu A 1050 H14 chiều dày 1,5 *mm* dùng để tạo hình và thực nghiệm tạo hình biên dạng hình nón côn dốc từ 65^o đến 85^o, mỗi bậc tăng 1^o. Tiếp nữa, theo quy hoạch thực nghiệm bậc hai Box-Benken, luận án xác lập bốn yếu tố đầu vào, năm điểm ở tâm. Sau nữa là khảo sát bôi trơn, phương pháp bôi trơn và ảnh hưởng của bôi trơn lên chất lượng bề mặt.

5.1 Vật liệu thực nghiệm

Vật liệu dùng trong thực nghiệm và mô phỏng được chọn phổ biến là hộp kim nhôm. Hợp kim nhôm A 1050 H14 theo tiêu chuẩn GB/T 3880/1997. Vật liệu là tấm nhôm A 1050 H14 chiều dày 1,5 *mm*, được chọn làm thực nghiệm với cơ tính và hóa tính như sau.

❖ **Thành phần hóa học**

Thành phần hóa học của Nhôm tấm A 1050 H14 chiều dày 1,5 *mm*, theo tiêu chuẩn GB/T 3880/1997 như bảng sau :

Bảng 5. 1 Thành phần hóa học của Nhôm tấm A 1050 H14

STT	Tên nguyên tố	Kí hiệu	Thành phần %
1	Sắt	Fe	0,216
2	Silic	Si	0,0781
3	Đồng	Cu	0,003
4	Magnesium	Mg	<0,005
5	Mangan	Mn	<0,005
6	Kẽm	Zn	0,011
7	Titan	Ti	0,012

STT	Tên nguyên tố	Kí hiệu	Thành phần %
8	Nhôm	Al	Còn lại

Bên cạnh đó vật liệu cũng được lấy mẫu để kiểm tra theo tiêu chuẩn BS EN 485-1.

Thành phần hóa học được kiểm tra bằng cách lấy mẫu đem phân tích quang phổ trên máy phân tích thành phần hóa học tại phòng thí nghiệm Cơ-Lý của trường Đai học Dầu khí Việt Nam. Kết qủa đo của máy

STT	Tên nguyên tố	Kí hiệu	Thành phần %
1	Sắt	Fe	0,215
2	Silic	Si	0,078
3	Đồng	Cu	0,003
4	Magnesium	Mg	0,003
5	Mangan	Mn	0,004
6	Kẽm	Zn	0,011
7	Titan	Ti	0,012
8	Nhôm	Al	0,326

Mẫu nhôm tấm A 1050 H14 được phân tích thành phần hóa học phù hợp với tiêu chuẩn BS EN 485-1, ISO 6361-2:2014.

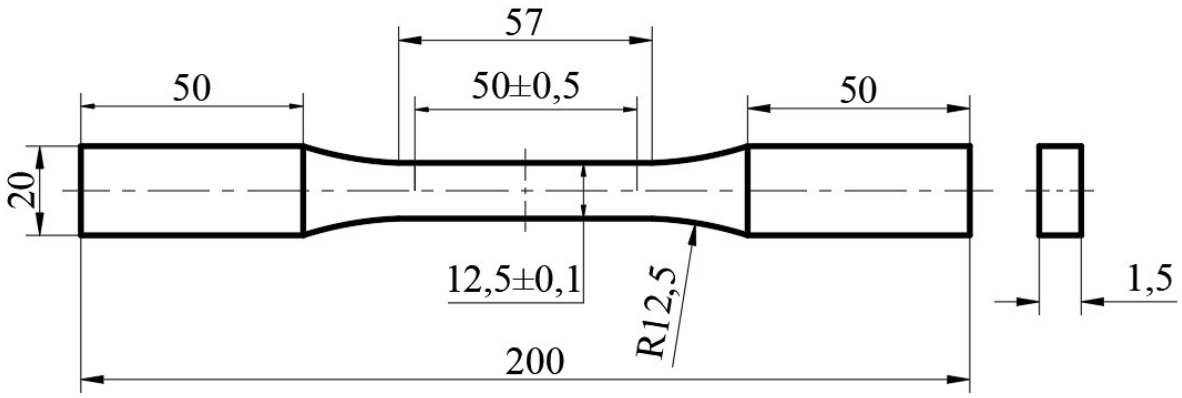
❖ **Cơ lý tính**

Bảng 5. 2 Cơ tính nhôm tấm A 1050 H14

Tính chất vật lý	
Khối lượng riêng	*2,71 g/cm³*
Hệ số giãn nở nhiệt	*24 *10-6K-1*
Hệ số dẫn nhiệt	*222 W/mK*
Điện trở suất	*0,0282*10-6 Ω.m*
Hệ số Poisson	*0,33*
Ứng suất kéo max	*145 MPa*
Ứng suất kéo min	*105 MPa*

Ứng suất chảy min	*85 MPa*
Hệ số giãn dài (ε)	*16%*
Mô đun đàn hồi	*68,916 MPa*

Vật liệu thực nghiệm được kiểm tra cơ tính theo tiêu chuẩn BS EN 485-1. Cơ tính mẫu nhôm A 1050 H14 dày 1,5 *mm* được lấy mẫu theo ba phương X, Y và 45^0 mỗi phương lấy một mẫu với kích thước như sau:



Hình 5. 1 Kích thước mẫu theo tiêu chuẩn [46] hoặc ISO 6361-2:2014

Hình 5. 2 Mẫu được gia công trên máy phay CNC tại PTN công nghệ thiết kế và gia công tiên tiến, Đại học Quốc gia Hồ Chí Minh.

Hình 5. 3 Thử mẫu kéo tại phòng thí nghiệm Cơ-Lý trường Đại học Dầu Khí Việt Nam

Hình 5. 4 Mẫu sau khi kéo đứt

Kết quả kéo mẫu nhôm theo ba phương:

phương X 135,64 *MPa* , phương 45^o 138,3 *MPa*, phương Y 121,23 *MPa*

cho thấy tính bất đẳng hướng của vật liệu, các giá trị trung bình theo ba phương:

Module đàn hồi trung bình: E = 68,916 *MPa*, hệ số Poisson ν = 0,33

Độ bền kéo trung bình: σ_0 = 131,72 *MPa*

Vật liệu phù hợp với tiêu chuẩn BS EN 485-1

5.2 Khảo sát ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến khả năng tạo hình TPIF

5.2.1 Các yếu tố ảnh hưởng

Đề tài tập trung nghiên cứu bốn thông số ảnh hưởng đến khả năng tạo hình bằng phương pháp TPIF là: bước tiến theo phương trục chính Δz, tốc độ dụng cụ v_{xy}, tốc độ trục chính n và đường kính dụng cụ D. Thuộc tính các thông số đó được trình bày trong bảng sau.

Bảng 5. 3 Mức của các yếu tố

TT	Yếu tố	Kí hiệu	Đơn vị	Mức		
				Mức thấp	Trung bình	Mức cao
1	Bước tiến theo phương z	Δz	*mm*	0,1	0,8	1,5
2	Vận tốc dụng cụ	v_{xy}	*mm/phút*	300	900	1500
3	Số vòng quay trục chính	n	*vòng/phút*	300	1050	1800
4	Đường kính dụng cụ	D	*mm*	6	12	18

5.2.2 Ma trận thực nghiệm

Góc biến dạng α (^{o}) là thông số đáp ứng, tỉ lệ với chiều cao côn nón côn được suy ra bằng cách đo trực tiếp chiều cao nón côn tính từ vết rách đến đỉnh nón (*bảng 3.1* và *hình 3.13*).

Tiến hành chạy thực nghiệm trên hệ thống thực nghiệm như *hình 5.5* với các thông số thông công nghệ như trong ma trận thực nghiệm (*bảng 5.4*) cho đến khi xuất hiện vết rách hay vết nứt trên chi tiết thì dừng được sản phẩm là những chi tiết *hình 5. 7* . Sau đó, đo giá trị cao độ vết rách tính từ đỉnh chi tiết *hình 5. 6,* kết qủa đo như *bảng 5.4 và phụ lục* (*Bảng A.2)*, suy ra giá trị góc α và điền vào ma trận thực nghiệm *bảng 5.4*.

Hình 5. 5 Chạy thực nghiệm mẫu

Hình 5. 6 Đo giá trị cao độ vết rách.

Bảng 5. 4 Ma trận thực nghiệm cho A 1050 H14 dày 1,5 *mm*

STT	*Δz(mm)*	V_{xy}*(mm/phút)*	*n (vòng/phút)*	*D(mm)*	**α (độ)**
1	0,1	300	1050	12	79
2	1,5	300	1050	12	81
3	0,1	1500	1050	12	81
4	1,5	1500	1050	12	83
5	0,8	900	300	6	83
6	0,8	900	1800	6	83
7	0,8	900	300	18	81
8	0,8	900	1800	18	81
9	0,1	900	1050	6	80
10	1,5	900	1050	6	83
11	0,1	900	1050	18	80
12	1,5	900	1050	18	80
13	0,8	300	300	12	81
14	0,8	1500	300	12	83
15	0,8	300	1800	12	82
16	0,8	1500	1800	12	83
17	0,1	900	300	12	80
18	1,5	900	300	12	82
19	0,1	900	1800	12	80
20	1,5	900	1800	12	82
21	0,8	300	1050	6	83
22	0,8	1500	1050	6	84
23	0,8	300	1050	18	80
24	0,8	1500	1050	18	82
25	0,8	900	1050	12	82
26	0,8	900	1050	12	82
27	0,8	900	1050	12	82
28	0,8	900	1050	12	82
29	0,8	900	1050	12	82

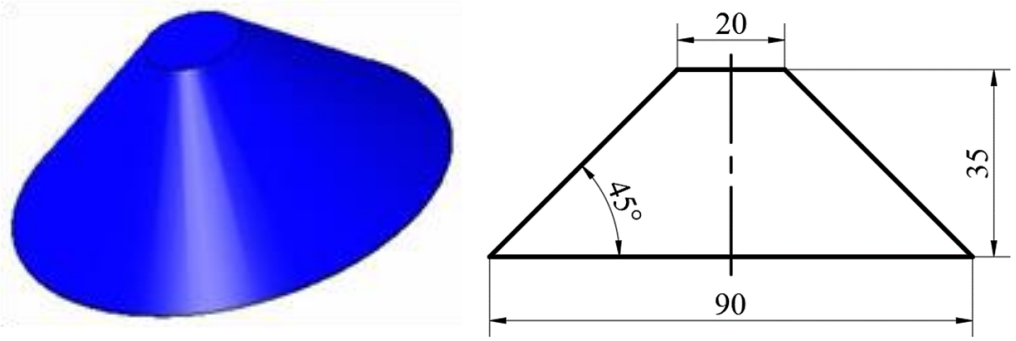
5.3 Phân tích kết quả

Sau khi làm thực nghiệm ta thu được các mẫu như hình:

Hình 5. 7 Các mẫu đạt được sau khi chạy thực nghiệm

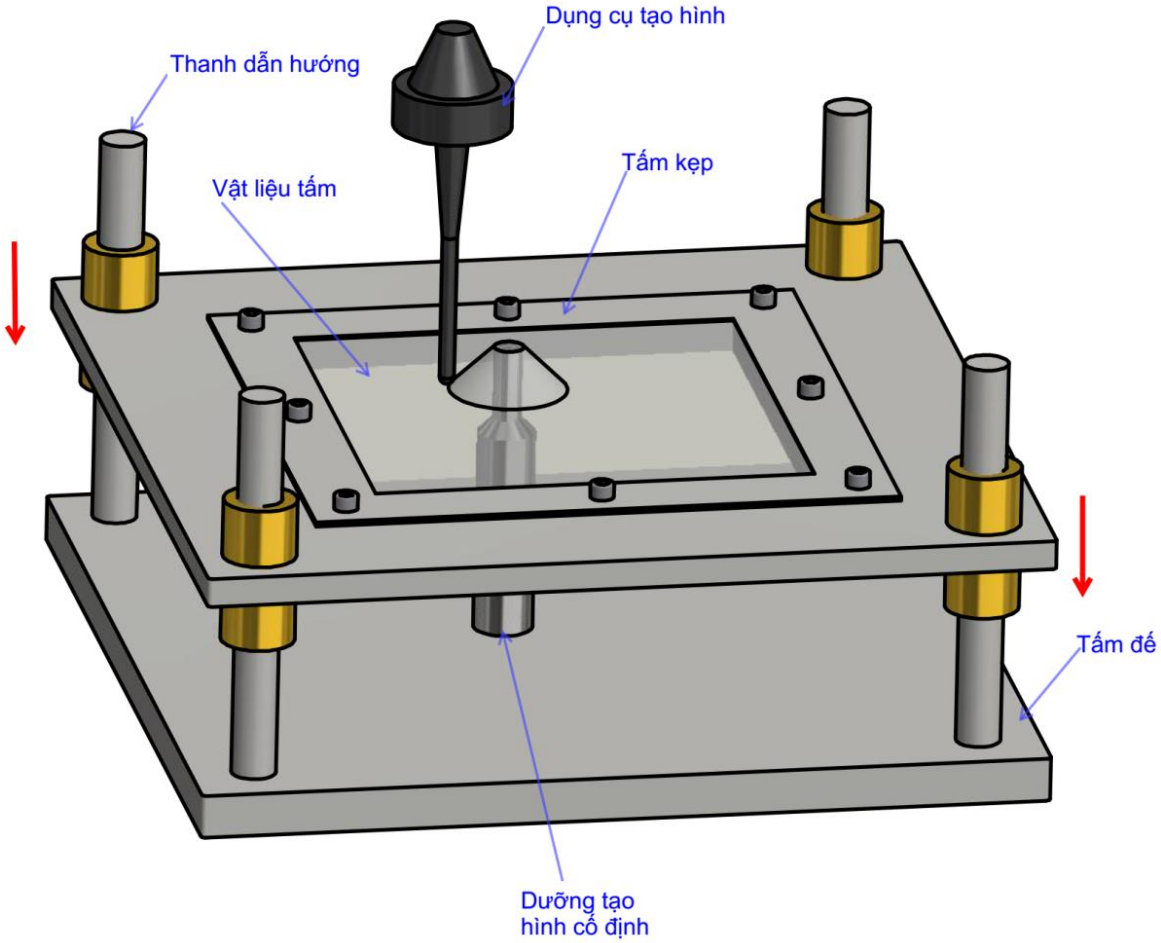
5.3.1 Ảnh hưởng của các thông số công nghệ lên chất lượng sản phẩm (biên dạng chi tiết, độ nhám bề mặt, phân bố chiều dày, cấu trúc tế vi bề mặt chi tiết)

Mô hình khảo sát là côn nón với góc nghiêng 45^{o} như hình.



a. *Mô hình CAD.* ***b***. *Biên dạng côn nón.*

Hình 5. 8 Mô hình côn nón khảo sát chất lượng bề mặt chi tiết bằng công nghệ TPIF.

