

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

NGUYỄN TÀI HOÀI THANH

**NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP NÂNG CAO TUỔI BỀN DAO PHAY CẦU
KHI GIA CÔNG TRÊN MÁY CNC 5 TRỤC**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

HÀ NỘI – NĂM 2022

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

BỘ QUỐC PHÒNG

HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

NGUYỄN TÀI HOÀI THANH

**NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP NÂNG CAO TUỔI BỀN DAO PHAY CẦU
KHI GIA CÔNG TRÊN MÁY CNC 5 TRỤC**

Chuyên ngành: Kỹ thuật cơ khí
Mã số: 9 52 01 03

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:
1. TS. HỒ VIỆT HẢI

HÀ NỘI – NĂM 2022

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan các kết quả trình bày trong luận án là công trình nghiên cứu của tôi. Các số liệu, kết quả trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa được công bố trong bất kỳ công trình nào trước đây. Các kết quả sử dụng tham khảo đều được trích dẫn đầy đủ và theo đúng quy định.

Hà Nội, ngày tháng 11 năm 2022

Tác giả

Nguyễn Tài Hoài Thanh

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình học tập và nghiên cứu tại Học viện Kỹ thuật Quân sự, để hoàn thành luận án này, tác giả đã nhận được nhiều sự giúp đỡ và đóng góp quý báu của các thầy cô, các nhà khoa học, các nhà quản lý và các đồng nghiệp.

Đầu tiên, tác giả xin bày tỏ lòng cảm ơn sâu sắc tới thầy giáo hướng dẫn TS Hồ Việt Hải đã tận tình hướng dẫn và giúp đỡ tác giả trong quá trình học tập và nghiên cứu.

Tác giả xin chân thành cảm ơn Phòng Sau Đại học, bộ môn Chế tạo máy, khoa Cơ khí - Học viện Kỹ thuật Quân sự đã tạo điều kiện thuận lợi để tác giả hoàn thành nhiệm vụ.

Cuối cùng, tác giả xin bày tỏ lòng cảm ơn đến gia đình, bạn bè, các đồng nghiệp đã luôn động viên, giúp đỡ tác giả vượt qua khó khăn trong suốt quá trình làm luận án.

Xin trân trọng cảm ơn!

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC.....	iii
DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU	vii
DANH MỤC CÁC BẢNG.....	ix
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ	x
MỞ ĐẦU.....	1
Chương 1 TỔNG QUAN VỀ CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN TUỔI BỀN	
DAO PHAY CẦU KHI GIA CÔNG TRÊN MÁY CNC	5
1.1. Đặc điểm hình học và chế độ cắt của dao phay cầu.....	5
1.1.1. Đặc điểm hình học dao phay cầu.....	5
1.1.2. Định hướng dao phay cầu.....	7
1.1.3. Vận tốc cắt đối với dao phay cầu	8
1.1.3.1. Trường hợp trục dao vuông góc bề mặt gia công.....	9
1.1.3.2. Trường hợp trục dao nghiêng theo hướng tiến dao	9
1.1.3.3. Trường hợp trục dao nghiêng vuông góc hướng tiến dao	11
1.1.4. Chất lượng bề mặt gia công.....	12
1.1.5. Năng suất gia công	14
1.2. Tuổi bền dụng cụ và các yếu tố ảnh hưởng.....	16
1.2.1. Sự mòn dụng cụ.....	16
1.2.1.1. Các dạng mòn điển hình của dụng cụ.....	16
1.2.1.2. Cơ chế mòn và mô hình hóa	17
1.2.1.3. Quá trình phát triển của lượng mòn mặt sau	20
1.2.2. Tuổi bền dụng cụ.....	21
1.2.2.1. Định nghĩa về tuổi bền dụng cụ.....	21
1.2.2.2. Các chỉ tiêu xác định tuổi bền dụng cụ [26].....	22
1.2.2.3. Công thức Taylor xác định tuổi bền dụng cụ	23
1.2.3. Các yếu tố ảnh hưởng đến tuổi bền dụng cụ	24
1.2.3.1. Các thông số chế độ cắt chính	24
1.2.3.2. Định hướng chuyển động dao phay cầu	26
1.2.3.3. Góc nghiêng trục dao phay cầu	28

1.2.4. Các phương pháp xác định tuổi bền dụng cụ	29
1.2.4.1. Các phương pháp xác định trực tiếp	29
1.2.4.2. Các phương pháp xác định gián tiếp	31
1.3. Các nghiên cứu trong và ngoài nước	33
Chương 2 QUY HOẠCH THỰC NGHIỆM TAGUCHI VÀ PHƯƠNG PHÁP	
DỰ ĐOÁN BẰNG MẠNG NƠ-RON NHÂN TẠO	37
2.1. Quy hoạch thực nghiệm Taguchi và phân tích phương sai ANOVA	37
2.1.1. Quy hoạch thực nghiệm Taguchi	37
2.1.2. Phân tích phương sai ANOVA.....	39
2.1.2.1. Bậc tự do.....	40
2.1.2.2. Tổng bình phương sai lệch	40
2.1.2.3. Phương sai của một yếu tố.....	41
2.1.2.4. Mức độ ảnh hưởng của yếu tố	41
2.2. Các phương pháp dự đoán dùng trong lĩnh vực gia công cơ khí	42
2.2.1. Các loại mô hình dự đoán.....	42
2.2.2. Dự đoán tuổi bền dụng cụ	43
2.2.3. Dự đoán chất lượng bề mặt gia công.....	45
2.2.4. Dự đoán lực cắt khi phay.....	46
2.3. Mạng nơ-ron nhân tạo trong bài toán dự đoán.....	47
2.3.1. Mạng nơ-ron nhân tạo	47
2.3.2. Mạng nơ-ron truyền thẳng đa lớp.....	49
2.3.3. Huấn luyện mạng nơ-ron nhân tạo	50
2.3.4. Các thuật toán huấn luyện mạng nơ-ron nhân tạo.....	52
2.3.5. Ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo trong bài toán dự đoán	53
Chương 3 GIẢI PHÁP DỊCH ĐOẠN LƯỠI CẮT LÀM VIỆC NHẪM NÂNG	
CAO TUỔI BỀN DAO PHAY CẦU GIA CÔNG TRÊN MÁY PHAY	
CNC NHIỀU TRỤC.....	55
3.1. Đặc điểm gia công dao phay cầu trên máy CNC nhiều trục	55
3.1.1. Hệ thống máy CNC nhiều trục	55
3.1.2. Vùng tiếp xúc dao-phôi của dao phay cầu	56
3.1.3. Điều kiện cắt của mỗi đai cắt làm việc.....	59
3.1.4. Dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc của dao phay cầu	61

3.2. Dữ liệu vị trí dao trong chương trình gia công CNC	64
3.2.1. Quá trình tạo một chương trình gia công NC.....	64
3.2.2. Dữ liệu vị trí dao của phần mềm NX CAM	66
3.3. Đề xuất một giải pháp nâng cao tuổi bền dao phay cầu.....	67
3.4. Xây dựng phần mềm hỗ trợ giải pháp nâng cao tuổi bền dụng cụ	70
3.4.1. Ngôn ngữ lập trình cho phần mềm.....	70
3.4.2. Xây dựng các khối chức năng phần mềm	72
Chương 4 THỰC NGHIỆM KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA CHẾ ĐỘ CẮT	
VỚI CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ VÀ KIỂM CHỨNG GIẢI PHÁP	
NÂNG CAO TUỔI BỀN DỤNG CỤ	76
4.1. Khảo sát ảnh hưởng của chế độ cắt đối với các thông số công nghệ.....	76
4.1.1. Xây dựng mô hình thí nghiệm.....	76
4.1.1.1. Các thông số đầu vào.....	76
4.1.1.2. Các thông số đầu ra	77
4.1.1.3. Các thông số cố định	78
4.1.2. Các điều kiện thí nghiệm.....	78
4.1.2.1. Máy phay gia công	78
4.1.2.2. Mẫu gia công thí nghiệm	78
4.1.2.3. Dụng cụ cắt.....	79
4.1.2.4. Kính hiển vi điện tử đo lường mòn lưỡi cắt	80
4.1.2.5. Máy đo độ nhám	80
4.1.3. Xây dựng quy hoạch thực nghiệm	81
4.1.3.1. Xây dựng bảng thí nghiệm trực giao Taguchi.....	81
4.1.3.2. Các thí nghiệm bổ sung dữ liệu huấn luyện	83
4.1.4. Tiến hành thí nghiệm và thu thập dữ liệu.....	84
4.1.4.1. Chuẩn bị gia công thí nghiệm.....	84
4.1.4.2. Thực hiện gia công và giám sát lượng mòn lưỡi dao	87
4.1.4.3. Xác định giá trị tuổi bền dụng cụ qua lượng mòn mặt sau.....	88
4.1.4.4. Thu thập giá trị nhám bề mặt và năng suất gia công	90
4.2. Phân tích ảnh hưởng của chế độ cắt đến các thông số công nghệ	93
4.2.1. Ảnh hưởng của chế độ cắt đến tuổi bền	93
4.2.2. Ảnh hưởng chế độ cắt đến chất lượng bề mặt và năng suất gia công	98