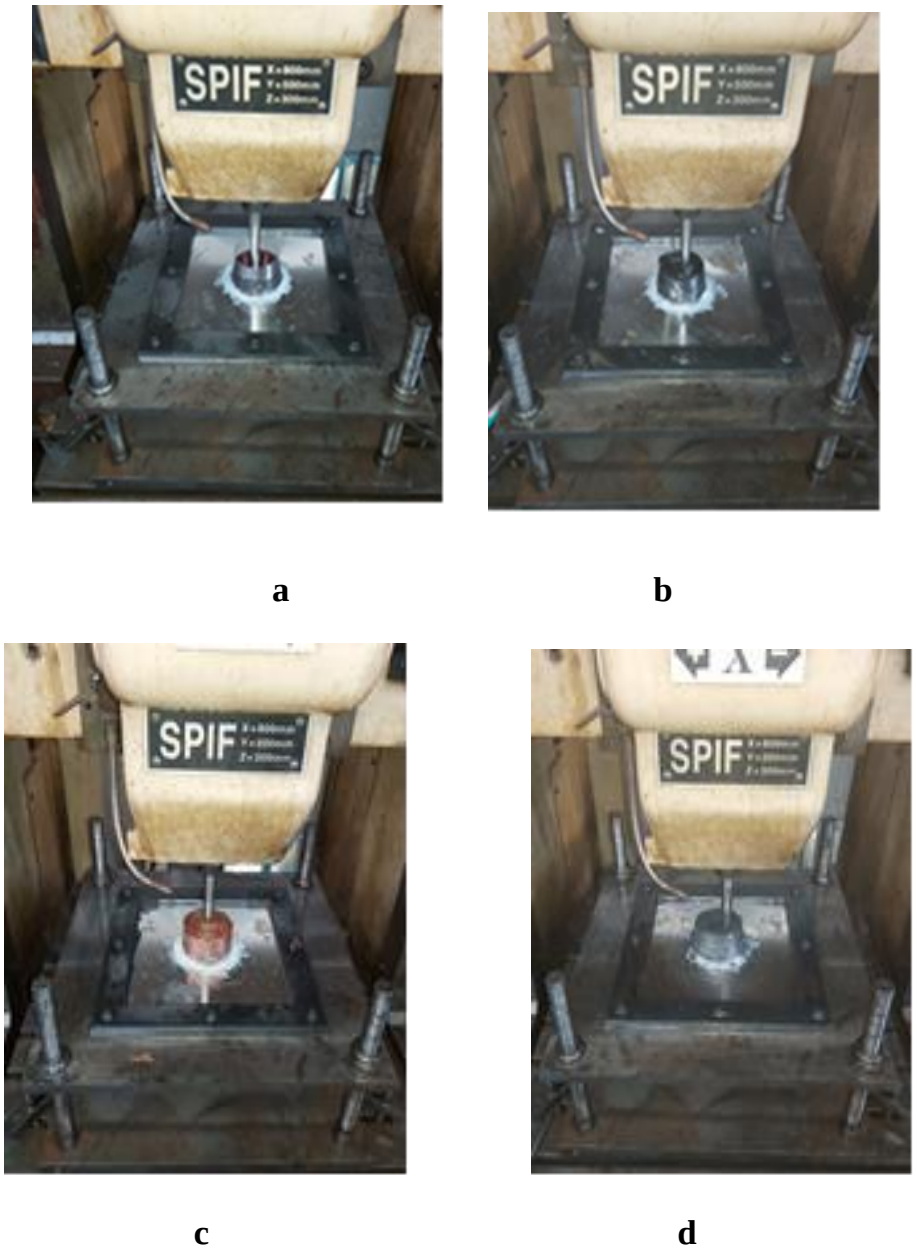


Hình 5. 9 Mô hình CAD TPIF khảo sát chất bôi trơn

Khảo sát bôi trơn

Trường hợp 1

Chất bôi trơn được khảo sát với bốn loại chất bôi trơn là nhớt bôi trơn, mỡ bôi trơn công nghiệp, bột than chì và hỗn hợp bôi trơn gồm than chì mỡ bôi trơn với tỉ lệ 1: 1 và nhớt bôi trơn làm kết dính hỗn hợp lại với nhau như *hình 5.10*. Phương pháp bôi trơn được nhúng đầu dụng cụ tạo hình trong chất bôi trơn như *hình 5.10*.



Hình 5. 10 Chất bôi trơn và cách bôi trơn tạo hình sản phẩm bằng công nghệ TPIF

a) bôi trơn bằng nhớt, b) bôi trơn bằng hỗn hợp, c) bôi trơn bằng mỡ, d) bôi trơn bằng than chì.

Bảng 5. 5 Thông số máy và chất bôi trơn.

STT	Bôi trơn		Thông số thực nghiệm				Độ nhám mặt ngoài (µm)
	Chất bôi trơn	Phương pháp bôi trơn	Bước tiến theo phương z (Δz) *mm*	Tốc độ dụng cụ (mm/ phút) (V_{xy})	Đường kính dụng cụ (D) *mm*	Tốc độ trục chính (*vòng/phút*) (n)	
1	Bột than chì	Bôi trơn nhúng chìm đầu dụng cụ tạo hình	0,2	800	12	1000	3,82
2	Dầu bôi trơn	Bôi trơn nhúng chìm đầu dụng cụ tạo hình	0,2	800	12	1000	0,95
3	Mỡ bôi trơn	Bôi trơn nhúng chìm đầu dụng cụ tạo hình	0,2	800	12	1000	1,94
4	Hỗn hợp bôi trơn	Bôi trơn nhúng chìm đầu dụng cụ tạo hình	0,2	800	12	1000	0,94

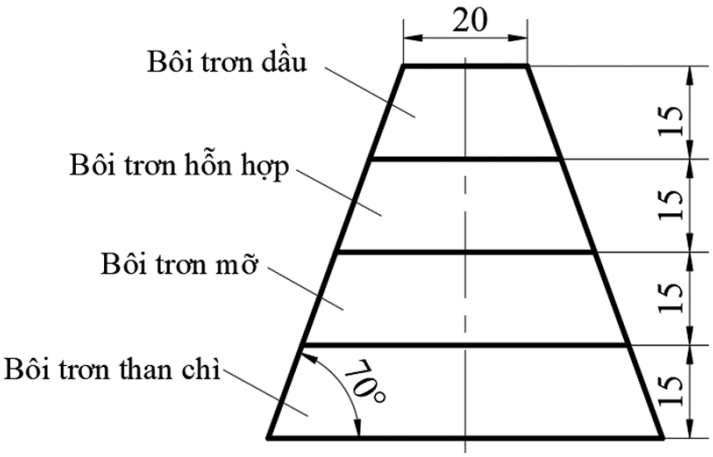
Sản phẩm sau khi tạo hình bằng bốn loại chất bôi trơn khác nhau với cùng thông số máy và cách bôi trơn, số lần lặp là 3.

a **b** **c** **d**

Hình 5. 11 Sản phẩm tạo hình bằng công nghệ TPIF với bốn loại chất bôi trơn khác nhau.

a) sản phẩm bôi trơn bằng hỗn hợp, b) sản phẩm bôi trơn bằng mỡ, c) sản phẩm bôi trơn bằng nhớt, d) sản phẩm bôi trơn bằng than chì.

Tích hợp bốn loại chất bôi trơn khác nhau với cùng thông số máy và cách bôi trơn trên cùng một sản phẩm là côn nón với góc nghiêng 70^o như hình 5.14.



a/ b/

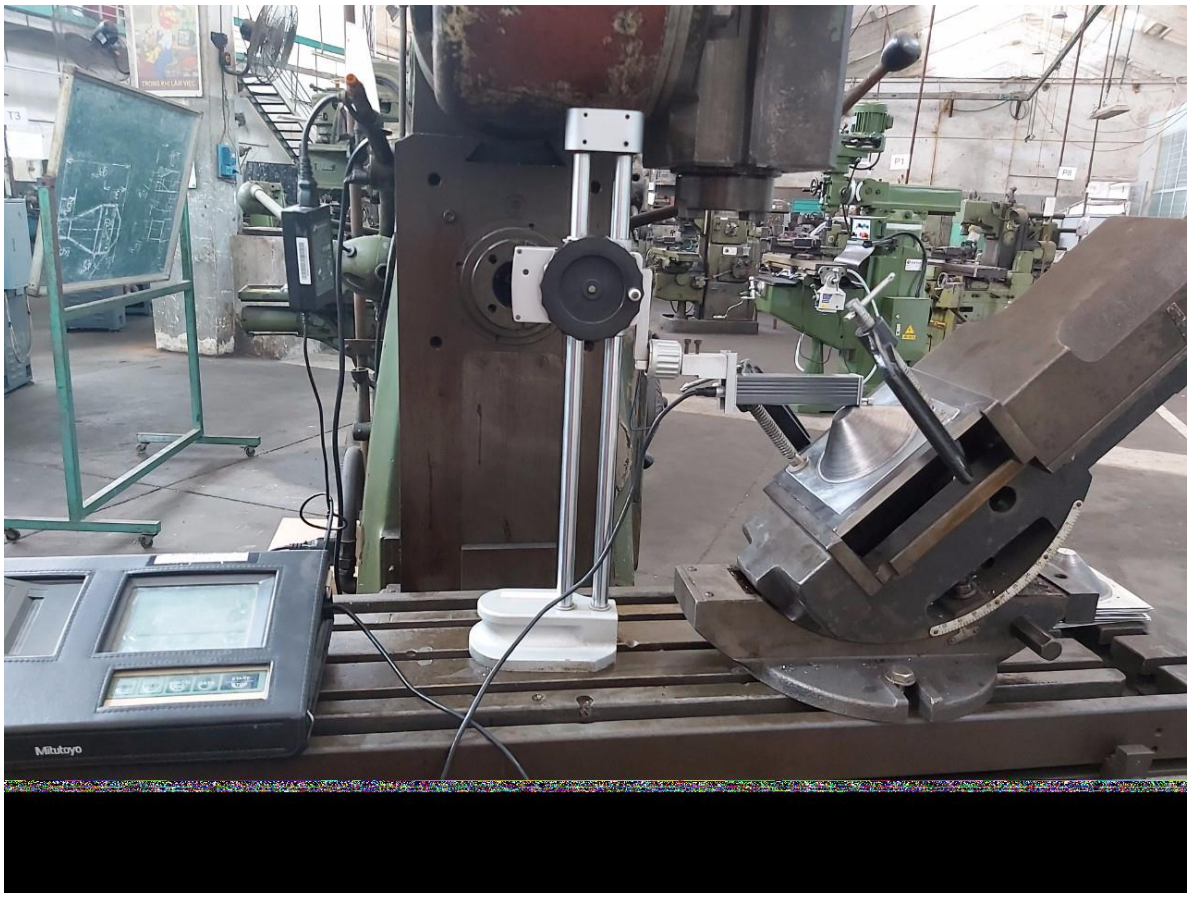
Hình 5. 12 Sản phẩm tạo hình bằng công nghệ TPIF được tích hợp 4 loại chất bôi trơn trên cùng sản phẩm côn nón góc nghiêng 70^o

a/ sản phẩm sau tạo hình, b/ biên dạng và bố trí các lớp bôi trơn.

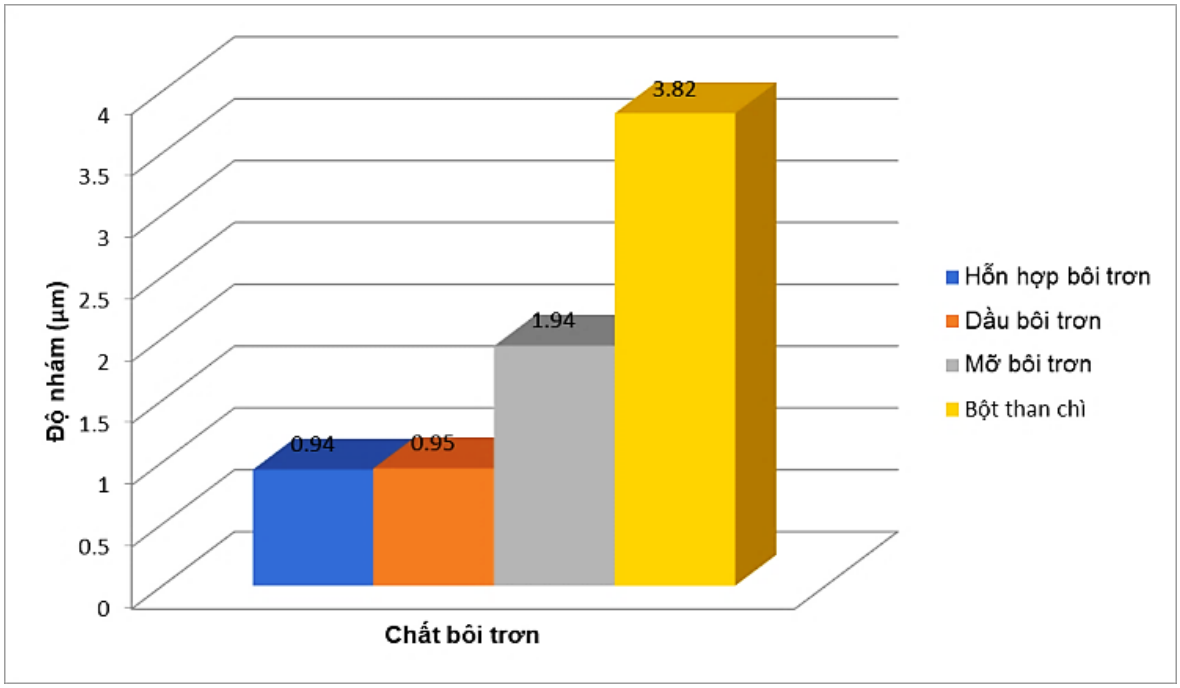
Khảo sát độ nhám bề mặt

Sản phẩm sau khi tạo hình bằng bốn loại chất bôi trơn khác nhau với cùng thông số máy và cách bôi trơn. Chi tiết được đo độ nhám tại phòng thí nghiệm đo

lường cơ khí-khoa Cơ khí, trường đại học Bách khoa Tp HCM với sơ đồ đo như *hình 5.14*. Chi tiết được định vị và kẹp chặt trên mặt phẳng chuẩn, mặt phẳng chuẩn được kẹp trên ê tô xoay, với góc xoay 45^{o}, cùng với góc nghiêng côn nón 45^{o}, đường sinh côn nón trên sơ đồ đo sẽ song song phương ngang, cả hệ thống đo được đặt trên mặt chuẩn của bàn máy phay, do đó đầu dò máy đo độ nhám sẽ đo được giá trị độ nhám của biên dạng chi tiết cần đo. Giá trị đo *bảng 5.5*



Hình 5. 13 Đo độ nhám mặt ngoài chi tiết.



Hình 5. 14 Biểu đồ độ nhám mặt ngoài

Bôi trơn giúp giảm độ nhám bề mặt. Tuy nhiên, độ nhám bề mặt sản phẩm là khác nhau tùy thuộc vào chất bôi trơn. Biểu đồ *hình 5.13* cho thấy bôi trơn bằng hỗn hợp bôi trơn có độ nhám bề mặt thấp nhất và bôi trơn bằng bột than chì rắn có độ nhám bề mặt cao nhất. Bôi trơn dầu và bôi trơn hỗn hợp có độ nhám bề mặt sản phẩm gần bằng nhau. Mặt khác, trao đổi nhiệt của dầu bôi trơn rất tốt do dầu ở trạng thái lỏng. Do đó, bề mặt sản phẩm rất mịn và sáng (*hình 5.15.b*). Bôi trơn bột than chì, đầu tiên, độ nhám bề mặt sản phẩm là mịn; sau đó độ nhám bề mặt sản phẩm tăng dần lên do ma sát và tăng nhiệt (*hình 5.15 a*). Bột than chì là chất rắn, vì vậy trao đổi nhiệt của nó là rất kém.

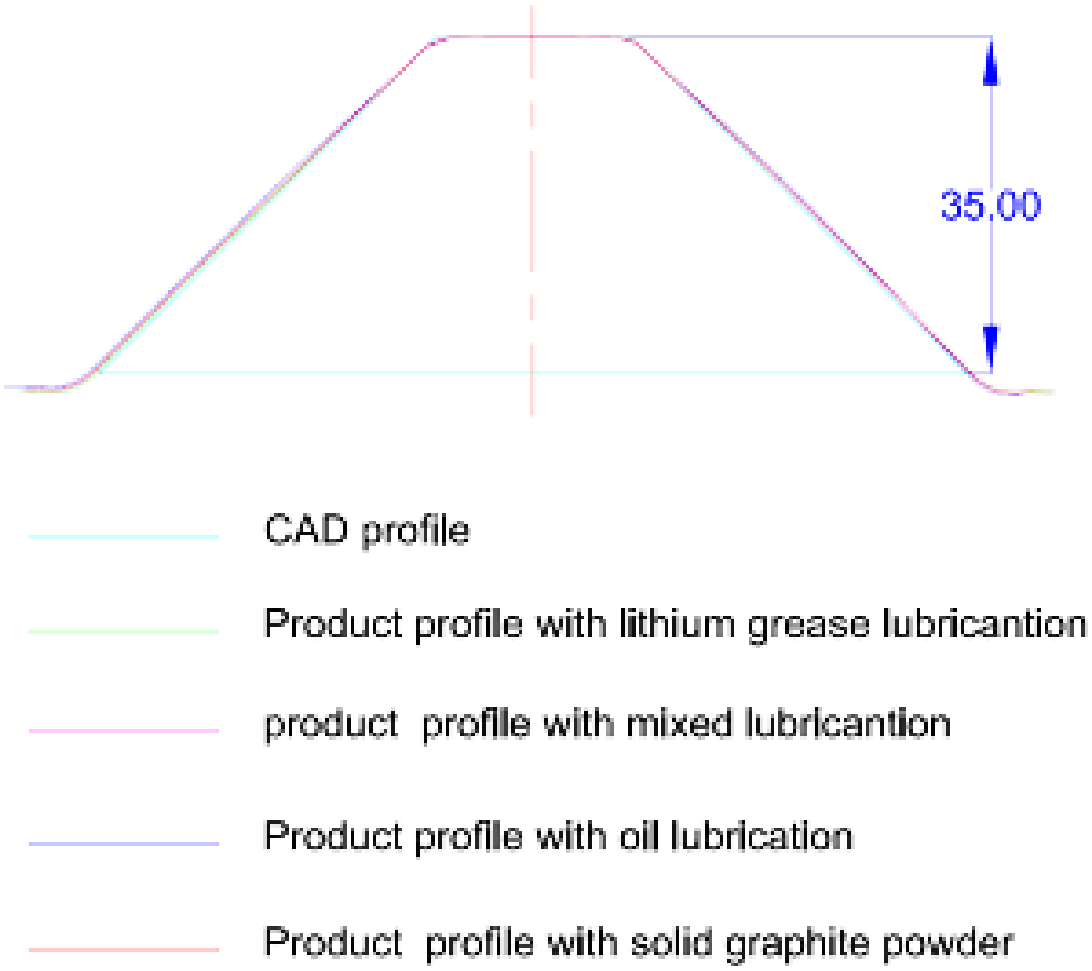
a b

Hình 5. 15 Sản phẩm bôi trơn bằng than chì (a) và sản phẩm bôi bằng dầu bôi trơn (b).

So sánh biên dạng giữa thực nghiệm và CAD

Sau khi gia công chi tiết côn nón cụt bằng công nghệ biến dạng gia tăng đa điểm, sản phẩm sau khi tạo hình bằng năm loại chất bôi trơn khác nhau với các phương pháp bôi trơn như *bảng 5.5* cùng thông số máy. Biên dạng chi tiết côn nón cụt được đo biên dạng bằng máy đo tọa độ tại phòng thí nghiệm đo lường cơ khí, khoa Cơ khí, trường đại học Bách khoa Tp HCM, để khảo sát biên dạng chi tiết.

Hình 5. 16 Đo tọa độ chi tiết bằng máy đo tọa độ



Hình 5. 17 Tích hợp biên dạng CAD và thực nghiệm

Bảng 5. 6 Giá trị đo chiều dày

stt	Chiều dày (*mm*)
1	0,512
2	0,505
3	0,51
4	0,511
5	0,507
Trung bình	**0,509**

Từ đồ thị cho thấy biên dạng CAD và biên dạng sản phẩm gần như trùng nhau. Điều đó cho thấy rằng, bôi trơn gần như không ảnh hưởng đến biên dạng sản phẩm.

So sánh chiều dày giữa thực nghiệm và tính toán

Chiều dày chi tiết sau biến dạng tính theo công thức sau:

$$t_1 = t_0 \sin(90 - \alpha) = t_0 \cos(\alpha) \qquad [43] \qquad (5.1)$$

Trong đó:

$\propto$: Góc hợp bởi phương ngang và cạnh chi tiết

Hình 5. 18 Hình minh họa 3D và chi tiết

Sau khi gia công biến dạng gia tăng bằng công nghệ biến dạng gia tăng đa điểm chi tiết bị biến dạng, tiến hành đo chiều dày mẫu bằng thước panme với độ chính xác ±0,001 *mm* (*hình 5.20*). Giá trị đo như *bảng 5.6*.

$t_1=t_o\cos 70^o=1,5x\ 0,342602=0,51\ mm,\ t_1=0,51\ mm$

Phần trăm sai số là $\Delta t =(t_o - t_1)x100/\ t_o=(0,51-0,509)x100/0,51=0,196\%$.

Từ kết quả thực nghiệm và tính toán, cho thấy sai số là rất bé. Độ dày biến dạng gia tăng đa điểm tuân theo định luật sin.

Trường hợp 2

Sử dụng năm chất bôi trơn khác nhau và hai phương pháp bôi trơn, tính chất vật lý chất bôi trơn thể hiện qua *bảng 5.7*, số lần lặp là 3.

Bảng 5. 7 Thông tin chất bôi trơn và tính chất vật lý

Chất bôi trơn	**Trạng thái**	**Độ nhớt (mm^2/s)**	**Khối lượng riêng (kg/m^3)**
Bột than chì	Rắn	-	1800
AS40 grease Mỡ	Dẻo	-	1760
VG 150 EP oil	Lỏng	150	872
Dầu hướng dương	Lỏng	48.6	920
Hỗn hợp bôi trơn	Dẻo	-	-

Chi tiết sau biến dạng được đo độ nhám bề mặt và độ chính xác hình học bằng cách đo biên dạng và giá trị độ nhám bề mặt. Cấu trúc tế vi của các bề mặt chi tiết tạo hình cũng được quan sát bằng cách sử dụng kính hiển vi điện tử (SEM- Scanning Electronic Microscope)

Các thông số chính cho quá trình TPIF là: bước sâu 0,2 *mm/s*, đường kính dao 12 *mm*, tốc độ tiến dao 800 *mm/phút*, tốc độ trục chính 1000 *vòng/phút*, dụng cụ tạo hình lăn không trượt trên bề mặt tấm

Bảng 5. 8 Ma Trận chất bôi trơn và phương pháp bôi trơn

Chất bôi trơn	Phun	Phủ	Nhúng chìm
Bột than chì		X No. 10	X No. 2
AS40 grease Mỡ		X No. 4	
Lubrication oil (Gear VG 150 EP)	X No. 6		X No. 3
Vegetable oil (Dầu hướng dương)	X No. 8		X No. 7
Hỗn hợp bôi trơn		X No. 9	X No. 1

Tùy thuộc vào phương pháp bôi trơn, mỗi thí nghiệm được chuẩn bị bôi trơn trên tấm tạo hình. Bột than chì bôi trơn bằng phương pháp phủ, bột than chì được trải trên toàn bộ bề mặt tấm trên với độ dày bằng đường kính đầu dao (12 *mm*) và được kết dính với bề mặt phôi tấm bằng màng mỡ rất mỏng. Bôi trơn mỡ bằng phương pháp phủ, mỡ được phủ một lớp có chiều cao 12 *mm*. Đối với chất bôi trơn dạng lỏng, phương pháp bôi trơn nhúng chìm đầu dụng cụ tạo hình là phía trên bề mặt phôi tấm được đặt một bề mặt trụ tròn xoay bằng nhựa sau đó dáng keo giữa vòng tròn tiếp xúc giữa mặt trụ và tấm phôi để đảm bảo dụng cụ tạo hình nhúng trong chất bôi trơn (*hình 5.10*). Bột than chì có thể nguy hiểm trong một số ứng dụng tạo hình vì nó làm cho bụi ra môi trường. Vì vậy, nó cũng được trộn với 50% bột than chì, dầu mỡ và dầu máy để phủ lên bề mặt tấm. Chất bôi trơn lỏng được phun trực tiếp vào đầu dụng cụ tạo hình bằng hệ thống bôi trơn, làm mát tuần hoàn hiện có của máy CNC. Các phương pháp bôi trơn cho mỗi thí nghiệm của quá trình TPIF với các chất bôi trơn khác nhau được trình bày trên *bảng 5.8*.

Trong tất cả các thí nghiệm, chất bôi trơn và phương pháp bôi trơn nêu trong *bảng 5.8* được bôi trực tiếp lên bề mặt trên của tấm kim loại trước khi bắt đầu quá trình TPIF. Chất bôi trơn luôn đảm bảo lấp đầy hoàn toàn vùng tiếp xúc giữa dụng cụ tạo hình và bề mặt kim loại. Quá trình tạo hình sẽ bị dừng lại khi hình nón đạt được chiều cao 35 *mm* hoặc bị hỏng. Chi tiết sau tạo hình được đo độ nhám bề mặt và biên dạng.

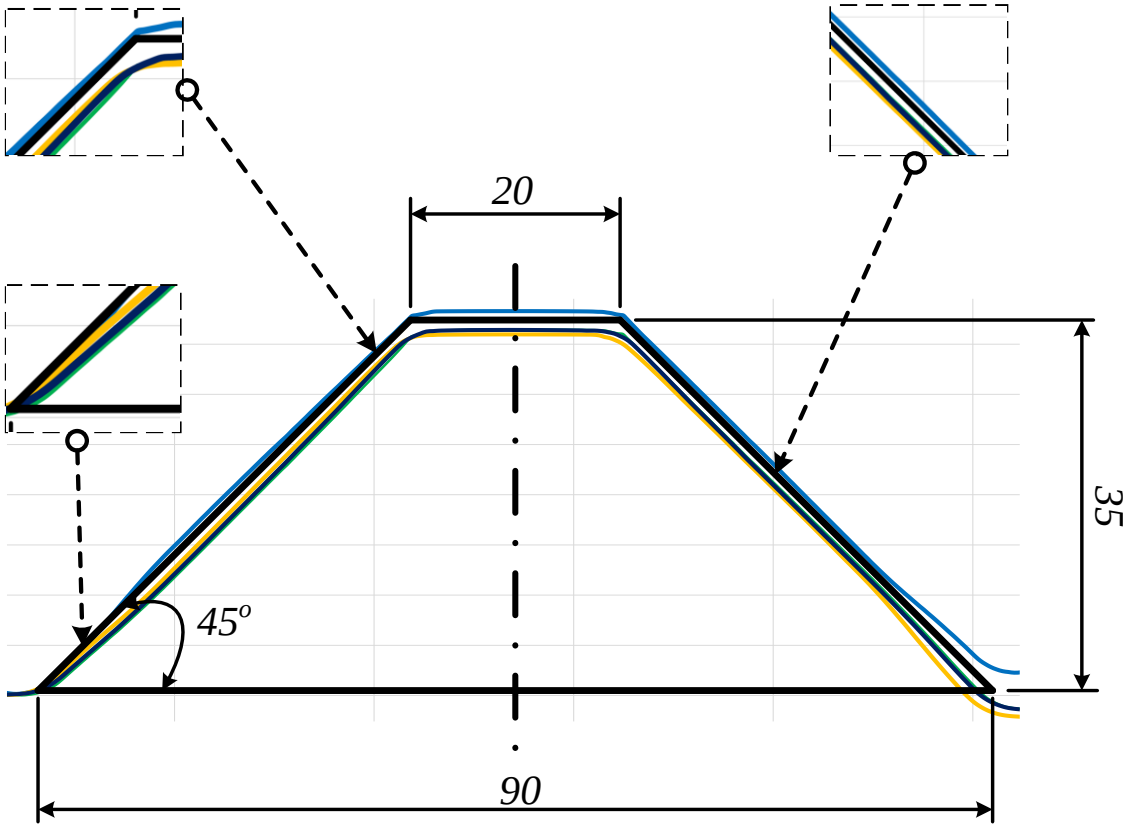
Độ chính xác hình học và sự phân bố độ dày

Chi tiết sau tạo hình được đo biên dạng ở mặt cắt nửa chi tiết cho cả bề mặt trên và bề mặt dưới bằng cách sử dụng CMM (*hình 5.16*). Dữ liệu đo được trích xuất

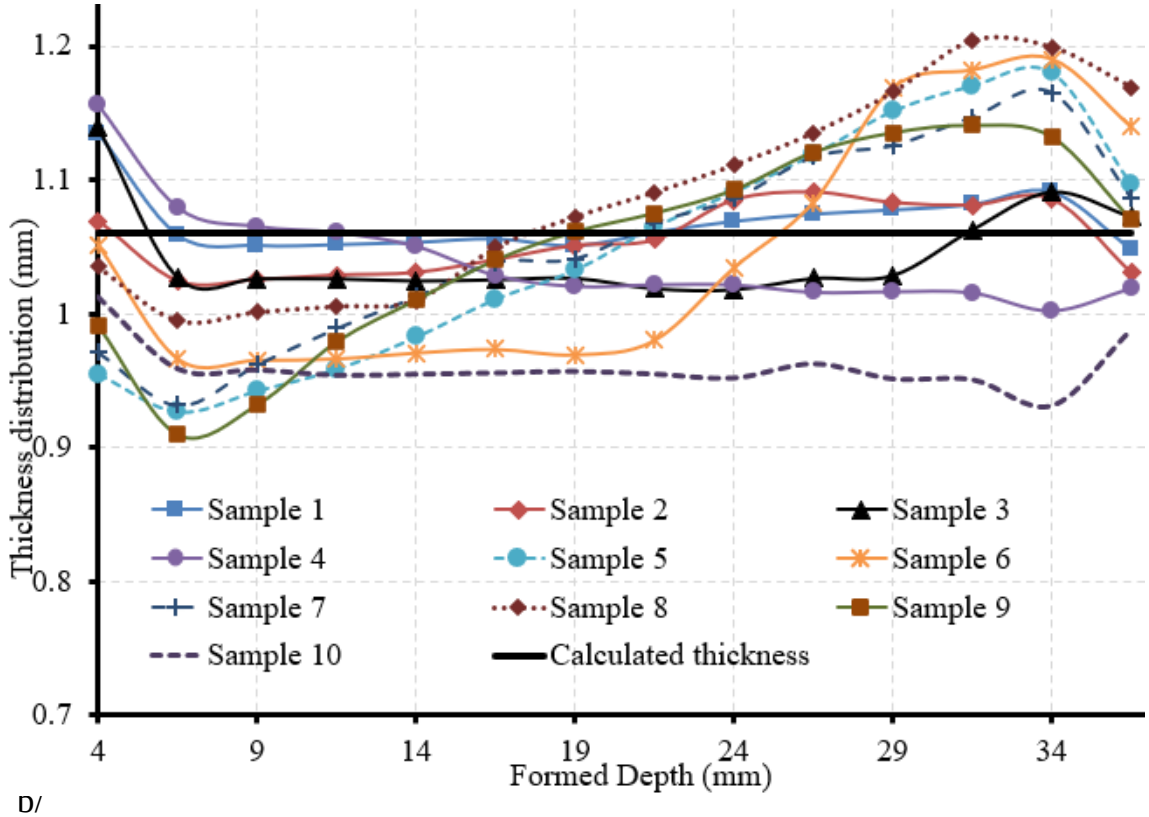
từ máy CMM trong tệp được định dạng tọa độ. Các biên dạng bên ngoài và bên trong được so sánh với các biên dạng CAD như trong *Hình 5.22*. Biên dạng có thể được chia thành ba vùng: trên cùng, thành và đáy của hình nón. Nhìn chung, các đường này đã chỉ ra rằng các vùng tường là phù hợp nhất với biên dạng CAD cho tất cả các chất bôi trơn, sai số tối đa là khoảng 0,1 *mm*. Trong khi vùng trên và dưới có độ chính xác thấp hơn với sai số tối đa là 0,2 *mm*. Tuy nhiên, các kết quả này có độ chính xác cao hơn so với quy trình SPIF với cùng vật liệu và các thông số gia công.

Chất bôi trơn được nhúng hoàn toàn vào đầu dụng cụ tạo hình cho thấy độ chính xác cao đối với quá trình TPIF với sai số tối đa là khoảng 0,08 *mm* (mẫu 1, 2, 3, 4 và 7 trong *Hình 5.19*). Chất bôi trơn lấp đầy vùng tiếp xúc giữa bề mặt của dụng cụ tạo hình và tấm kim loại. Từ quan sát thực nghiệm, dụng cụ tạo hình di chuyển trên tấm kim loại đã tạo ra một thung lũng cục bộ nơi chất bôi trơn kết tụ xung quanh đầu dụng cụ. Như vậy, cách này có thể giữ cho sự bôi trơn liên tục giữa đầu dao và bề mặt tấm và giảm ma sát đáng kể. Mặt khác, phương pháp phun và phương pháp phủ cho thấy độ chính xác hình học kém hơn do bôi trơn không liên tục và không đồng đều trong vùng tiếp xúc khi dụng cụ tạo hình di chuyển trên tấm dẫn đến ma sát trực tiếp cao của đầu dao với bề mặt tấm.