4.2.3. Dự đoán tuổi bền dụng cụ sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo	101
4.3. Kiểm chứng giải pháp nâng cao tuổi bền dao phay cầu.....	106
4.3.1. Dịch đoạn lưỡi cắt làm việc khi gia công các mặt phẳng nghiêng.....	106
4.3.1.1. Lựa chọn mô hình gia công kiểm chứng	106
4.3.1.2. Xây dựng chương trình gia công kiểm chứng	108
4.3.1.3. Dự đoán chiều dài cắt lớn nhất bằng mạng nơ-ron nhân tạo.....	112
4.3.2. Dịch đoạn lưỡi cắt làm việc khi gia công bề mặt tự do.....	114
4.3.2.1. Xây dựng mô hình bề mặt gia công thử nghiệm	114
4.3.2.2. Chương trình gia công NC cho bề mặt tự do.....	115
4.3.2.3. Lựa chọn giải pháp tối ưu tuổi bền dụng cụ.....	116
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN	119
DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ.....	121
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	122
PHỤ LỤC.....	132
Phụ lục 1. Bảng thí nghiệm trực giao $L_{16}(4^4)$ và các thí nghiệm bổ sung	132
Phụ lục 2. Giá trị tính toán đường kính cắt hiệu dụng, tốc độ trục chính và tốc độ tiến dao.....	133
Phụ lục 3. Hình ảnh phát triển vết mòn trên lưỡi cắt ở các thí nghiệm	134
Phụ lục 4. Giá trị các yếu tố đầu ra trong các thí nghiệm.....	137
Phụ lục 5. Bảng kết quả dự đoán tuổi bền bằng phần mềm Visual Gene.....	138
Phụ lục 6. Bảng kết quả dự đoán tuổi bền bằng phần mềm CTMSoft	139
Phụ lục 7. Dự đoán đầu ra cho thông số thí nghiệm kiểm chứng.....	140

DANH MỤC CÁC CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU

1. Chữ viết tắt:

STT	Ký hiệu	Ý nghĩa
1	ACB	Active Cutting Belt - Dai cắt làm việc
2	ACES	Active Cutting-Edge Shift – Dịch đoạn lưỡi cắt làm việc
3	ACS	Active Cutting Segment – Đoạn lưỡi cắt làm việc
4	AE	Acoustic Emission – Phân tích tín hiệu phát xạ âm thanh
5	AI	Artificial Intelligent – Trí tuệ nhân tạo
6	ANN	Artificial Neural Network – Mạng nơ-ron nhân tạo
7	ANOVA	Analys Of Variation – Phân tích phương sai
8	BP	Back Propagation – Lan truyền ngược
9	BNNM	Backpropagation Neural Network Method – Phương pháp mạng nơ-ron lan truyền ngược
10	BUE	Built Up Edge – Hiện tượng lẹo dao
11	CBN	Cubic Boron Nitride – Nitrit-Bo lập phương
12	CC	Cutter Contact – Điểm tiếp xúc dao
13	CL	Cutter Location – Vị trí dao
14	CL-Data	Cutter Location Data – Dữ liệu vị trí dao
15	CLS	Cutter Location Source – Nguồn dữ liệu vị trí dao
16	CNC	Computer Numerical Control – Máy điều khiển số bằng máy tính
17	CWE	Cutter-Workpiece Engagement – Vùng tiếp xúc dao-phôi
18	DOE	Design Of Experiments – Thiết kế thí nghiệm
19	FD	Factorial Design – Thiết kế dạng thừa số
20	FF	Feed Forward – Truyền thẳng
21	FFBP	Feed Forward BackPropagation – Truyền thẳng lan truyền ngược
22	FFD	Full Factorial Design – Thiết kế dạng thừa số đầy đủ
23	ISO	International Organization for Standardization – Tổ chức Tiêu chuẩn hóa Quốc tế
24	MACL	Maximally Allowed Cutting Length – Chiều dài cắt cho phép lớn nhất
25	MAPE	Mean Absolute Percentage Error – Sai số phần trăm tuyệt đối trung bình
26	MRR	Material Removal Rate – Tốc độ bóc tách vật liệu
27	MSD	Mean Square Deviation – Trung bình bình phương
28	NC	Numerical Control – Điều khiển số

29	PR	Process Robustness – Xử lý bền vững
30	RB	Radial Basis – Cơ sở bán kính
31	RPD	Robust Parameter Design – Thiết kế tham số bền vững
32	RSM	Response Surface Methodology – Phương pháp bề mặt đáp ứng
33	S/N	Signal to Noise ratio – Tỷ số tín hiệu trên nhiễu
34	TCM	Tool condition monitoring – Giám sát tình trạng dụng cụ
35	TiAlN	Titanium Aluminium Nitride – Lớp phủ Titan nhôm Nitrít
36	TiN	Titanium Nitride – Lớp phủ Titan Nitrít

2. Ký hiệu:

Ký hiệu	Đơn vị	Ý nghĩa
$\vec{C}$		Chiều dịch dao ngang
D_{ef}	mm	Đường kính cắt hiệu dụng
$\vec{F}$		Chiều tiến dao gia công
R^2		Hệ số hồi quy (regression coefficient)
R_a	μm	Sai lệch profin trung bình
R_{ef}	mm	Bán kính cắt hiệu dụng
V_c	m/phút	Vận tốc cắt
V_{cef}	m/phút	Vận tốc cắt hiệu dụng
a_e	mm	Khoảng dịch dao ngang
a_p	mm	Chiều sâu cắt
f_z	mm/răng	Lượng tiến dao răng
θ_f	độ	Góc tiếp dẫn/góc dẫn (Lead angle)
θ_n	độ	Góc pháp dẫn/góc lật (Titl angle)
f	mm/phút	Tốc độ tiến dao
h	mm	Chiều cao gờ nổi
KT	mm	Lượng mòn mặt trước
R	mm	Bán kính dao phay cầu
VB	mm	Lượng mòn mặt sau
$VB1$	mm	Lượng mòn đồng dạng mặt sau
$VB2$	mm	Lượng mòn bất thường trên mặt sau
$VB3$	mm	Lượng mòn cục bộ mặt sau
VB_N	mm	Lượng mòn dạng vết khía mặt sau
n	vòng/phút	Tốc độ vòng quay trục chính
θ	độ	Góc nghiêng trục dao