Độ chính xác hình học cao được tìm thấy cho cả bột than chì nguyên chất và chất bôi trơn hỗn hợp với sai số 0,02 *mm* trong vùng tường. Kết quả này là rất quan trọng vì graphit là chất bôi trơn rắn rẻ tiền, thích hợp cho việc tạo hình kim loại ở khía cạnh thực hành và giá thành. Sử dụng chất bôi trơn hỗn hợp (50% graphit) đã tránh được sự phát tán của bụi graphit ra môi trường. Mỡ và dầu máy trong hỗn hợp bôi trơn giúp các hạt than chì bám và lấp đầy các rãnh nhỏ trên bề mặt kim loại. Do đó, hiệu quả bôi trơn tốt hơn so với bột than chì nguyên chất. Độ chính xác hình học của dầu nhờn hỗn hợp là khoảng 0,02 *mm*. Ngoài ra, dầu máy (Gear VG 150 EP) cũng mang lại độ chính xác hình học tốt.


20
35
45°
90

a/


Thickness distribution (mm)
Formed Depth (mm)
1.2
1.1
1
0.9
0.8
0.7
4
9
14
19
24
29
34
Sample 1
Sample 2
Sample 3
Sample 4
Sample 5
Sample 6
Sample 7
Sample 8
Sample 9
Sample 10
Calculated thickness

D/

Hình 5. 19 a. biên dạng CAD; b. phân bố độ dày chi tiết

Đo độ nhám bề mặt

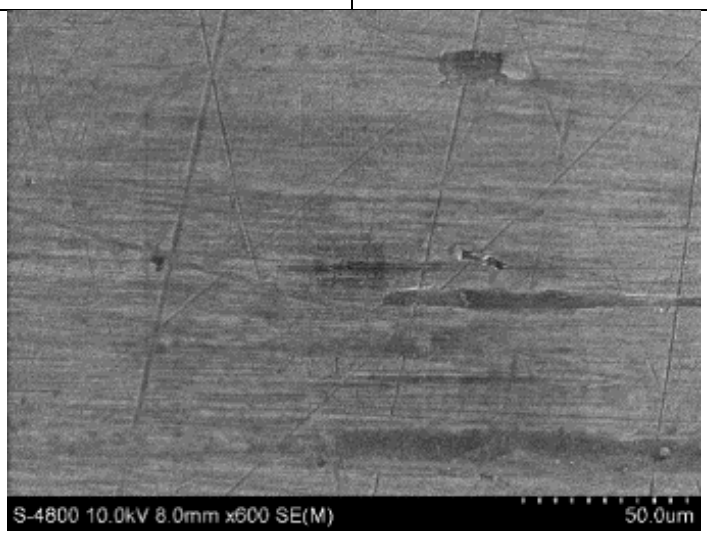
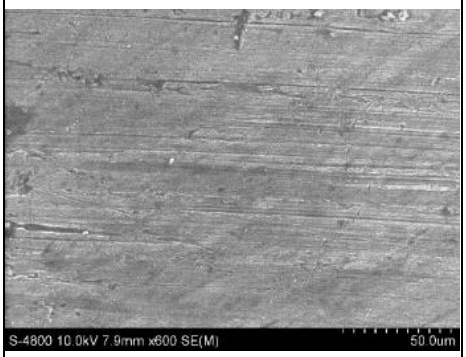
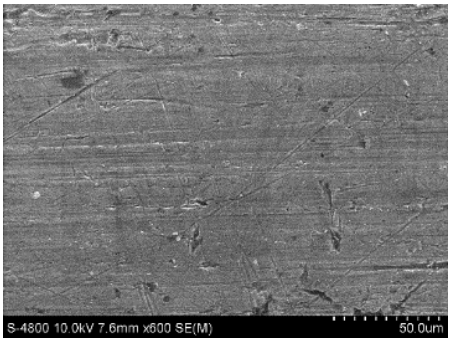
Đối với phép đo độ nhám bề mặt, bộ phận được tạo thành cho mỗi phương pháp bôi trơn và bôi trơn được cố định trên một ê tô nghiêng 45^o so với mặt phẳng nằm ngang (*Hình 5.15*). Máy đo độ nhám hiệu Mitutoyo được sử dụng để đo các thông số độ nhám của hai bề mặt hình nón theo ISO 1302 với độ nhám trung bình số học (R_a) (*Bảng 5.9*). Kết quả được thể hiện trên Bảng 5.9, với bề mặt bên ngoài tiếp xúc với dụng cụ tạo hình. Quan sát thấy rằng bột than chì không phải là chất bôi trơn tốt cho hai phương pháp bôi trơn trong quy trình TPIF. Mặc dù bột graphit là một chất bôi trơn tốt trong các ứng dụng công nghiệp, nhưng hiệu quả bôi trơn phụ thuộc vào kích thước của hạt graphit. Một hạt lớn rất khó điền vào bề mặt tiếp xúc giữa dụng cụ tạo hình và tấm kim loại trong quá trình TPIF. Ngoài ra, chất bôi trơn này còn phát tán một lượng lớn bụi ra môi trường xung quanh. Do đó, chất bôi trơn này không phù hợp với quy trình TPIF với giá trị R_a cao (R_a = 4,32 đối với phương pháp bôi trơn không liên tục và R_a = 2,6 đối với phương pháp bôi trơn liên tục). Các hình ảnh SEM cũng cho thấy rằng phương pháp nhúng cho bề mặt tốt hơn so với phương pháp phủ do lớp bột than chì không liên tục trên tấm kim loại.

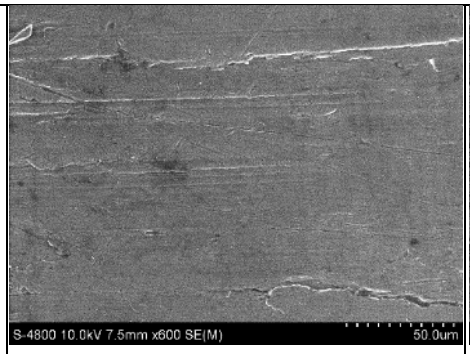
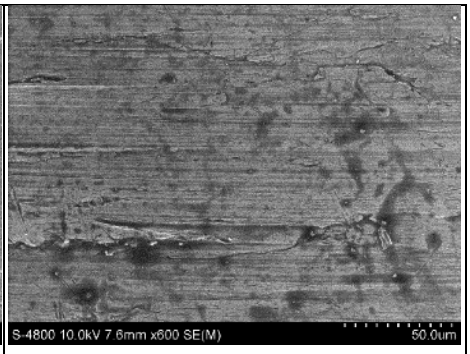
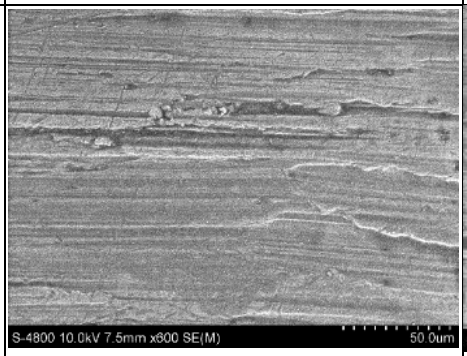
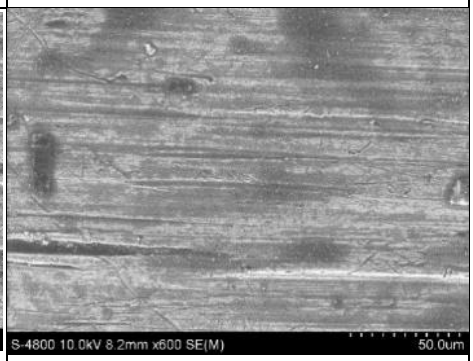
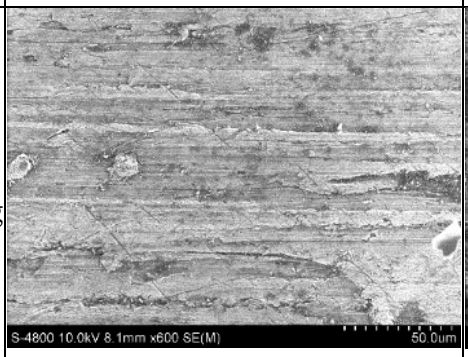
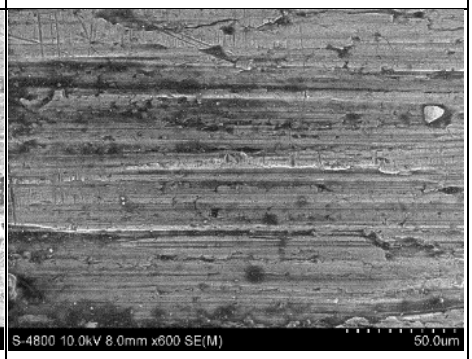
Bột than chì trộn với lượng dầu mỡ và dầu máy thích hợp tạo ra hiệu quả bôi trơn cao trong quy trình TPIF. Mỡ và dầu máy đóng vai trò là chất kết dính và lấp đầy các hạt than chì trong các vết bám trên bề mặt kim loại. Hỗn hợp này cũng ngăn chặn sự lây lan của bột than chì. Các hình ảnh SEM cũng cho thấy có một vài hình nón hình thành trên bề mặt được hình thành. Phương pháp bôi trơn chìm cho thấy bề mặt nhẵn hơn so với phương pháp phủ. Với chất bôi trơn này, chất lượng bề mặt có thể lưu trữ đến R_a = 0,65, rất hữu ích cho nhiều ứng dụng công nghiệp.

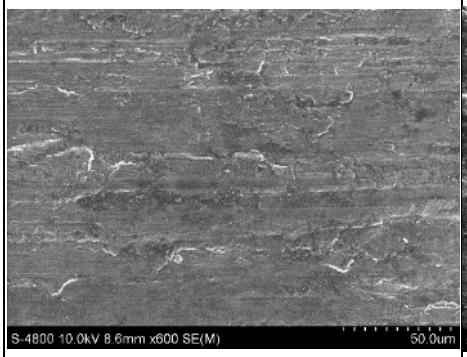
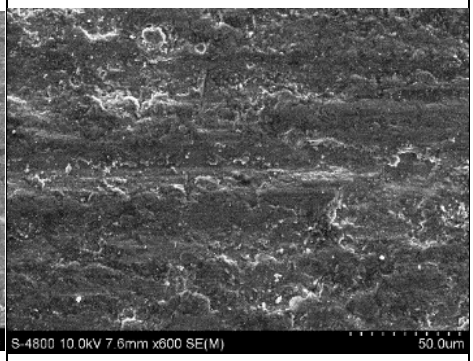
AS40 và dầu máy (Gear VG 150) là hai loại dầu bôi trơn phổ biến được sử dụng trong ngành chế tạo máy cho thấy chất lượng bề mặt tương đối tốt trong quá trình TPIF. Không có sự khác biệt khi áp dụng phương pháp bôi trơn bằng mỡ AS40. Tuy nhiên, nó là một sự khác biệt đáng kể giữa hai phương pháp bôi trơn của dầu

máy. Phương pháp bôi trơn chìm cho dầu máy ưu việt hơn so với phương pháp phun. Cần sử dụng hệ thống bơm tuần hoàn để cung cấp dầu máy cho quá trình biến dạng TPIF. Mặt khác, sử dụng dầu thực vật trong quá trình TPIF với phương pháp nhúng cũng tạo ra chất lượng bề mặt tốt như trong trường hợp dầu máy. Đây là một cách tiềm năng để thay thế dầu khoáng để giảm chi phí và ảnh hưởng đến môi trường.

Bảng 5. 9 Thể hiện Chất bôi trơn, phương pháp bôi trơn và kết quả độ nhám và cấu trúc tế vi

<table>
<tr><th>Chất bôi trơn</th><th>phương pháp phun/phủ</th><th>phương pháp nhúng chìm</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Tấm nhôm phôi</td><td colspan="2"> 
</td></tr>
<tr><td colspan="2">R_a = 0,52 µm</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Bôi trơn hỗn hợp</td><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>R_a = 1,46 µm</td><td>R_a = 0,65 µm</td></tr>
</table>

AS40 Mỡ		
	R_a = 1,33 µm	R_a = 1,30 µm
Gear VG 150 oil		
	R_a = 1,21 µm	R_a = 1,32 µm
Dầu hướng dương		
	R_a = 1,85 µm	R_a = 1,35 µm

Bột than chì		
	R_a = 4,32 µm	R_a = 2,6 µm

Cuối cùng, điều đáng nói là phương pháp bôi trơn chìm là phương pháp phù hợp nhất cho quy trình TPIF nơi màng bôi trơn có thể dễ dàng lấp đầy vùng tiếp xúc giữa dụng cụ tạo hình và bề mặt kim loại. Chất bôi trơn hỗn hợp mang lại những lợi thế tiềm năng để lưu trữ chất lượng bề mặt tốt trong quá trình TPIF. Dầu thực vật có giá trị độ nhớt thấp hơn vẫn cung cấp một cách rẻ hơn để áp dụng cho quá trình TPIF mà chất lượng bề mặt thu được khá giống với dầu máy.

5.3.2 Khả năng biến dạng (α)

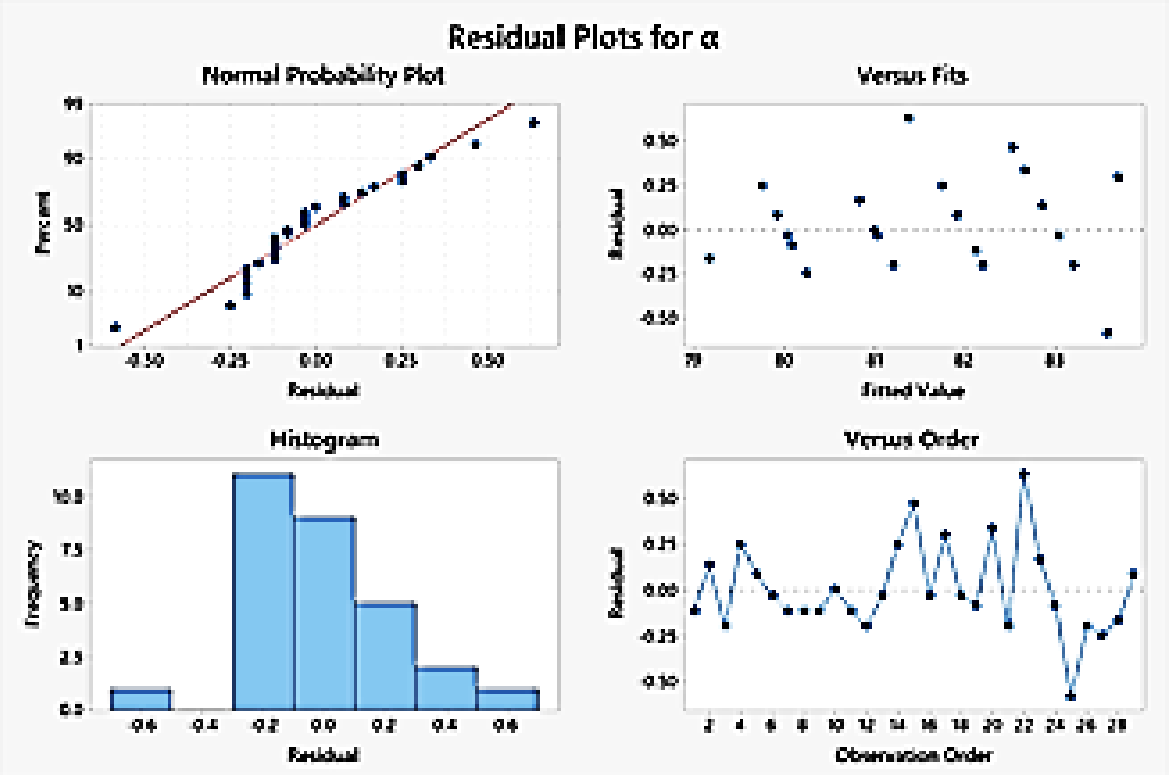
Thông số nghiên cứu là góc biến dạng α. Góc biến dạng lớn nhất đạt được trong thí nghiệm đặc trưng cho khả năng tạo hình lớn nhất của nhôm tấm A 1050 H14 bằng phương pháp TPIF. Theo bảng Model Summary (*bảng 5.11*), giá trị của R-Squared là 0,9625 (R^2 = 96.25% > 80%) điều đó chứng tỏ rằng bốn thông số công nghệ được chọn có liên hệ chặt chẽ với nhau, tương tác nhau và có ý nghĩa thống kê. Tức là mô hình thống kê là phù hợp cho thực nghiệm.

Bảng 5. 10 Phân tích ANOVA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	%
Model	8	43,1462	5,3933	64,15	0,000	
z	1	10,0833	10,0833	119,94	0,000	22,49
V_{xy}	1	8,3333	8,3333	99,13	0,000	18,59
n	1	0,0833	0,0833	0,99	0,331	0,19
D	1	12,0000	12,0000	142,74	0,000	26,77
z*z	1	10,1462	10,1462	120,69	0,000	22,63
z*D	1	2,2500	2,2500	26,76	0,000	5,02
Error	20	1,6814	0,0841			
Total	28	44,8276				

Bảng 5. 11 Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0,289946	96,25%	94,75%	88,96%



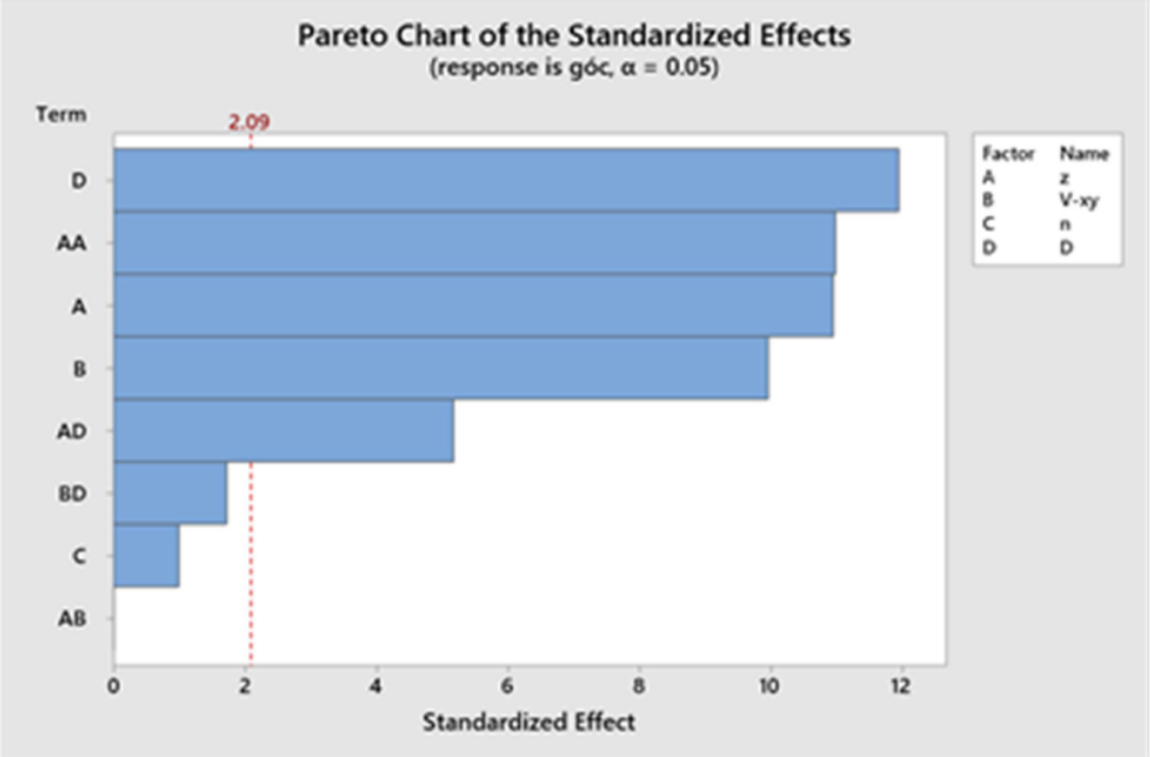
Hình 5. 20 Biểu đồ phần dư cho góc biến dạng.

Từ *bảng 4.10* ANOVA, giá trị P của mô hình là 0<0,05, chứng tỏ mô hình thực nghiệm phù hợp.Theo biểu đồ Pareto, ảnh hưởng của đường kính dụng cụ là lớn nhất, tiếp đến bước tiến Δz, tốc độ V_{xy} đến góc biến dạng và ảnh hưởng ít nhất là tốc độ trục chính. Tỉ lệ phần trăm ảnh hưởng được chỉ ra trong *bảng 4.12*.

Tỉ lệ phần trăm ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến góc biến dạng từ bảng phân tích ANOVA thể hiện qua bảng sau:

Bảng 5. 12 Phần trăm ảnh hưởng của các thông số.

STT	Thông số	% ảnh hưởng
1	Bước tiến Δz	**22,49**
2	Vận tốc dụng cụ V_{xy}	**18,59**
3	Đường kính dụng cụ D	**26,77**
4	Số vòng quay trục chính n	**0,19**



Hình 5. 21 Biểu đồ Pareto ảnh hưởng của bốn thông số công nghệ đến góc biến dạng

Hình 5.20 thể hiện một số kết qủa sau, thông qua phân tích phần biến thiên không do hồi quy (còn gọi là phần dư) đem lại một mô hình kiểm tra đầy đủ. Dữ liệu thực nghiệm minh chứng là phù hợp với kết quả dự đoán của mô hình được xây dựng. Tất cả phần dư cho khả năng biến dạng được chỉ ra. Biểu đồ xác suất thông thường của phần dư cho thấy phần dư được dịch chuyển xấp xỉ theo một đường thẳng, cho thấy phân phối lỗi là bình thường và kết quả quan sát phù hợp với kết quả dự đoán. Sự tăng dần này cũng được thể hiện bằng biểu đồ của các giá trị còn lại so với các giá trị trong *hình 5.20*, cho thấy rằng tất cả các giá trị nằm trong khoảng thay đổi xác định với 95%. Biểu thị biểu đồ của phần dư, thường được phân phối (so với thứ tự) biểu thị phần dư và thứ tự quan sát và cho thấy phần dư là độc lập. Tóm lại, phân tích phần dư cho thấy mô hình được xây dựng phù hợp để dự đoán khả năng biến dạng, với tất cả phần dư nằm trong giới hạn kiểm soát.

Phương trình hồi quy khả năng tạo hình (góc tạo hình α):

$\alpha = 79{,}17 + 7{,}374z + 0{,}0006\, V_{xy} + 0{,}0001n - 0{,}0863D - 2{,}451\, z^2 - 0{,}1786zD + 0{,}0001\, V_{xy}\, D$

<u>Nhận xét:</u>

Nhôm có khả năng tạo hình tốt vì có hằng số là 79,17.

Lấy đạo hàm riêng của góc tạo hình theo các biến tham số gia công như sau

Lấy đạo hàm riêng theo biến Δz.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \Delta z} = 7{,}374\Delta z - \ 0{,}1786D$$

Góc biến dạng là hàm số bậc hai theo biến Δz có hệ số bậc hai là -2,451 <0 là dạng đồ thị parabol có nhánh quay xuống dưới.

Lấy đạo hàm riêng theo biến D.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial D} = -0{,}0863 - \ 0{,}1786z < 0$$

Đạo hàm riêng theo biến *D* nhỏ hơn không nên góc biến dạng nghịch biến theo biến *D*. Nghĩa là Đường kính càng tăng góc biến dạng càng nhỏ và ngược lại.

Lấy đạo hàm riêng theo biến *n*

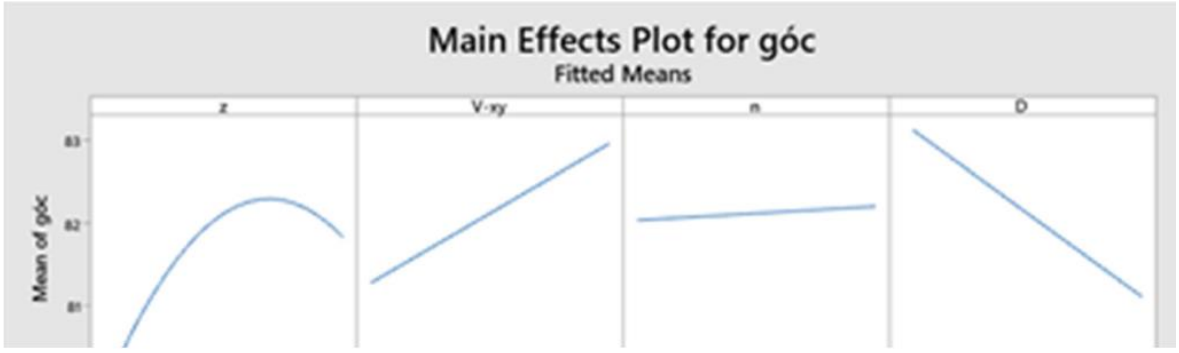
$$\frac{\partial \alpha}{\partial n} = 0{,}0001 \approx 0$$

Lấy đạo hàm riêng theo biến n gần bằng không nên góc biến dạng ảnh hưởng rất nhỏ khi n thay đổi.

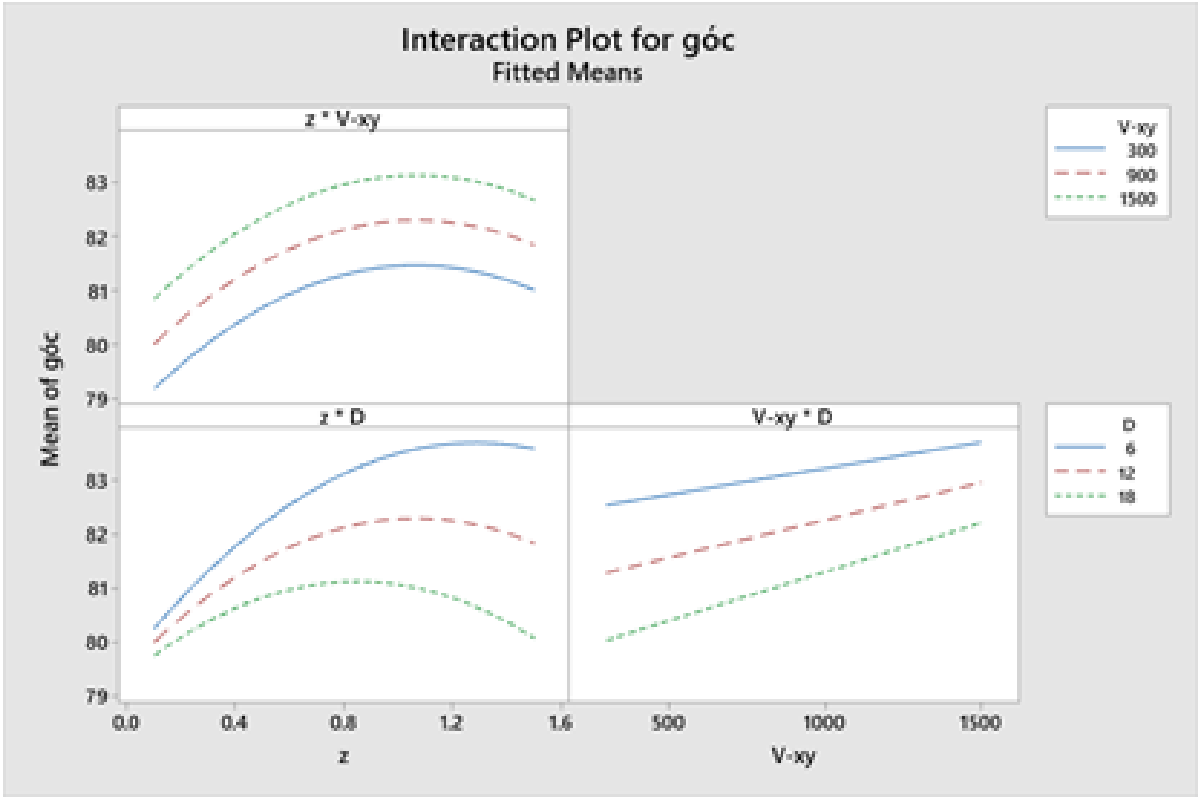
Lấy đạo hàm riêng theo biến V_{xy}

$$\frac{\partial \alpha}{\partial V_{xy}} = 0{,}0006 \ + 0{,}0001D$$

Góc biến dạng là hàm số bậc nhất theo biến V_{xy}, nên đồ thị góc biến dạng theo biến V_{xy} là dạng đồ thị đường thẳng.

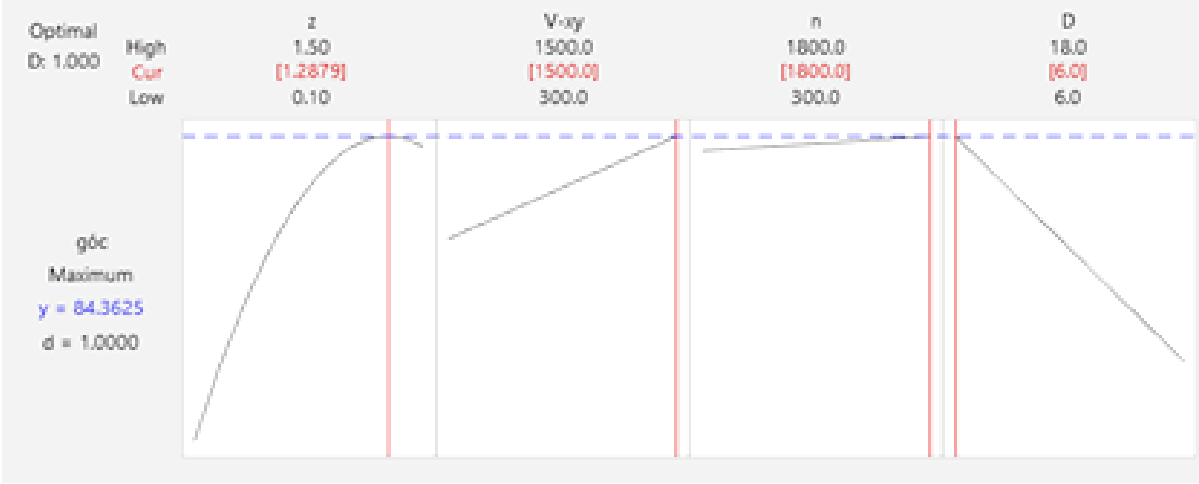


Đồ thị 5. 1 Đồ thị mối liên hệ giữa các yếu tố chính và góc biến dạng



Đồ thị 5. 2 Đồ thị mối liên hệ giữa các yếu tố tương tác và góc biến dạng

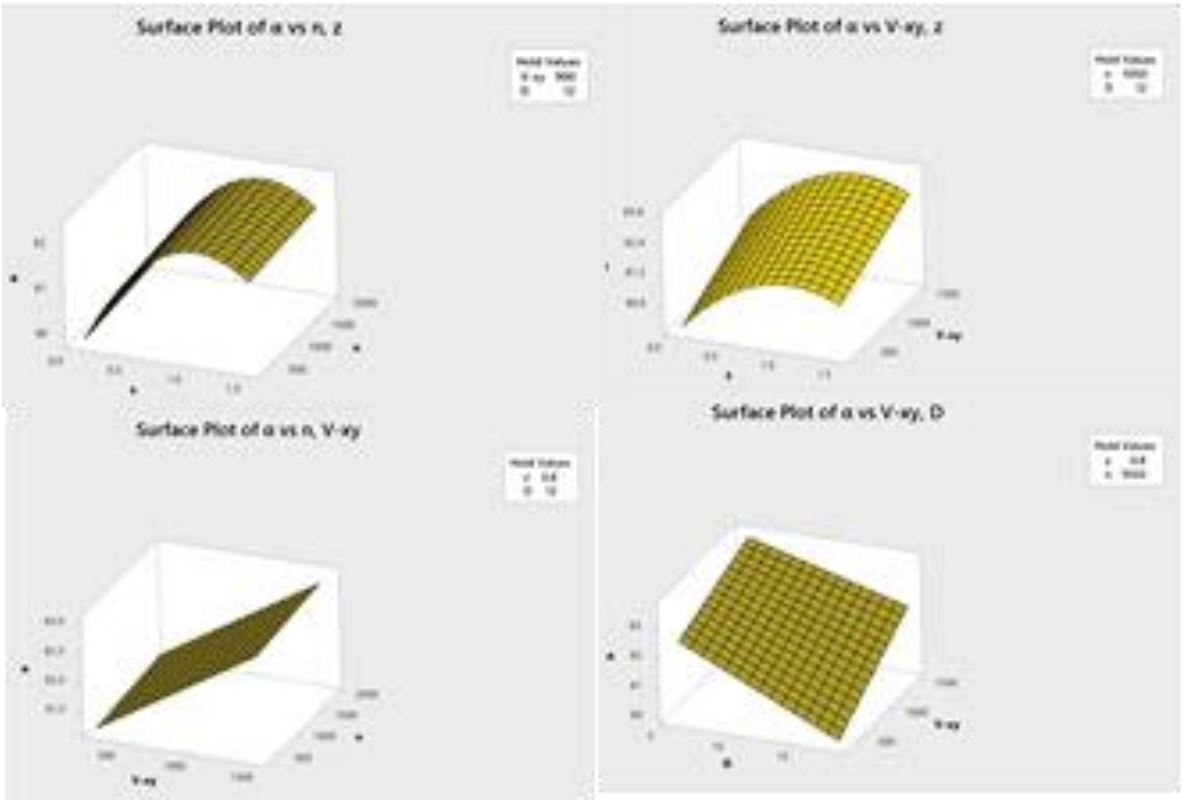
Từ *đồ thị 5.3* giá trị góc biến dạng lớn nhất là α=84,36º. Tương ứng các thông số công nghệ hợp lý như bảng 5.13



Đồ thị 5. 3 Đồ thị góc biến dạng lớn nhất từ bốn thông số công nghệ hợp lí.