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 4.1 Đặc tính kỹ thuật máy phay SPINNER U5-620	78
Bảng 4.2 Thành phần vật liệu thép 40Cr (GOST 4543-71)	79
Bảng 4.3 Cơ tính thép 40Cr, vật liệu mẫu gia công thí nghiệm	79
Bảng 4.4 Đặc tính kỹ thuật máy đo độ nhám SJ-301	81
Bảng 4.5 Giá trị các mức của các yếu tố đầu vào	82
Bảng 4.6 Chế độ cắt của các thí nghiệm theo bảng trực giao $L_{16}(4^4)$	82
Bảng 4.7 Chế độ cắt của các thí nghiệm bổ sung	83
Bảng 4.8 Giá trị tuổi bền dụng cụ được xác định từ các thí nghiệm	89
Bảng 4.9 Giá trị sai lệch trung bình R_a của các thí nghiệm	91
Bảng 4.10 Giá trị tốc độ bóc tách vật liệu của các thí nghiệm	92
Bảng 4.11 Đánh giá sai số dự đoán của phần mềm Visual Gene và CTMSOft	105
Bảng 4.12 Giá trị sai lệch trung bình tại mặt phẳng nghiêng khác nhau	112
Bảng 4.13 Chiều dài cắt cho phép lớn nhất MACL được dự đoán bằng ANN	113

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Hình 1.1 Thông số hình học của dao phay cầu, (a)- hình học tổng thể, (b)- hình chiếu lên mặt phẳng OXY	6
Hình 1.2 Định hướng dao phay cầu trên bề mặt gia công, (a)- nghiêng theo hướng tiến dao, (b)- nghiêng vuông góc hướng tiến dao.....	7
Hình 1.3 Quá trình gia công bề mặt tự do bằng dao phay cầu.....	8
Hình 1.4 Mô hình cắt trực giao của dao phay cầu	9
Hình 1.5 Mô hình cắt dao phay cầu nghiêng theo góc dẫn, (a)- nghiêng theo hướng tiến dao, (b)- nghiêng ngược hướng tiến dao	10
Hình 1.6 Mô hình cắt của dao phay cầu nghiêng theo góc pháp dẫn, (a)- cùng hướng dịch dao ngang, (b)- ngược hướng dịch dao ngang	11
Hình 1.7 Sự hình thành gờ nổi sau khi phay bằng dao phay cầu.....	12
Hình 1.8 Profin tính toán độ nhám bề mặt gia công bởi dao phay cầu.....	13
Hình 1.9 Tiết diện cắt dao phay trụ và dao phay cầu.....	14
Hình 1.10 Mòn mặt sau trên lưỡi dao phay trụ theo ISO 8688-2/1989, (a)-dao phay trụ, (b)- mặt cắt A-A, (c)- mặt cắt B-B	16
Hình 1.11 Các dạng mòn khác nhau trên lưỡi dao phay trụ, (a)- vỡ đồng dạng, (b)- vỡ không đồng dạng, (c)-mòn mặt trước, (d)-phá hủy	17
Hình 1.12 Các cơ chế mòn trong cắt gọt kim loại	18
Hình 1.13 Đường cong lượng mòn mặt sau VB theo chiều dài cắt.....	20
Hình 1.14 Sự phát triển lượng mòn ứng với vận tốc cắt khác nhau	21
Hình 1.15 Môi quan hệ vận tốc cắt và tuổi bền dụng cụ.....	24
Hình 1.16 Đồ thị ảnh hưởng của vận tốc cắt đến tuổi bền [43].	25
Hình 1.17 Đồ thị ảnh hưởng của chiều sâu cắt đến tuổi bền [82].....	26
Hình 1.18 Các hướng chuyển động dao phay cầu khi gia công [84]	27
Hình 1.19 Lượng mòn VB và nhám bề mặt thay đổi theo thời gian [21]	32
Hình 1.20 Đồ thị quan hệ lực cắt theo thời gian gia công [81].....	33
Hình 2.1 Cấu trúc của nơ-ron và liên kết giữa chúng	48
Hình 2.2 Mô hình một nơ-ron nhân tạo	48
Hình 2.3 Mô hình mạng truyền thẳng đa lớp	50
Hình 2.4 Phân chia bộ dữ liệu cho huấn luyện mạng nơ-ron.....	51
Hình 3.1 Tư thế dụng cụ trên máy CNC a) 3 Trục; b) 3+2 Trục; c) 5 Trục	55
Hình 3.2 Vùng tiếp xúc dao-phôi và đoạn lưỡi cắt làm việc trên dao phay cầu.....	56

Hình 3.3 Vị trí các điểm tiếp xúc khi cắt nghiêng trục dao phay cầu	57
Hình 3.4 Hình chiếu các đai cắt làm việc trên trục dao phay cầu	58
Hình 3.5 Xác định chiều dài chạy dao của mỗi đai cắt làm việc	60
Hình 3.6 Tỷ số chiều dài cắt chạy dao và chiều dài cắt cho phép lớn nhất	61
Hình 3.7 Phân bố đai cắt làm việc trên lưỡi cắt dao phay cầu	63
Hình 3.8 Quá trình xử lý thông tin cho gia công 5 trục [27]	65
Hình 3.9 Điểm CC và điểm CL đối với dao phay cầu	66
Hình 3.10 Sơ đồ khối các bước thực hiện giải pháp nâng cao tuổi bền	69
Hình 3.11 Các khối mô đun chức năng của phần mềm	71
Hình 3.12 Bố trí giao diện chính của phần mềm CTMSOft	72
Hình 3.13 Giao diện chức năng nhập và quản lý dữ liệu	72
Hình 3.14 Lựa chọn thông số quy hoạch thực nghiệm Taguchi	73
Hình 3.15 Giao diện chức năng quy hoạch thực nghiệm	73
Hình 4.1 Dao phay cầu sử dụng cho gia công thí nghiệm, (a)- dao dùng phay bán tinh, (b)- dao dùng phay tinh	79
Hình 4.2 Kính hiển vi đo lường mòn mặt sau, (a)- kính hiển vi đo trong-quá trình, (b)- kính hiển vi đo xác nhận	80
Hình 4.3 Bố trí các thiết bị đo lường trên máy phay CNC 5 trục	84
Hình 4.4 Vị trí thực hiện chụp ảnh mòn lưỡi cắt khi cắt thí nghiệm	85
Hình 4.5 Đường kính cắt hiệu dụng tại góc nghiêng trục dao khác nhau	86
Hình 4.6 Đường chạy dao đến vị trí chụp ảnh mòn lưỡi dao	87
Hình 4.7 Ảnh chụp lưỡi cắt xuất hiện vết mòn bất thường	88
Hình 4.8 Một số hình ảnh mòn điển hình trong các thí nghiệm	88
Hình 4.9 Bảng đáp ứng tỷ số S/N của tuổi bền dụng cụ trên Minitab®	93
Hình 4.10 Đồ thị ảnh hưởng chính cho tỷ số S/N của tuổi bền trên Minitab®	94
Hình 4.11 Phân tích Taguchi với tuổi bền bằng phần mềm CTMSOft	95
Hình 4.12 Phân tích phương sai ANOVA bằng phần mềm Minitab®	96
Hình 4.13 Phân tích phương sai ANOVA bằng phần mềm CTMSOft	97
Hình 4.14 Bảng đáp ứng tỷ số S/N của giá trị nhám bề mặt	99
Hình 4.15 Bảng đáp ứng tỷ số S/N của tốc độ bóc tách vật liệu	100
Hình 4.16 Giao diện mạng nơ-ron của phần mềm Visual Gene Developer	102
Hình 4.17 Cửa sổ giám sát tiến trình huấn luyện phần mềm Visual Gene	103
Hình 4.18 Cửa sổ giám sát tiến trình huấn luyện phần mềm CTMSOft	104
Hình 4.19 Các mô hình gia công trên mặt nghiêng khác nhau	106