Bảng 5. 13 Bộ thông số công nghệ hợp lý.

Δz (*mm*)	V_{xy} (*mm/phút*)	*D* (*mm*)	*n* (*vòng/phút*)	α (^{O})
1,29	1500	6	1800	84,36

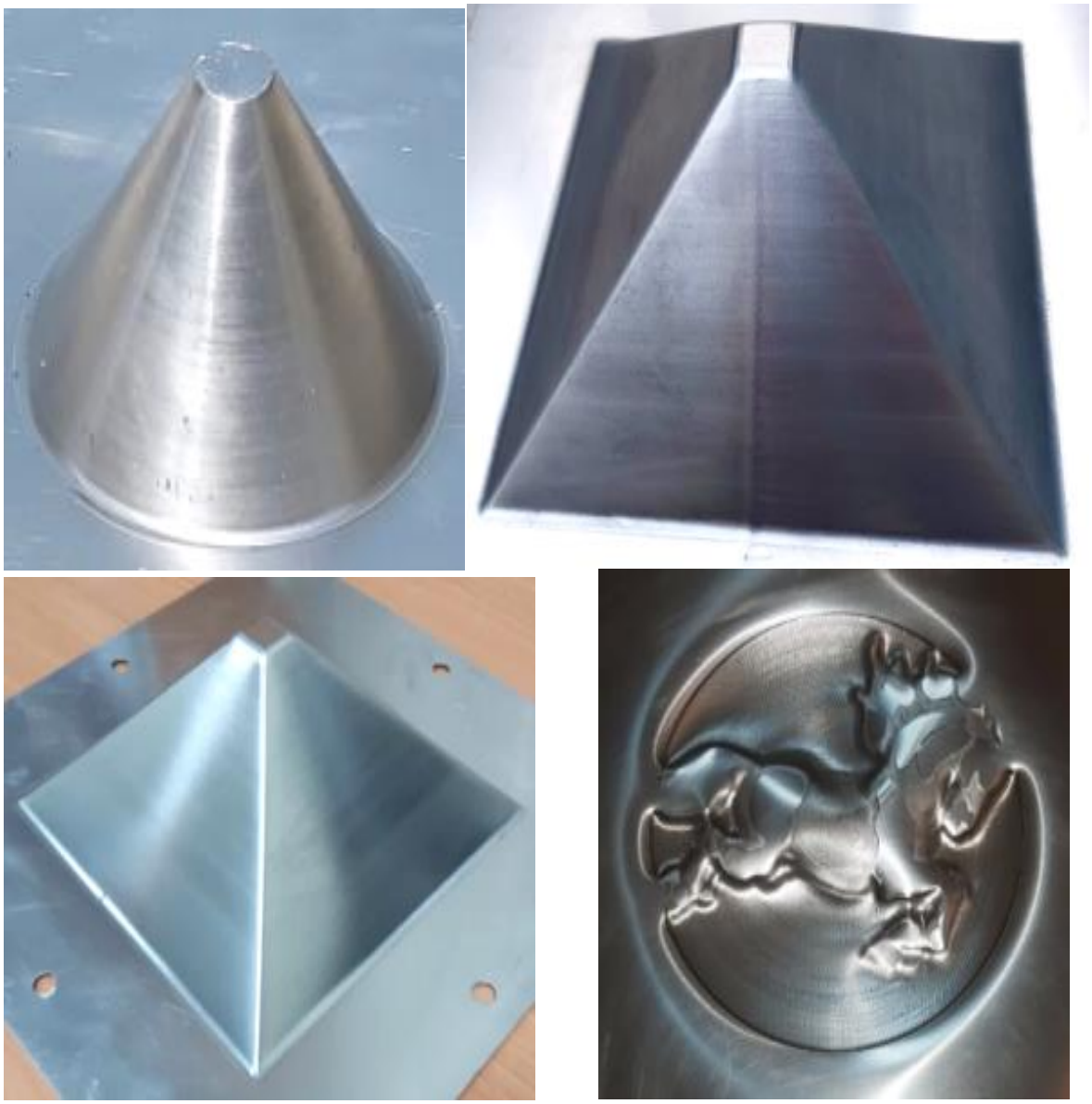


Hình 5. 22 Biểu đồ đáp ứng bề mặt 3D của khả năng biến dạng với các thông số công nghệ.

Các ảnh hưởng tương tác của các thông số độc lập lên khả năng biến dạng chỉ ra trên biểu đồ đáp ứng bề mặt 3D của khả năng biến dạng (*hình 5.22*). Nó dựa trên mối quan hệ giữa các thông số gia công và đáp ứng. Những biểu đồ này cho thấy sự thay đổi của hai yếu tố.

Tóm lại, quá trình quy hoạch thực nghiệm bậc hai Box-Benken bốn yếu tố, năm điểm ở tâm, đã xác định được mối liên hệ của bốn thông số công nghệ và tối ưu để có được góc biến dạng lớn nhất của vật liệu tấm nhôm A 1050 H14 chiều dày 1,5 *mm* bằng bằng công nghệ TPIF.

Một số sản phẩm với vật liệu A1050 H14 được gia công bằng công nghệ TPIF (*hình 5.23*) như sau:

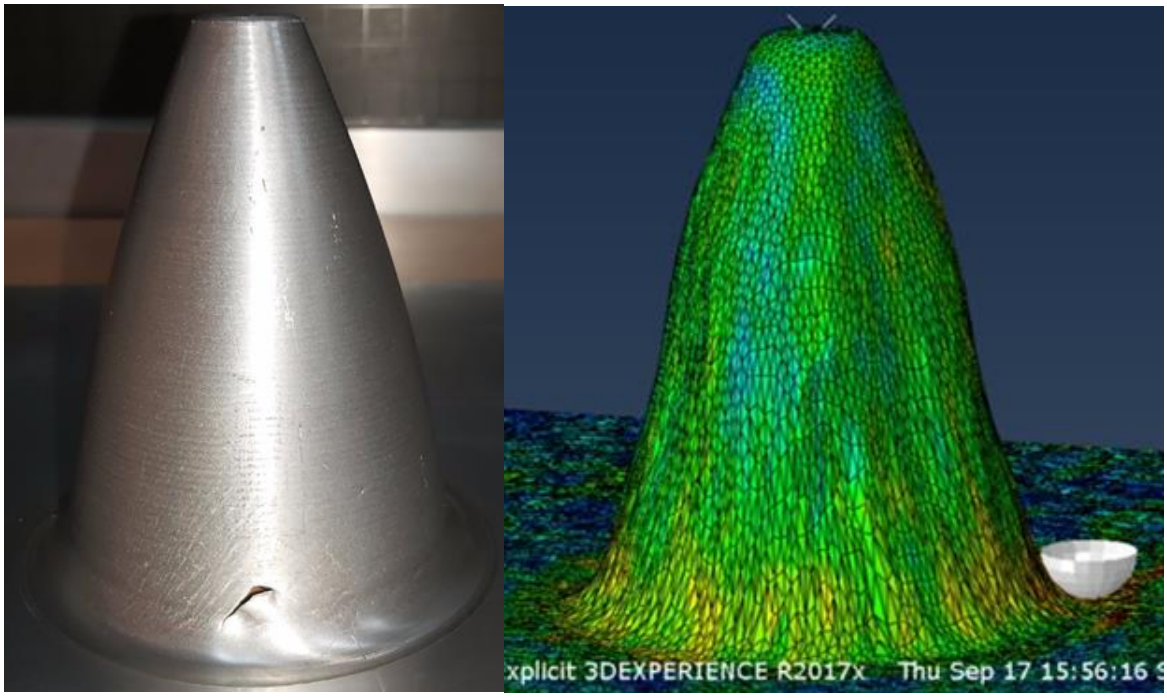


Hình 5. 23 Một số sản phẩm vật liệu A1050 H14 dày 1,5 *mm* gia công bằng công nghệ TPIF.

5.4 So sánh kết quả dự báo với kết quả thí nghiệm

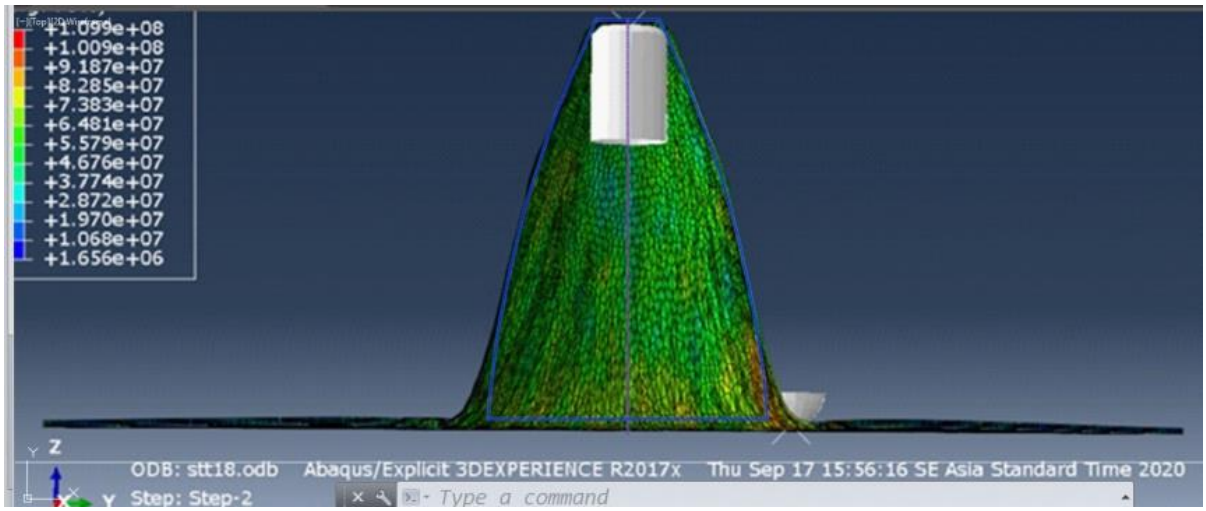
5.4.1 Biên dạng

Từ kết quả dự báo bằng phần mềm Abaqus và kết quả thực nghiệm như hình sau:



Hình 5. 24 Kết quả thực tế và mô hình mô phỏng trường hợp 1.

Hình cho thấy hình dạng mô phỏng giống hình dạng thực nghiệm và CAD.

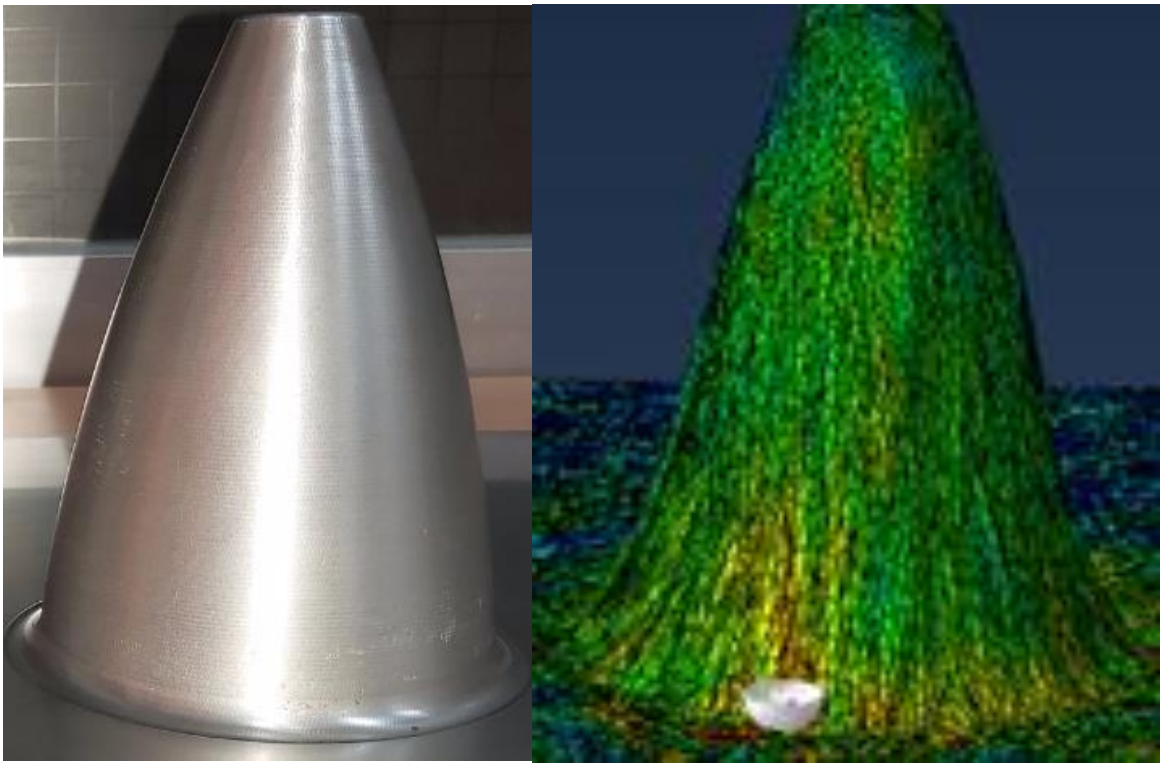


Hình 5. 25 *So sánh biên dạng CAD và biên dạng mô phỏng.*

Hình 5.25 cho thấy biên dạng CAD màu xanh trùng với biên dạng mô phỏng, phần đáy biên dạng lệch so với biên dạng CAD là do sự co trở lại (spring back).

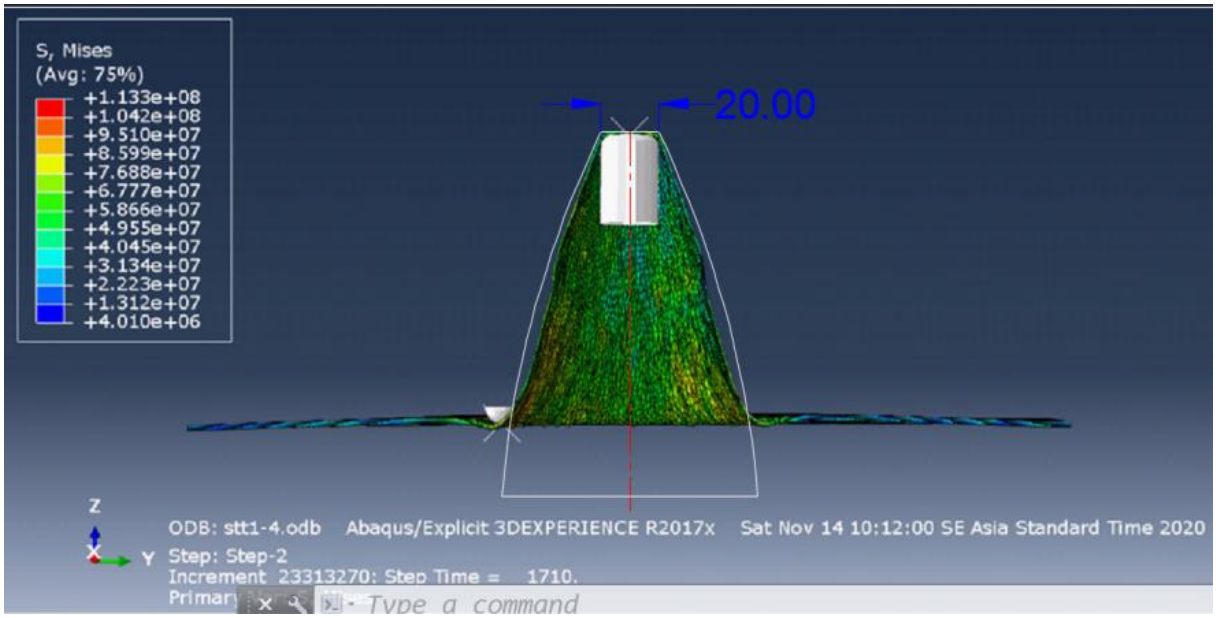
Trường hợp 2

Từ kết quả dự báo bằng phần mềm Abaqus và kết quả thực nghiệm như hình sau:



Hình 5. 26 Kết quả thực tế và mô phỏng trường hợp 2.