Hình 4.20 Hình dạng chi tiết dùng cho gia công kiểm chứng	107
Hình 4.21 Phân bố đai cắt làm việc ACB trong thí nghiệm kiểm chứng.....	109
Hình 4.22 Đường chạy dao gia công khi góc nghiêng dao không đổi.....	110
Hình 4.23 Đường chạy dao dùng phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc	110
Hình 4.24 Vết mòn trên lưỡi cắt trong hai mô hình thí nghiệm kiểm chứng.....	111
Hình 4.25 Chức năng điều chỉnh trục dao phay trên phần mềm NX.....	114
Hình 4.26 Mô hình bề mặt tự do tạo bằng phần mềm NX.....	115
Hình 4.27 Các đường chạy dao và dữ liệu vị trí dao CL-Data	115
Hình 4.28 Thí nghiệm gia công bề mặt tự do, (a) góc nghiêng cố định, (b) góc nghiêng thay đổi tuyến tính.....	116

MỞ ĐẦU

1. Tính cấp thiết của đề tài

Ngày nay việc sử dụng các trung tâm gia công phay CNC trong gia công cắt gọt trở nên phổ biến do khả năng công nghệ của máy, đặc biệt các máy CNC nhiều trục (4, 5 trục). Ứng dụng công nghệ CAD/CAM trong việc tạo ra các chương trình gia công trên máy CNC đã không còn trở ngại và điều khiển chạy dao khi gia công các bề mặt phức tạp đã trở nên dễ dàng hơn. Khi gia công tinh những chi tiết có bề mặt phức tạp trên máy CNC nhiều trục thì dao phay cầu thường hay được sử dụng, nhưng do đặc điểm lưỡi cắt có dạng cung tròn nên vùng tiếp xúc trực tiếp giữa lưỡi cắt và bề mặt phôi gia công chỉ xảy ra tại một phần cung cắt hữu dụng, nên mòn dao chỉ xảy ra cục bộ tại vùng tiếp xúc. Có một giải pháp dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc trên dao phay cầu đã được nghiên cứu cho kết quả cải thiện được tuổi bền đáng kể [56]. Thực chất của giải pháp này là sử dụng các đoạn lưỡi cắt khác nhau để cắt các phần bề mặt của phôi và chủ động dịch chuyển sang đoạn lưỡi cắt khác khi đạt chiều dài cắt cho phép lớn nhất. Tuy nhiên, việc triển khai ứng dụng giải pháp này trong thực tế sản xuất sẽ gặp nhiều khó khăn: cần phân tích được chương trình gia công NC để tính chiều dài cắt của mỗi đoạn lưỡi cắt, dự đoán được chiều dài cắt cho phép lớn nhất của mỗi đoạn lưỡi cắt ứng với chế độ cắt khác nhau, xây dựng chương trình gia công NC mới có khả năng dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc nhằm tăng tuổi bền.

Ngày nay với sự phát triển của khoa học máy tính cho phép ứng dụng trí tuệ nhân tạo giúp cho thực hiện những bài toán dự đoán chính xác hơn, cùng với sự ra đời các phần mềm CAD/CAM hiện đại giúp cho việc nghiên cứu về giải pháp nâng cao tuổi bền dao phay cầu bằng phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc có tính khả thi cao. Từ những phân tích trên làm cơ sở cho tác giả chọn đề tài “*Nghiên cứu giải pháp nâng cao tuổi bền của dao phay cầu khi gia công trên máy phay CNC 5 trục*” là rất cần thiết và phù hợp với yêu cầu thực tiễn sản xuất tại Việt Nam.

2. Mục đích của đề tài

- Lý thuyết và thực nghiệm chứng minh tính khả thi của phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc đối với dao phay cầu.
- Nghiên cứu các công cụ để thực hiện giải pháp nâng cao tuổi bền trong thực tế gia công bằng phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc.

3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu:

- Quá trình gia công bằng dao phay cầu trên máy CNC 5 trục;
- Các công cụ dùng để quy hoạch thực nghiệm, dự đoán và phân tích chương trình gia công NC.

Phạm vi nghiên cứu:

- Gia công phay bằng dao phay cầu trên máy CNC 5 trục;
- Vật liệu gia công là thép hợp kim sau nhiệt luyện.

4. Phương pháp nghiên cứu

Xuất phát từ mục tiêu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu, xác định phương pháp nghiên cứu của luận án là sự kết hợp hai phương pháp sau đây:

Nghiên cứu lý thuyết: Những vấn đề liên quan đến gia công bằng dao phay cầu, mòn và tuổi bền dụng cụ, các phương pháp dự đoán và tối ưu trong gia công cơ khí. Đề xuất một giải pháp nâng cao tuổi bền cho dao phay cầu bằng phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc.

Nghiên cứu thực nghiệm: Sử dụng phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi và phân tích phương sai ANOVA để tìm mức độ ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ đến tuổi bền dụng cụ; tạo mô hình dự đoán bằng mạng nơ-ron nhân tạo; thí nghiệm chứng minh tính đúng đắn của giải pháp được đề ra.

5. Ý nghĩa khoa học và tính thực tiễn của đề tài

Ý nghĩa khoa học: bổ sung một giải pháp nâng cao tuổi bền của dao phay cầu bằng phương pháp “dịch đoạn lưỡi cắt làm việc” cùng với ứng dụng trí tuệ nhân tạo làm phong phú thêm cơ sở lý thuyết trong các bài toán dự đoán. Có

thể lập trình tạo ra phần mềm ứng dụng máy tính hỗ trợ tích cực cho quá trình gia công cơ khí tại Việt Nam.

Ý nghĩa thực tiễn: Đề tài có ý nghĩa thực tiễn cao khi tạo ra một giải pháp nâng cao tuổi bền bằng phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc trong khi vẫn đảm bảo chất lượng bề mặt và năng suất gia công, không cần thay đổi trang bị công nghệ trong điều kiện hiện tại. Kết quả nghiên cứu có ý nghĩa thiết thực trong sản xuất, nghiên cứu và đào tạo tại nhà trường.

6. Những kết quả đạt được và điểm mới của đề tài

Đề tài nghiên cứu đã hoàn thành và có đóng góp một số kết quả về lý thuyết và thực tiễn như sau:

Bằng nghiên cứu lý thuyết: Nghiên cứu các yếu tố công nghệ ảnh hưởng và các phương pháp nâng cao tuổi bền dụng cụ. Từ đặc điểm gia công của dao phay cầu đã đề xuất một giải pháp nâng cao tuổi bền có tính khả thi là phương pháp “dịch đoạn lưỡi cắt làm việc”.

Bằng thực nghiệm: Đã xây dựng được mối quan hệ thực nghiệm giữa các thông số chế độ cắt (vận tốc cắt, lượng tiến dao, chiều sâu cắt và góc nghiêng trục dao) đến tuổi bền dụng cụ bằng phương pháp Taguchi và phân tích phương sai ANOVA. Xây dựng được bộ dự đoán bằng mạng nơ-ron nhân tạo đạt được độ chính xác dự đoán trong phạm vi cho phép. Thực hiện các thí nghiệm gia công kiểm chứng đã chứng minh giải pháp dịch chuyển đoạn lưỡi cắt có tính khả thi trong thực tiễn.

Đã xây dựng được phần mềm tích hợp các chức năng: quy hoạch thực nghiệm, dự đoán bằng mạng nơ-ron nhân tạo và phân tích chương trình gia công NC. Phần mềm đã được kiểm chứng đảm bảo độ chính xác tính toán theo yêu cầu mở ra hướng ứng dụng mới trong lĩnh vực gia công cơ khí.

7. Cấu trúc của luận án

Cấu trúc luận án bao gồm: phần mở đầu, bốn chương nội dung, kết luận kiến nghị, tài liệu tham khảo và phụ lục.

Phần mở đầu: Trình bày nội dung về: tính cấp thiết của đề tài, mục đích nghiên cứu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu, ý nghĩa khoa học, kết quả đạt được và điểm mới của đề tài nghiên cứu, cấu trúc của luận án.

Chương 1: Giới thiệu về đặc điểm chế độ cắt của dao phay cầu và các yếu tố ảnh hưởng đến tuổi bền khi gia công trên máy CNC. Các nghiên cứu trong và ngoài nước về vấn đề liên quan từ đó đề ra hướng nghiên cứu của luận án.

Chương 2: Quy hoạch thực nghiệm Taguchi và các phương pháp dự đoán trong lĩnh vực gia công cơ khí, ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo. Kết quả nghiên cứu của chương làm cơ sở để tối ưu hóa thực nghiệm và tạo công cụ dự đoán cho phương pháp dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc được nghiên cứu sau này.

Chương 3: Giải pháp dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc nhằm nâng cao tuổi bền dao phay cầu trên máy phay CNC 5 trục. Nội dung chương đã phân tích đặc điểm gia công của dao phay cầu, từ đó đề xuất giải pháp nâng cao tuổi bền dao phay cầu dựa trên nguyên lý dịch đoạn lưỡi cắt làm việc. Xây dựng phần mềm hỗ trợ cho giải pháp nâng cao tuổi bền được đề xuất.

Chương 4: Thực nghiệm khảo sát ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt đối với các thông số công nghệ và kiểm chứng giải pháp nâng cao tuổi bền dụng cụ. Xây dựng mối quan hệ thực nghiệm, đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố chế độ cắt đến tuổi bền dụng cụ. Tiến hành các thí nghiệm gia công để đánh giá tính hiệu quả của giải pháp dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc nhằm nâng cao tuổi bền dao phay cầu.

Kết luận chung và hướng phát triển tiếp theo của đề tài.

Chương 1

TỔNG QUAN VỀ CÁC YẾU TỐ ẢNH HƯỞNG ĐẾN TUỔI BỀN DAO PHAY CẦU KHÍ GIA CÔNG TRÊN MÁY CNC

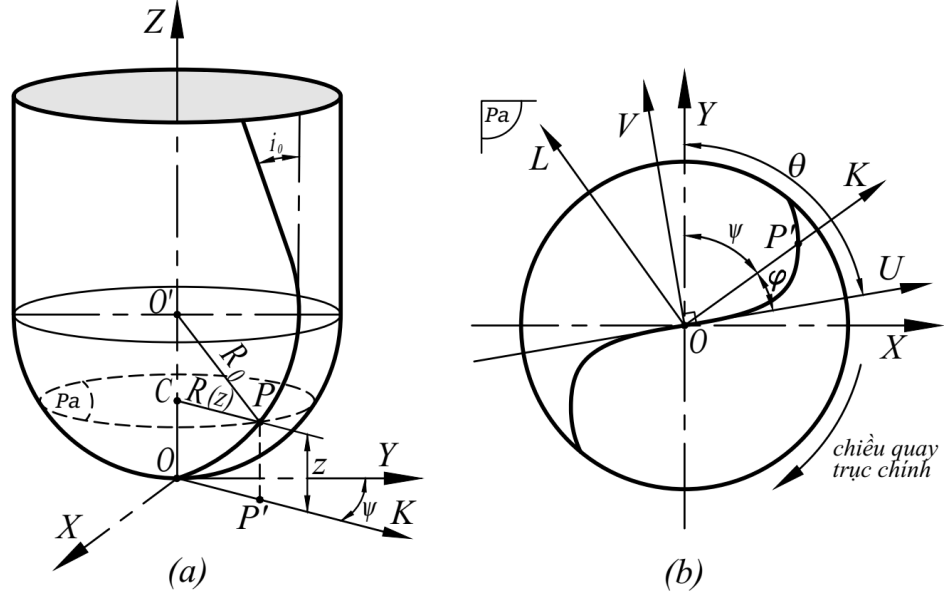
1.1. Đặc điểm hình học và chế độ cắt của dao phay cầu

1.1.1. Đặc điểm hình học dao phay cầu

Trong ngành chế tạo máy nói chung, ngành cơ khí chính xác và ngành công nghiệp khuôn mẫu nói riêng thì có rất nhiều chi tiết có bề mặt phức tạp với vật liệu khó gia công như thép hợp kim có độ bền cao, thép chịu nhiệt, thép không gỉ, thép đã qua nhiệt luyện... Khi thực hiện gia công lần cuối những chi tiết trên thường sử dụng một số phương pháp như gia công bằng điện hoá, bằng siêu âm, bằng tia lửa điện hoặc phổ biến nhất là gia công phay trên máy CNC.

Trong hoạt động gia công tinh thì dao phay cầu (nhất là những loại lưỡi cắt được phủ các vật liệu CBN, TiAlN, TiN...) được dùng rộng rãi, cho phép gia công các bề mặt phức tạp đạt năng suất gia công cao hơn so với các phương pháp gia công phi truyền thống. Dao phay cầu có hai dạng phổ biến: loại liền khối và loại ghép mảnh. Đối với loại dao ghép mảnh, thông thường sử dụng cho dao có đường kính lớn, có mảnh ghép lưỡi cắt bằng hợp kim có độ cứng cao nên thường được sử dụng trong gia công thô và bán tinh. Dao phay cầu sử dụng trong gia công tinh thì đa phần có đường kính nhỏ (≤ 10 mm) và thường được chế tạo dạng liền khối. Vì vậy để phù hợp với nội dung nghiên cứu về gia công tinh trên máy phay CNC nhiều trục, khi khảo sát đặc điểm hình học của dao phay cầu chỉ cần xét loại dao được chế tạo liền khối, đường kính phần đầu cầu đúng bằng đường kính thân dao và góc xoắn lưỡi cắt là không đổi.

Thông số hình học dao phay cầu thể hiện như trên hình 1.1, hệ tọa độ $Oxyz$ có gốc O ngay tại đỉnh dao và trục Oz hướng lên theo đường trục dao, từ đó có thể dễ dàng biểu diễn các thông số hình học bằng các biểu thức toán học. Hình bao của dao phay cầu có thể được coi là tạo thành bởi bề mặt hình trụ và một bề mặt chòm cầu có cùng bán kính R_0 . Lưỡi cắt được coi là dạng xoắn ốc với góc xoắn không đổi được biểu thị là i_0 [52] [58].



Hình 1.1 Thông số hình học của dao phay cầu, (a)- hình học tổng thể, (b)- hình chiếu lên mặt phẳng OXY

Xét một điểm P nằm trên lưỡi cắt thứ j có cao độ z so với gốc O theo phương thẳng đứng, công thức tính bán kính cắt hiệu dụng $R(z)$ trên mặt phẳng Pa (mặt phẳng đi qua điểm P và song song mặt phẳng OXY) như (1.1):

$$\begin{cases} R(z) = \sqrt{R_0^2 - (R_0 - z)^2} ; & \text{nếu } z \leq R_0 \\ R(z) = R_0 & ; \text{nếu } z > R_0 \end{cases} \quad (1.1)$$

Công thức trên cho thấy tại phần chỏm cầu, bán kính cắt hiệu dụng $R(z)$ thay đổi từ giá trị 0 cho đến giá trị R_0 . Tại đỉnh dao $z = 0$ thì $R(z) = 0$ vì vậy quá trình cắt không xảy ra tại đỉnh dao cầu.