Hình 5.26 cho thấy hình dạng mô phỏng gần giống hình dạng thực nghiệm và CAD.



Hình 5. 27 So sánh biên dạng CAD và biên dạng mô phỏng trường hợp 2.

Hình 5.27 cho thấy biên dạng CAD màu trắng gần trùng với biên dạng mô phỏng, biên dạng lệch so với biên dạng CAD là do sự co trở lại (spring back).

5.4.2 Khả năng biến dạng (góc biến dạng)

Từ kết quả thực nghiệm và mô phỏng trên, chúng ta có kết quả tổng hợp như bảng 5.14 dưới đây:

Bảng 5. 14 Bảng so sánh kết quả dự đoán và thực nghiệm góc tạo hình nhôm tấm A 1050 H14, dày 1,5 *mm* bằng công nghệ TPIF.

Stt	Đường kính dụng cụ (*mm*)	Bước tiến theo trục *z* (*mm*)	Vận tốc dụng cụ V_{xy} (*mm/phút*)	Số vòng quay trục chính (*Vòng/phút*)	Góc tạo hình α (^{0}) mô phỏng	Góc tạo hình α (^{0}) thực nghiệm	Sai số %
1	18	0,8	900	1800	82	81	1,23
2	12	0,8	900	1050	81	82	1,2

Nhận xét:

– Mô hình côn nón theo bậc được mô phỏng thành công bằng phương pháp TPIF.

– Sai số nhỏ hơn 5% và mô hình dự đoán chấp nhận được. Kết quả dự đoán tiệm cận với kết quả thực nghiệm.

– Biên dạng sản phẩm mô phỏng giống biên dạng thiết kế.

– Chiều dày chi tiết mô phỏng tuân theo quy luật Sin.

Kết quả dự báo PTHH sẽ được so sánh với kết quả thí nghiệm, các chế độ tạo hình khác nhau. Kết quả mô phỏng phù hợp với kết quả thí nghiệm từ vị trí bắt đầu phát sinh rạn nứt và chiều cao đạt được của mô hình côn bậc. Điều đó cũng thể hiện rõ những ảnh hưởng của các tham số công nghệ với khả năng tạo hình. So sánh khả năng tạo hình đạt được từ biến dạng TPIF giữa mô phỏng PTHH và thí nghiệm thực cho kết quả trong *bảng 5.14*.

TÓM TẮT CHƯƠNG 5

Chương 5 trình bày nội dung chính của luận án thông qua các nghiên cứu thực nghiệm; thực hiện quy hoạch thực nghiệm; thiết lập phương trình hồi quy giữa góc tạo hình α với các thông số công nghệ; xem xét các đạo hàm riêng phần của các hàm mục tiêu góc tạo hình α theo các thông số công nghệ (vận tốc dụng cụ V_{xy} (*mm/phút*), bước tiến theo phương *z* của dụng cụ Δ*z* (*mm*), đường kính dụng cụ *D* (*mm*) và số vòng quay trục chính *n* (*vòng/phút*)) cho vật liệu nhôm A 1050 H14 dày 1,5 *mm*, luận án rút ra một số nhận xét sau:

- Phần trăm ảnh hưởng của các thông số Δ*z* 22,49%; V_{xy} 18,59%; *D* 26,77%; *n* 0,19%
- Thông số công nghệ hợp lý Δ*z*= 1,29 (*mm)* ; V_{xy}= 1500 (*mm/phút*) ; *D*=6 (*mm)* ; *n*=1800 (*Vòng/phút*)
- Khảo sát chất bôi trơn và phương pháp bôi trơn ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt sản phẩm bằng công nghệ TPIF, dầu hướng dương bôi trơn liên tục cho chất lượng bề mặt tốt vừa mang tính kinh tế vừa thân thiện môi trường.

- Sai số giữa thực nghiệm và mô phỏng nhỏ hơn 3% và mô hình dự đoán chấp nhận được. Kết quả dự đoán tiệm cận với kết quả thực nghiệm.
- Chiều dày chi tiết mô phỏng và thực nghiệm tuân theo quy luật Sin

Chương 6
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

6.1 Kết luận

Nghiên cứu đề tài tạo hình kim loại tấm bằng công nghệ biến dạng gia tăng đa điểm, luận án bước đầu đã đạt được một số kết quả về mặt thực nghiệm và mô phỏng như sau:

Về mặt thực nghiệm, luận án thiết kế và chế tạo thành công đồ gá TPIF. Đồ gá được thiết kế linh hoạt, dựa trên tiêu chí độ cứng vững, ổn định giúp cho quá trình tương tác tạo hình đạt kết quả chính xác khi gia công tấm nhôm A1050 H14. Đặc biệt, với công năng di chuyển cùng với đầu dụng cụ tạo hình đáp ứng cho việc gia công các chi tiết có biên dạng biến dạng từ hình mẫu đơn giản đến những hình mẫu phức tạp. Từ quá trình thực nghiệm, luận án đã xác lập được phương trình hồi quy, góp phần mô tả những ảnh hưởng của tham số công nghệ đến khả năng biến dạng của kim loại nhôm tấm A1050 H14 nói riêng và vật liệu tấm nói chung khi tạo hình bằng công nghệ biến dạng gia tăng đa điểm.

Với đồ gá TPIF, lần đầu tiên luận án áp dụng thành công công nghệ TPIF vào việc tạo hình mô hình côn nón cụt theo bậc. Với các góc tạo hình tuyến tính có giá trị gia tăng từ 65^o đến 85^o, mỗi bậc là một độ, luận án đã khảo sát thành công giá trị khả năng biến dạng lớn nhất của kim loại tấm nhôm A1050 H14 dày 1,5 *mm*.

Bước kế tiếp là, sau khi đã đạt được sản phẩm tạo hình côn nón cụt, luận án tiếp tục nghiên cứu độ chính xác hình học của chi tiết trên; nghiên cứu sự phân bố độ dày sau biến dạng và độ nhám bề mặt tạo hình tấm bằng TPIF. Mục đích của việc nghiên cứu này góp phần kiểm chứng những giá trị được xác định ban đầu, đồng thời đưa ra những giải pháp hợp lý cho việc tạo hình sản phẩm tiếp theo.

Rõ ràng, một trong những mấu chốt của việc nghiên cứu quy hoạch thực nghiệm chính là xác lập được phương trình hồi qui. Phương trình này thể hiện mối tương quan giữa góc tạo hình và các thông số công nghệ. Từ đó, chọn thông số hợp lí của quá trình tạo hình, nhằm đạt được khả năng biến dạng lớn nhất của tấm nhôm A1050 H14 dày 1,5 *mm*. Các giá trị của phương trình hồi quy tương ứng với giá trị của các thông số công nghệ phù hợp.

Với việc lựa chọn hợp chất bôi trơn từ hỗn hợp bột than chì, mỡ, nhớt cùng với cách bôi trơn trực tiếp hợp chất trên lên đầu dụng cụ tạo hình và tấm vật liệu tạo hình vừa giúp giảm ma sát trong quá trình biến dạng, vừa tăng khả năng biến dạng của vật liệu tấm, vừa đảm bảo cho chất lượng bề mặt của chi tiết nhẵn bóng.

Về mặt mô phỏng, luận án sử dụng phần mềm Abaqus dự đoán chính xác góc tạo hình của kim loại tấm nhôm A1050 H14 dày 1,5 *mm* bằng công nghệ TPIF. Với các thông số đầu vào như: thông số máy, vật liệu, quỹ đạo chạy dao..., phần mềm đã đưa lại kết quả với độ chính xác khá cao (nhỏ hơn 3%). So sánh với kết quả thực nghiệm, thêm một lần nữa những kết quả từ phầm mềm Abaqus đã khẳng định độ tin cậy của các thông số ảnh hưởng đến khả năng biến dạng gia tăng đa điểm. Kết quả mô phỏng góp phần vào việc cụ thể hóa cơ chế biến dạng; rút ngắn thời gian, tiết kiệm vật liệu, giảm chi phí thực nghiệm... Cùng với kết quả thực nghiệm, kết quả mô phỏng đã khẳng định việc áp dụng công nghệ số sẽ góp phần đem lại những thành tựu cho kỹ thuật tạo hình không khuôn, đồng thời mở ra những triển vọng mới cho ngành khoa học tạo hình công nghệ vật liệu.

Khả năng tạo hình của vật liệu bằng công nghệ gia tăng đa điểm cao hơn so với công nghệ gia tăng đơn điểm.

6.2 Kiến nghị

TPIF là một công nghệ mới, nhiều triển vọng và đang được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực. Ở Việt Nam, công nghệ trên đã được một số nhà khoa học quan tâm. Tuy nhiên, những thành tựu đạt được là chưa nhiều. Vì thế, rất cần nhiều nội dung

cần được nghiên cứu sâu. Với đề tài "nghiên cứu tạo hình kim loại tấm bằng công nghệ biến dạng gia tăng đa điểm", luận án không có tham vọng nghiên cứu tất cả công nghệ tạo hình TPIF cho vật liệu cứng khó biến dạng, mà chỉ tập trung bước đầu vào khả năng biến dạng cùa vật liệu nhôm tấm A1050 H14 dày 1,5 *mm*. Rất mong những nhà khoa học quan tâm đến công nghệ TPIF tiếp tục mở rộng giao diện nghiên cứu đối với các vật liệu tấm khó biến dạng. Trong đó có thể kể đến các hướng nghiên cứu như sau: thực hiện nghiên cứu với nhiều loại vật liệu tấm khác, nghiên cứu TPIF ở nhiệt độ cao; gia công những chi tiết phức tạp, cải thiện đồ gá phù hợp với chi tiết phức tạp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nguyen Thanh Nam, Phan Dinh Tuan, Vo Van Cuong, Le Khanh Dien, Nguyen Thien Binh, Le Trung Hieu, "Research on the forming angle of A1050 H14 aluminum material processd by using point incremental forming technology (SPIF)," *Science & Technology Development,* vol. 12, no. 16, 2009.

[2] Pham Van Trung, Vo Van Cuong, Le Khanh Dien, Vo Van Nang, Phan Dinh Tuan, Nguyen Thanh Nam, "Deformation ability of sinlgle point incremental forming for themo plastic composite material," *Tap Chi phat trien KH&CN*, vol. 14, no. K2, 2011.

[3] Nguyen Van Nang, Nguyen Thanh Nam, Le Khanh Dien, Nguyen Thien Binh, Nguyen Minh Tu , "Experimental study of the forming possibility of ISF processfor PVC plastic sheet," *Tap chi phat trien KH&CN* , vol. 15, no. K1, 2012.

[4] Phan Dinh Tuan, Nguyen Thien Binh, Le Khanh Dien, Pham Hoang Phuong , "Applying the ISF technology to produce the car part models," *Tạp chí phát triển KH&CN,* vol. 14, no. K2, 2011.

[5] L. V. Sy, " modeling of single point incremental forming process for metal and polymeric sheet," *University of Padua, Department of innovation in Mechanics and Management,* 2009.

[6] V.Franzen, L. Kwiatkowski, P.A.F. Martins, A.E. Tekkaya,, " Single point incremental forming of PVC," *Elsevier, journal,* 2008.

[7] C. Radu, *Effects of process parameters on the quality of parts processed by single point incremental forming.: International Journal of Modern Manufacturing Technologies,* vol. III, no. 2, p. 2067–3604 , 2011.

[8] M. Rauch, J.Y. Hascoet, J.C. Hamann, Y. Plennel, " A new approach for toolpath programming in Incremental Sheet Forming.: Computer-Aided Design," vol. 41, no. 12, pp. 877-885, 2009.

[9] G. Ambrogio, S. Bruschi, A. Ghiotti, L. Filice, " Formability of AZ31 magnesium alloy in warm incremental forming process," 2009.

[10] R. Crina, " New configuration of the SPIF process - a review," *Engineering Studies and Research,* vol. 16, no. 4, 2010.

[11] Ji, Y.H., Park, J.J., "Formability of magnesium AZ31 sheet in the incremental forming at warm temperature," *Materials Processing Technology*, no. 201 (1-3), pp. 354-358, 2008.

[12] Zhang, Q., Guo, H., Xiao, F., Gao, L., Bondarev, A.B., Weidong, H., "Influence of anisotropy of the magnesium alloy AZ31 sheets on warm negative incremental forming," *Materials Processing Technology ,* no. 209, p. 5514–5520, 2009.

[13] D. Adams, " Electrically Assisted Single Point Incremental Forming," *Department of Mechanical and Materials Engineering, Queen's University, Kingston, Canada.*

[14] Le Van Sy, Nguyen Thanh Nam, " Hot Incremental Forming Of Magnesium And Aluminum Alloy Sheets By Using Direct Heating System.: Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers," *Engineering Manufacture,* no. Part B, 2013.

[15] Fan, G., Gao, L., Hussain, G., Zhaoli, Wu, " Electric hot incremental forming: a novel technique," *Machine Tools and Manufacture,* no. 48 (15), pp. 1688-1692, 2008.

[16] J.R. Duflou, B. Callebaut, J. Verbert, H. De Baerdemaeker, "Improved SPIF performance through dynamic local heating," *Machine Tools & Manufacture,* 2008.

[17] L. Galdos, E. Sáenz de Argandoña, I. Ulacia, G. Arruebarrena, " Warm incremental forming of magnesium alloys using hot fluid as heating media," *Key Engineering Materials Vols.*, no. 504-506, 2012.

[18] Haibo Lu, Michael Kearney, Chenhao Wang, Sheng Liu, Paul A. Meehan, " Part accuracy improvement in two point incremental forming with a partial die using a model predictive control algorithm," *Accepted Manuscript.*

[19] Chenhao Wang, William J.T. Daniel, Haibo Lu, Sheng Liu, Paul A. Meehan, " FEM Investigation of Ductile Fracture Prediction in Two-Point Incremental Sheet Metal Forming process, ScienceDirect, Procedia Engineering.," *2017,* no. 207 , p. 836–841.

[20] J. Jeswiet, J. R. Duflou and A. Szekeres, "Forces in Single Point and Two Point Incremental Forming," *Advanced Materials Research ,* Vols. 6-8 , pp. 449-456, 2005.

[21] Isabel Bagudanch, Marc Sabater & Maria Luisa Garcia-Romeu, "Single Point versus Two Point Incremental Forming of thermoplastic materials;," *Advances in Materials and Processing Technologies,* no. 2374-068X (Print) , pp. 2374-0698.

[22] H. Meiera, V. Smukalab, O. Dewaldc and J. Zhangd, " Two Point Incremental Forming with two moving forming tools," *Key Engineering Materials,Trans Tech Publications, Switzerland.*, vol. 344, no. 1662-9795, pp. 599-605, 2007 .

[23] M.B. Silva and P.A.F. Martins, " Two Point Incremental Forming with partial die: theory and experimentation," *JMEPEG,* no. 22, p. 1018–1027, 2013.

[24] R. Perez-Santiago, A. Fiorentino, R. Marzi, and C. A. Rodriguez, "Advances in simulation of Two Point Incremental Forming," *AIP Conference Proceedings,* vol. 183 , p. 1353, 2011.

[25] A. Attanasio , E. Ceretti, L. Mazzoni, C. Giardini , " Use of TPIF or SPIF for Prototype Productions," *Conference on Material Forming, American Institute of Physics ,* pp. 978-0-7354-0414-4, 2007 .