Xét trên mặt phẳng Pa , nếu dao phay cầu quay đi một góc là θ thì điểm P được xác định theo góc $\psi(\theta, z)$ so với trục Oy theo công thức (1.2):

$$\psi(\theta, z) = \theta + (j - 1) \frac{2\pi}{N_t} - \varphi(z) \quad (1.2)$$

trong đó: N_t là số lượng lưỡi cắt của dao; $\varphi(z)$ là góc xoắn lưỡi cắt tại điểm P so với đỉnh dao (hình 1.1). Góc xoắn $\varphi(z)$ tính theo công thức (1.3):

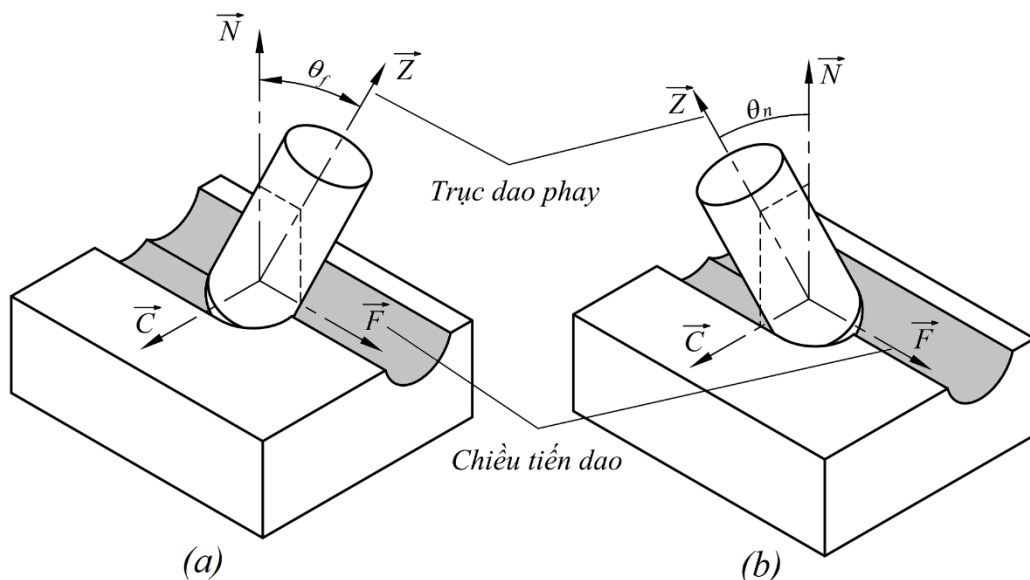
$$\varphi(z) = \frac{z \tan i_0}{R_0} = \frac{z \tan i(z)}{R(z)} \quad (1.3)$$

Như vậy là góc xoắn cục bộ $i(z)$ được viết theo công thức (1.4):

$$\tan i(z) = \frac{R(z)}{R_0} \tan i_0 \quad (1.4)$$

1.1.2. Định hướng dao phay cầu

Do đặc điểm cấu tạo đặc biệt của dao phay cầu, sự định hướng trục dao (tool orientation) ảnh hưởng lớn đến giá trị vận tốc cắt V_c của dao. Trong khi đó, vận tốc cắt lại là thông số có ảnh hưởng rất quan trọng không chỉ đến chất lượng bề mặt mà còn đến quá trình mòn và tuổi bền dụng cụ. Theo hình 1.2, góc θ tạo bởi trục dao (véc tơ $\vec{Z}$) và pháp tuyến bề mặt chi tiết gia công (véc tơ $\vec{N}$) có thể phân tích thành hai thành phần: a) dọc theo hướng tiến dao (véc tơ $\vec{F}$) gọi là góc tiếp dẫn θ_f (hay là góc dẫn – Lead angle) và b) vuông góc với hướng tiến dao (véc tơ $\vec{C}$) gọi là góc pháp dẫn θ_n (hay là góc lật – Tilt angle) [62].



Hình 1.2 Định hướng dao phay cầu trên bề mặt gia công, (a)- nghiêng theo hướng tiến dao, (b)- nghiêng vuông góc hướng tiến dao

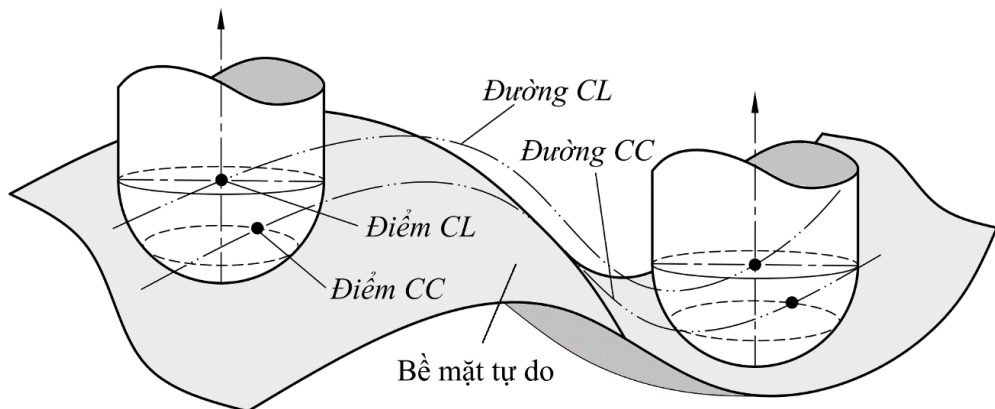
Sự thay đổi giá trị của góc tiếp dẫn θ_f và góc pháp dẫn θ_n sẽ có các trường hợp định hướng đặc biệt như sau:

- Trục dao vuông góc bề mặt gia công: $\theta_f = 0$ và $\theta_n = 0$
- Trục dao nghiêng theo hướng tiến dao: $\theta_f \neq 0$ và $\theta_n = 0$
- Trục dao nghiêng vuông góc hướng tiến dao: $\theta_f = 0$ và $\theta_n \neq 0$
- Trục dao nghiêng hỗn hợp: $\theta_f \neq 0$ và $\theta_n \neq 0$

Trong thực tế, trường hợp trục dao nghiêng hỗn hợp là phổ biến vì bề mặt chi tiết gia công bằng dao phay cầu phần lớn có bề mặt tự do phức tạp.

1.1.3. Vận tốc cắt đối với dao phay cầu

Trong các thông số chế độ cắt thì vận tốc cắt là thông số chịu ảnh hưởng bởi đặc trưng hình học của dao phay cầu nhiều nhất nên được ưu tiên phân tích. Khi gia công, thường ít khi phần lưỡi cắt tương ứng với đường kính lớn nhất của dao tham gia vào quá trình cắt gọt mà chỉ có một đoạn ngắn của lưỡi cắt tham gia cắt tại bán kính cắt hiệu dụng R_{ef} (effective cutting radius). Khi vị trí tương đối của lưỡi dao cắt với vùng tiếp xúc trên chi tiết gia công thay đổi liên tục, thì vật liệu bị cắt bỏ với những vận tốc cắt khác nhau, hơn nữa, khi chi tiết gia công được cắt bởi đoạn lưỡi cắt gần với đỉnh chỏm cầu, vận tốc cắt có giá trị gần bằng “không” dẫn đến mòn dao và giảm chất lượng bề mặt. Do đó, việc xây dựng mô hình tính vận tốc cắt của dao phay cầu là rất cần thiết cho dự đoán khả năng gia công và lựa chọn chế độ cắt hợp lý.



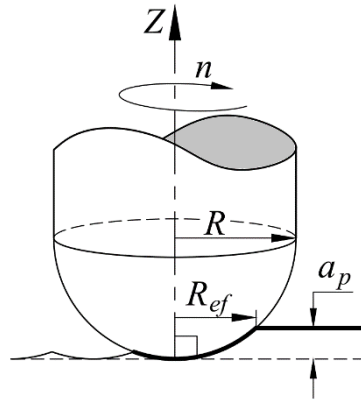
Hình 1.3 Quá trình gia công bề mặt tự do bằng dao phay cầu

Khi gia công phay trên máy CNC, đường chạy dao (Toolpath) được tạo ra bởi phần mềm CAM là quỹ đạo các điểm tại tâm hình cầu của dao cầu và được gọi là đường vị trí dao CL (CL - Cutter Location), còn đường tiếp xúc dao CC (CC - Cutter Contact) là quỹ đạo các điểm tiếp xúc CC giữa lưỡi dao cầu và bề mặt chi tiết gia công. Vì lưỡi cắt dao phay cầu phân bố trên bề mặt hình chỏm cầu nên đường xúc dao cách xa so với đường vị trí dao một khoảng đúng bằng bán kính dao. Để đơn giản hóa, có thể coi như lăn một quả bóng trên bề mặt tự do theo đường CL, như trên hình 1.3 cho thấy vị trí điểm CC thay đổi liên tục nên vận tốc cắt tức thời cũng thay đổi liên tục khi gia công bằng dao phay cầu.

Việc tính toán vận tốc cắt của dao phay cầu khi gia công bề mặt tự do không đơn giản như đối với dao phay trụ vì vị trí điểm cắt trên lưỡi cắt cong của dao luôn thay đổi dọc theo bề mặt gia công. Do đó, tùy thuộc vào từng trường hợp định hướng dao (theo mục 1.1.2) mà xác định đường kính cắt hiệu dụng để tính toán vận tốc cắt cho dao phay cầu.

1.1.3.1. Trường hợp trục dao vuông góc bề mặt gia công

Trường hợp trục dao vuông góc với bề mặt gia công, khi dao cắt chạy theo những đường song song sẽ tạo ra các đường gờ (phần vật liệu không bị cắt) trên bề mặt gia công. Lúc này đỉnh dao tham gia vào quá trình cắt và vận tốc cắt lớn nhất được xác định bằng bán kính cắt hiệu dụng R_{ef} (hình 1.4).



Hình 1.4 Mô hình cắt trục giao của dao phay cầu

Dao phay cầu có bán kính phần cầu là R thì bán kính cắt hiệu dụng R_{ef} phụ thuộc vào chiều sâu cắt a_p (theo công thức (1.1)). Khi gia công tốc độ trục chính không đổi thì vận tốc cắt hiệu dụng (effective cutting speed) V_{cef} phụ thuộc bán kính cắt hiệu dụng R_{ef} và được tính theo công thức (1.5) như sau:

$$V_{cef} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R_{ef}}{1000} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot \sqrt{R \cdot a_p - a_p^2}}{1000} \quad (m/phút) \quad (1.5)$$

trong đó: a_p là chiều sâu cắt,

n là tốc độ quay trục chính.

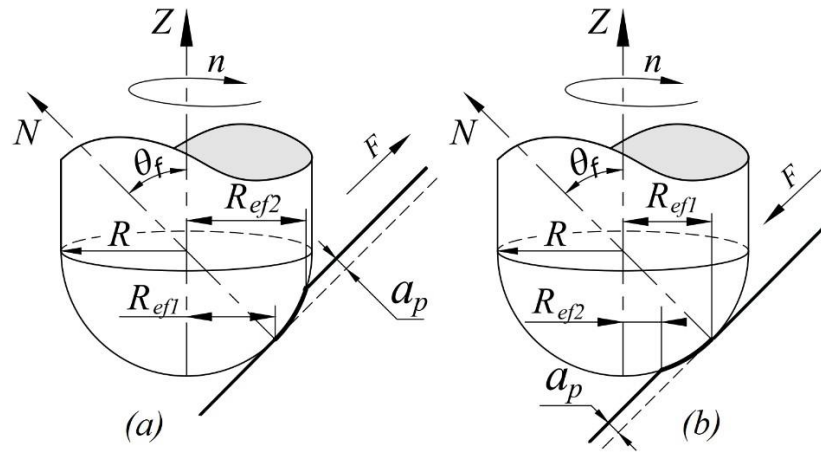
1.1.3.2. Trường hợp trục dao nghiêng theo hướng tiến dao

Khi trục dao nghiêng theo hướng tiến dao (hình 1.5-a) thì phần tiếp xúc dao với bề mặt gia công xa đỉnh dao, còn khi trục dao nghiêng ngược hướng

tiến dao (hình 1.5-b) thì phần đó gần đỉnh dao. Lưỡi cắt tiếp xúc với phôi gia công chỉ giới hạn trên đoạn lưỡi cắt làm việc (Active Cutting Segment – ACS), đoạn này được hình thành bởi chiều sâu cắt a_p . Xác định bán kính cắt hiệu dụng để tính toán được vận tốc cắt hiệu dụng theo công thức (1.6):

$$\begin{cases} R_{ef1} = R \cdot \sin \theta_f \\ R_{ef2} = R \cdot \sin \left(\pm \theta_f - a \cos \left(\frac{R - a_p}{R} \right) \right) \end{cases} \quad (1.6)$$

trong đó: R_{ef1} là bán kính cắt hiệu dụng trên bề mặt đã gia công; R_{ef2} là bán kính cắt hiệu dụng trên bề mặt đang gia công. Dấu “+” trong công thức ứng với trường hợp giá trị góc tiếp dẫn θ_f cùng chiều tiến dao, ngược lại dấu “-” ứng với góc θ_f ngược chiều tiến dao.



Hình 1.5 Mô hình cắt dao phay cầu nghiêng theo góc dẫn, (a)- nghiêng theo hướng tiến dao, (b)- nghiêng ngược hướng tiến dao

Theo công thức (1.6), giá trị bán kính cắt hiệu dụng R_{ef1} trên bề mặt đã gia công không phụ thuộc vào hướng tiến dao. Như vậy đối với giá trị góc tiếp dẫn θ_f là âm hay dương thì giá trị R_{ef1} không thay đổi. Sau khi xác định bán kính cắt hiệu dụng, giá trị vận tốc cắt hiệu dụng đối với dao phay cầu khi nghiêng theo góc tiếp dẫn θ_f được tính như công thức (1.7) sau đây:

$$\begin{cases} V_{cef1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R \cdot \sin \theta_f}{1000} \\ V_{cef2} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R \cdot \sin \left(\pm \theta_f - a \cos \left(\frac{R - a_p}{R} \right) \right)}{1000} \end{cases} \quad (1.7)$$

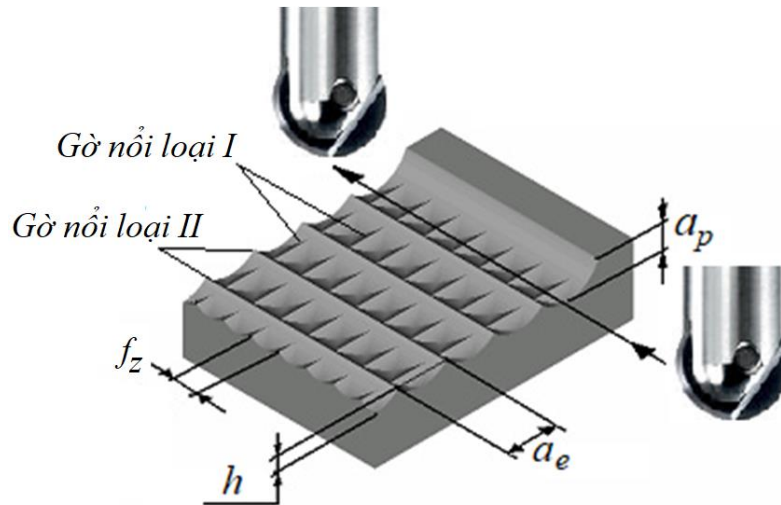
Trường hợp 2: nghiêng ngược hướng dịch dao ngang a_e (hình 1.6-b), vận tốc cắt hiệu dụng V_{cef1} (vì giá trị R_{ef1} lớn nhất) được theo (1.9):

$$\begin{cases} V_{cef1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot R \cdot \sin \left[\theta_n + a \cos \left(\frac{R - a_p}{R} \right) \right]}{1000} \\ a \sin \left(\frac{a_e}{2 \cdot R} \right) < \theta_n \leq \frac{\pi}{4} - a \cos \left(\frac{R - a_p}{R} \right) \end{cases} \quad (1.9)$$

Hai trường hợp hướng nghiêng trục dao θ_n khác nhau cho hai giá trị tính toán vận tốc cắt hiệu dụng khác nhau. Cùng giá trị góc nghiêng, trường hợp 1 (hình 1.6-a) cho thấy xu hướng đoạn lưỡi cắt làm việc dịch xa đỉnh dao hơn, vận tốc cắt hiệu dụng sẽ lớn hơn nhưng tránh được hiện tượng cắt tại đỉnh dao.