[26] Hani Mostafanezhad, Hossein Ghorbani Menghari, Samad Esmaeili, EhsanMarzban Shirkharkolaee, "Optimization of Two-point incremental forming process of AA1050 through response surface methodology," *Measurement,* 2018.

[27] A. S. Jaber, "Finite Element Simulation Of The Two Point Multistage Incremental Sheet Metal Forming Process," *Engineering and Sustainable Development,* vol. 21, no. 5, September 2017.

[28] Seyed Ali Asghar Asghari, Asghar Shamsi Sarband and Mostafa Habibnia, "Optimization of multiple quality characteristics in two-point incremental forming of aluminum 1050 by grey relational analysis," *Institution of Mechanical Engineering Science*, vol. Proc IMechE Part C, 2017.

[29] Võ Tuyển, Nguyễn Tấn Hùng, Lê Khánh Điền, Nguyễn Thanh Nam, "Nghiên cứu mô phỏng lượng phục hồi theo phương hướng kính của vật liệu Titan khi gia công bằng công nghệ HOT SPIF," *Tạp chí Cơ khí Việt Nam,* no. 4, pp. 131-136, 2018.

[30] B. A. Phi, "Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến khả năng biến dạng vật liệu kim loại tấm trong gia công bằng phương pháp tạo hình gia tăng (spif) ở nhiệt độ cao," *Luận văn thạc sĩ ĐHSPKT HCM,* 2015.

[31] TS . Lê Văn Sỹ, ThS . Lê Khánh Điền, ThS . Nguyễn Tấn Hùng, KS . Lê Tiến Thắng, "Nghiên cứu dự đoán khuyết tật trong biến dạng cục bộ liên tục (SPIF) bằng phương pháp mô phỏng số," *Đại học Quốc gia Thành Phố Hồ Chí Minh,* 03 2015.

[32] Lê Văn Sỹ, Nguyễn Diệu Nương, "Mô hình hóa đặc tính cơ học của vật liệu polypropylene trong biến dạng gia tăng cục bộ," *Tạp chí ứng dụng toán học,* vol. IX, no. 1859 - 4492, pp. 1-14, 2011.

[33] Nguyễn Ngọc Kiên, Ứng dụng phương pháp trí tuệ nhân tạo và phân tích Taguchi để xác định chế độ cắt tối ưu khi gia công trên máy phay CNC, Luận án tiến sĩ, Hà Nội, 2014.

[34] PGS.TS.Nguyễn Hoài Sơn, ThS.Lê Thanh Phong, ThS.Mai Đức Đãi, Ứng dụng phương pháp phần tử hữu hạn trong tính toán kết cấu, NXB Đại học quốc gia TP.HCM, 2011.

[35] John T. Foster, Brief Explanation of Integration Schemes.

[36] Michael G. Katona, Robert Thompson, and Jim Smith, Efficiency study of implicit and explicit time integration operators for finite element applications, Civil Engineering Laboratory, Naval Construction Battalion Center, Port Huenerne, California, 1977.

[37] Những kiến thức cơ sở về biến dạng dẻo, Viện Cơ khí, ĐH Bách khoa Hà Nội.

[38] J. Lubliner, " Plasticity theory," Maxwell Macmillan International, 2009, pp. pp 103, 104,105.

[39] N. H. Lộc, Quy hoạch và phân tích thực nghiệm, Hồ Chí Minh: Nxb ĐHQG Tp.HCM, 2011.

[40] "Tài liệu thông số kỹ thuật máy ISF, DSCELAB," 2012.

[41] "JIS Aluminum Standard, © 2013".

[42] G. Hussain, H. R. Khan, L. Gao, and N. Hayat, "Guidelines for Tool-Size Selection for Single-Point Incremental Forming of an Aerospace Alloy,Materials and Manufacturing Processes,," *Taylor & Francis Group, LLC* , vol. 28, no. ISSN: 1042-6914 p, p. 324–329, 2013.

[43] Yanle Li & Xiaoxiao Chen & Zhaobing Liu & Jie Sun & Fangyi Li & Jianfeng Li & Guoqun Zhao , "A review on the recent development of incremental sheet-forming process," *Springer-Verlag London* , March 2017.

[44] Xiaoqiang LI, Kai HAN, Xu SONG, Haibo WANG, Dongsheng LI, Yanle LI, Qing LI, "Experimental and numerical investigation on surface quality for two-point incremental sheet forming with interpolator," *Chinese Journal of Aeronautics*, p. 13 Pages , 2020.

[45] M. Safari, "Two Point Incremental Forming of a Complicated Shape with Negative and Positive Dies," *Iranian Journal of Materials Forming*, Vols. Vol. 4,, no. No. 2, pp. pp 51-61, 2017.

[46] Lu Ou, Zhiguo An, Zhengyuan Gao, Shuqiang Zhou and Zhengxing Men, "Effects of Process Parameters on the Thickness Uniformity in Two-Point Incremental Forming (TPIF) with a Positive Die for an Irregular Stepped Part," in *Materials 2020, 13, 2634; doi:10.3390*, 2020.

[47] J. Diabb, C.A.Rodríguez, N.Mamidi, J.A.Sandoval, J.Taha-Tijerina, O. Martínez-Romero, A.Elías-Zúñiga, " Study of lubrication and wear in single point incremental sheet forming (SPIF) process using vegetable oil nanolubricants," *ScienceDirect*, 2017.

[48] Nuttaphong Sornsuwit and Sunthorn Sittisakuljaroen, "The Effect of Lubricants and Material Properties in Surface Roughness and Formability for Single Point Incremental Forming Process," *Trans Tech Publications, Switzerland,*, vol. 979, pp. 359-362, 2014.

[49] Kishore Jawale, José Ferreira Duarte, Ana Reis1 and M B Silva, ", Lubrication study for Single Point Incremental Forming of Copper," *IOP Publishing*, 2016.

[50] Meghshyam Prabhakar Shisode, Javad Hazrati, Tanmaya Mishra, Matthijn de Rooij, Ton van den Boogaard, ", Modeling Mixed Lubrication Friction for Sheet Metal Forming," *Elsevier*, 2020.

[51] L. K. Điền, " nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến khả năng tạo hình của một số vật liệu kim loại tấm khi gia công bằng phương pháp SPIF," 2018.

[52] T. T. Hỷ, "nghiên cứu mô phỏng quá trình tạo hình vật liệu bằng công nghệ HOT SPIF," 2017.

[53] A. Kacem, A. Krichen, P.Y. Manach, S. Thuillier, J.W. Yoon, "Failure prediction in the hole-flanging process of aluminium alloys," *Engineering Fracture Mechanics,* vol. 99, p. 251–265, 2013.

[54] Ashish Gohil and Bharat Modi, "Review of the effect of process parameters on performance measures in the incremental sheet forming process," *Journal of Engineering Manufacture,* vol. Proc IMechE Part B, p. 1–30, August 2020..

[55] R. Z. H. Z. Q. H. J. C. Hongyan Wang, "Novel strategies to reduce the springback for double-sided incremental forming," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* p. 973–979, 2018.

[56] A. K. Ibrahim, "A Comparative Study of Simulation Models on Incremental Forming Process by Using the Enhancement Tools," *Materials Science Forum*, vol. 957, pp. 93-102, , 2019.

[57] "Amir Ali Nourmohammadi, Majid Elyasi, Mohammad Javad Mirnia, Flexibility improvement in two-point incremental forming by implementing multi-point die," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* no. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03307, 2019.

[58] K. K. Mojtaba Esmailian, " Two-Point Incremental Forming of Metal–Polymer Three-Layer Sheets," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, vol. 45, p. 181–196, 2021.

[59] J. B. Muhammad Junaid Afzal, "Numerical Study to Promote the Residual Stresses Development during ISF Process with Improvement in Two Point Incremental Die Forming," *Key Engineering Materials,* vol. 926, no. 1662-9795, pp. 752-759, 2022.

[60] Diabb J, Rodríguez CA, Mamidi N, Sandoval JA, Taha-Tijerina J, Martínez-Romero O, Elías-Zúñiga A, "Study of lubrication and wear in single point incremental sheet forming (SPIF) process using vegetable oil nanolubricants.," *Wear,* p. 376–377:777–785, 2017.

[61] Li Y, Chen X, Liu Z, et al, "A review on the recent development of incremental sheet-forming process.," *Int J Adv Manuf Tech*, p. 2439–2462, 2017.

[62] Asghari SA, Shamsi Sarband A and Habibnia M, "Optimization of multiple quality characteristics in two-point incremental forming of aluminum 1050 by grey relational analysis," *J Mechanical Engineering Science*, p. :0954406217693658., 2017.

[63] Li Y, Zhai W, Wang Z, et al, "Investigation on the material flow and deformation behavior during ultrasonicassisted incremental forming of straight grooves," *J Mater Res Tecnol*, p. 433–454, 2020.

[64] Ebrahimzadeh P, Baseri H and Mirnia MJ, "Formability of aluminum 5083 friction stir welded blank in two-point incremental forming process," *Engineering Manufacture*, p. 267–280, 2018.

[65] Zhang H, Lu B, Chen J, et al., "Thickness control in a new flexible hybrid incremental sheet forming process," *J Engineering Manufacture*, p. 779–791, 2017.

[66] Zhai W, Li Y, Cheng Z, et al, "Investigation on the forming force and surface quality during ultrasonic-assisted incremental sheet forming process," *Int J Adv Manf Tech*, p. 1–7, 2020.

[67] Huan Zhang, Zixuan Zhang, Huaqing Ren, Jian Cao, Jun Chen, "Deformation mechanics and failure mode in stretch and shrink flanging by double-sided incremental forming," *International Journal of Mechanical Sciences*, p. 216–222, 2018.

[68] Chenhao Wang, William J. T. Daniel, Haibo Lu, Sheng Liu, Paul A. Meehan, "A comparative investigation of damage models for fracture prediction in two-point incremental forming," *Advanced Manufacturing Technology*, vol. 112, p. 3069–3081, 2021.

[69] Hu Zhu, Luteng Liu, Yibo Liu, and Jaeguan Kang, "Research on the selective multi-stage two point incremental forming based on the forming angle," *Journal of Mechanical Science and Technology,* vol. 35, no. (8, 2021.

[70] K. Ramkumar, N. Baskar, and at all, "Comparison of Multi Point Incremental Forming Tool with Single Point Incremental Forming Tool Using FLD, Fractography and 3D-Surface Roughness Analysis on Cr/Mn/Ni/Si Based Stainless Steel," *Springer,* vol. 13, p. 487–494, 2021.

[71] Xia Chen, Tong Wen, Jian Qin, Jin Hu, Meng Zhang, Zhi-sun Zhang, "Deformation Feature of Sheet Metals During Inclined Hole-Flanging by Two-Point Incremental Forming," *nternational Journal of Precision Engineering and Manufacturing,* no. 2234-7593, 2020.

[72] Muhammad Sajjad, Jithin Ambarayil Joy, and Dong Won Jung, "Finite Element Analysis of Incremental Sheet Forming for Metal Sheet," *Key Engineering Materials,* vol. 783, no. 1662-9795, pp. 148-153, 2018.

[73] S. R. Marabuto, D. Afonso, J.A.F. Ferreira, F.Q. Melo, M. Martins, R.J. Alves de Sousa, "Finding a best machine for SPIF operations- A brief discussion," *Key Engineering Materials,,* vol. 473, pp. 861-868, 2011.

[74] Crina Radu, Eugen Herghelegiu, Ion Cristea, Carol Schnakovszky, "Analysis of the surface quality of parts processed by single point incremental forming," *Engineering Studies and Research,* vol. 19, no. 3, 2013.

[75] Ghulam Hussain, Gao Lin, Nasir Hayat, "Improving Profile Accuracy in SPIF Process Through Statistical Optimization of Forming Parameters," *journal of Mechanical Science And Technology,* vol. 25, no. 1, p. 177~182, 2011.

[76] Liu F, Li X, Li Y, et al., "Modelling of the effects of process parameters on energy consumption for incremental sheet forming process.," *J Clean Prod,* p. 119456., 2020.

[77] AJ, Josue da Silva P and Alvares, "Investigation of tool wear in single point incremental sheet forming," *Engineering Manufacture,* p. 170–188, 2020.

[78] Basak S, Prasad KS, Mehto A, et al, "Parameter optimization and texture evolution in single point incremental sheet forming process," *Engineering Manufacture*, p. 126–139, 2020.

[79] Siddiqi MU, Corney JR, Sivaswamy G, et al., "Design and validation of a fixture for positive incremental sheet forming," *Engineering Manufacture*, p. 629–643, 2018;.

[80] Amini S, Gollo AH and Paktinat H, "An investigation of conventional and ultrasonic-assisted incremental forming of annealed AA1050 sheet," *Int J Adv Manuf Tech*, p. 1569–1578., 2017;.

[81] Lingam R, Prakash O, Belk JH, Reddy NV, "Automatic feature recognition and tool path strategies for enhancing accuracy in double sided incremental forming," *Int J Adv Manuf Technol*, p. 1639–1655, 2017.

[82] Lu H, Liu H, Wang C, "Review on strategies for geometric accuracy improvement in incremental sheet forming.," *Int J Adv Manuf Technol*, p. 102:3381–3417, 2019.

[83] Huaqing Ren, Fuhua Li, Newell Moser, Dohyun Leem, Tiemin Li, Kornel Ehmann, Jian Cao, "General contact force control algorithm in double-sided incremental forming; CIRP Annals," *Manufacturing Technology*, p. 381–384, 2018.

[84] Randy Cheng, Nicholas Wiley, Matt Short, Xun Liu, Alan Taub, "Applying ultrasonic vibration during single-point and two-point incremental sheet forming," *Procedia Manufacturing*, p. 186–192, 2019.

[85] K. Praveen, R. Lingam, N. Venkata Reddy, "Tool path design system to enhance accuracy during double sided incremental forming: An analytical model to predict compensations for small/large components," *Journal of Manufacturing Processes*, p. 510–523, 2020.

[86] Jawale K, Duarte JF, Reis A, Silva MB, "Microstructural investigation and lubrication study for single point incremental forming of copper," . *Int J Solids Struct*, p. 151:145–151, 2018.

[87] Wenxuan Peng, Hengan Ou, Adib Becker, "Double-Sided Incremental Forming: A Review," *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, p. Vol. 141 / 050802, 2019.

[88] J. Lubliner, PLASTICITY THEORY, Berkeley: University of California , 2006.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ

HỘI NGHỊ QUỐC TẾ

1. Ma Van Viet, Nguyen Truong Thinh, Le Van Sy, and Svetlin Antonov "Study on the formability by tpif technology for aluminum sheet at room temperature", E3S Web of Conferences 207, 05005 (2020) PEPM'2020, https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020705005
2. Ma Van Viet, Nguyen Truong Thinh, Le Van Sy, "Finite element simulation of the formability by tpif technology for aluminum sheet at room temperature", MMMS 2020, CHAPTER 3. Sustainable Machine Design: Metratronics, CAD/CAM/CAE, Maritime Engineering, Pages 192-198, November 12-15, 2020 Nha Trang, Vietnam.
3. Ma Van Viet, Nguyen Truong Thinh, Le Van Sy, "Influence of machining parameters on the TPIF formability for aluminum sheet at room temperature", Springer Cham, Pages 238-245, 27 March 2021, https://doi.org/10.1007/978-3-030-69610-8_33
4. Ma Van Viet, Nguyen Truong Thinh, Le Van Sy, "Effect of lubrication on deforming the aluminum sheet with two points incremental forming technology", Springer, Cham, Pages 975-982, 27 March 2021, https://doi.org/10.1007/978-3-030-69610-8_129,

BÀI BÁO QUỐC TẾ

1. Le Van Sy, Ma Van Viet, "Influence of Lubricants and Lubricating Methods on Surface Roughness in the Two-Point Incremental Sheet Forming Process", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, May 2022. https://doi.org/10.1007/s00170-022-09435-2

BÀI BÁO TRONG NƯỚC

1. Th S. Ma Văn Việt, PGS.TS. Lê Văn Sỹ, "Ảnh hưởng của nhiệt độ tạo hình tấm hợp kim Magie bằng phương pháp biến dạng gi tăng cụ bộ", trang 72-78, ISSN 0866-7056, Tạp chí cơ khí Việt Nam Số 4, 2018