1.1.4. Chất lượng bề mặt gia công

Bề mặt gia công hình thành từ các đường chạy dao tạo bởi phần mềm CAM thông thường là những đường chạy dao song song và cách đều nhau một khoảng dịch dao ngang a_e (đề cập trong mục 1.1.3.3). Dao phay cầu có cấu tạo đặc biệt, lưỡi cắt bố trí trên mặt bán cầu nên sau khi hoàn thành các đường chạy dao sẽ xuất hiện những gờ nổi hình vỏ sò (scallop) [70] trên bề mặt đã gia công. Trong quá trình cắt, chuyển động của mỗi phần tử trên lưỡi cắt là tổng hợp chuyển động tịnh tiến của dao và chuyển động quay nhanh quanh trục. Số lượng lưỡi cắt là hữu hạn nên khi gia công dao quay được một vòng sẽ có những vị trí mà lưỡi cắt không cắt hết sẽ tạo thành các gờ nổi loại I và hoạt động dịch dao ngang sẽ để lại các gờ nổi loại II (hình 1.7).

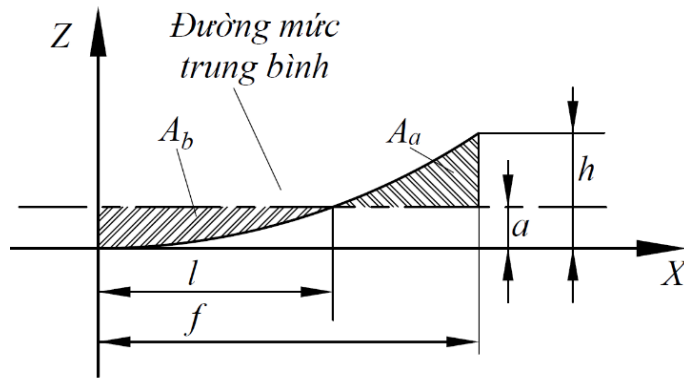


Hình 1.7 Sự hình thành gờ nổi sau khi phay bằng dao phay cầu

Tính toán chiều cao gờ nổi loại I rất phức tạp vì liên quan đến các thông số: lượng tiến dao f_z , bán kính dao cầu và số lưỡi cắt. Thực tế gờ nổi loại I xuất hiện dọc theo chiều tiến dao, vì đỉnh dao phay cầu không thay đổi vị trí khi gia công nên luôn tạo đường rãnh đỉnh cầu của dao. Do đó, gờ nổi loại I chỉ là những vân nhấp nhô do chuyển động quay của lưỡi cắt tạo thành nên độ lớn của nó không đáng kể, có thể bỏ qua ảnh hưởng của nó đến nhám bề mặt.

Theo [70], tính chiều cao h của gờ nổi loại 2 trên cơ sở phương trình đường tròn trong hệ tọa độ Descartes (Đề Cár) như công thức (1.10) sau:

$$h = R - \frac{\sqrt{4R^2 - a_e^2}}{2} \quad (\text{mm}) \quad (1.10)$$



Hình 1.8 Profin tính toán độ nhám bề mặt gia công bởi dao phay cầu

Trên hình 1.8 thể hiện profin tính toán độ nhám bề mặt chi tiết sau gia công bằng dao phay cầu trong điều kiện lý tưởng (phôi và dao không biến dạng), trục dao phay cầu trùng với trục Z, chiều dịch dao ngang theo trục X. Cần xác định được đường mức trung bình (mean line) từ đó có thể tính toán giá trị nhám trung bình R_a theo lý thuyết. Trên hình 1.8 thể hiện các thông số: a là chiều cao mức trung bình, A_b là diện tích tiết diện dưới mức trung bình, A_a là diện tích tiết diện trên mức trung bình và giá trị $f = a_e/2$, độ nhám theo chỉ tiêu sai lệch trung bình R_a được tính theo công thức (1.11) sau:

$$R_a = \frac{A_a + A_b}{f} \quad (\mu\text{m}) \quad (1.11)$$

trong đó: $A_a = (f - l)(R - a) - \frac{R^2}{4} [(2\gamma_f + \sin 2\gamma_f) - (2\gamma_l + \sin 2\gamma_l)]$

$$A_b = (a - R)l + \frac{R^2}{4} (2\gamma_l + \sin 2\gamma_l)$$

$$a = R - \frac{R^2}{4f} (2\gamma_f + \sin 2\gamma_f)$$

$$l = \sqrt{2 \cdot R \cdot a - a^2}$$

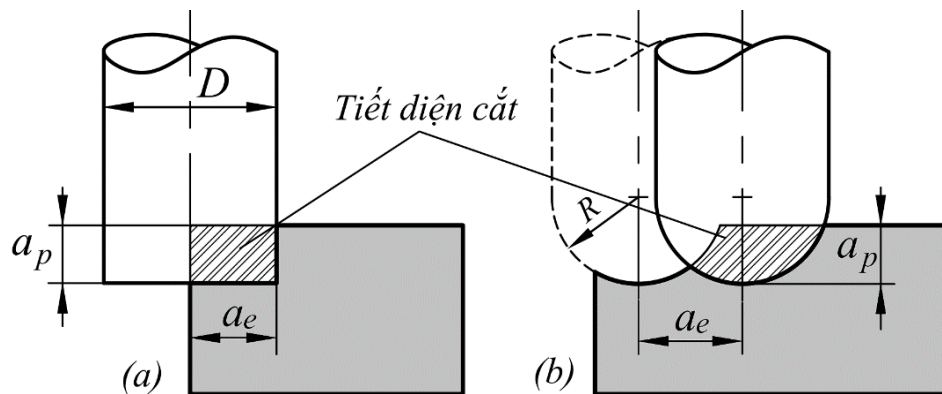
$$\gamma_f = a \sin\left(\frac{f}{R}\right)$$

$$\gamma_l = a \sin\left(\frac{l}{R}\right)$$

Nếu khai triển công thức (1.11) theo các thông số trung gian như: a, f, l, γ_l và γ_f thấy rằng chúng đều phụ thuộc vào hai thông số là bán kính dao R và lượng dịch dao ngang a_e . Do đó có thể kết luận, giá trị nhám bề mặt phụ thuộc chính vào thông số R và a_e , với giá trị giới hạn lớn nhất $a_e = 2R$ mà không phụ thuộc vào chiều sâu cắt a_p .

1.1.5. Năng suất gia công

Năng suất gia công khi phay được thể hiện bằng thể tích kim loại (hay khối lượng kim loại) bóc tách ra khỏi chi tiết gia công được trong một đơn vị thời gian. Đơn vị tính thường hay sử dụng là tốc độ bóc tách vật liệu (Material Removal Rate - MRR), được hiểu là thể tích của phoi bị bóc tách ra trong một đơn vị thời gian là Q ($\text{mm}^3/\text{phút}$) [3]. Năng suất cắt là một chỉ tiêu kinh tế đặc trưng cho quá trình cắt. Các phương pháp gia công đều nhằm đảm bảo năng suất cắt cao nhất trong điều kiện công nghệ cụ thể.



Hình 1.9 Tiết diện cắt dao phay trụ và dao phay cầu

Đối với dao phay cầu, việc thiết lập công thức tính tốc độ bóc tách vật liệu là khó khăn hơn đối với dao phay trụ do biên dạng cong của lưỡi cắt (hình 1.9)

và là một hàm phụ thuộc $MRR(a_e, a_p, f, R)$; trong đó chiều sâu cắt a_p theo mm, khoảng dịch dao a_e theo mm, tốc độ tiến dao f theo mm/phút.

Theo [70], công thức tính MRR của dao phay cầu như sau:

$$MRR = f \left[a_e \cdot a_p - \left(a_e \cdot R - \frac{a_e}{2} \cdot \sqrt{R^2 - \left(\frac{a_e}{2} \right)^2} - R^2 \cdot \sin \left(\frac{a_e}{2R} \right) \right) \right] \quad (1.12)$$

Giá trị nhỏ nhất của chiều sâu cắt a_p phụ thuộc vào tỷ số $\frac{a_e}{R}$, nhỏ nhất bằng chiều cao gờ nổi h (công thức (1.10)) nếu không sẽ trở thành phay rãnh (slotting milling). Giá trị lớn nhất của $a_p = R$ ứng với chiều cao h gờ nổi lớn nhất có thể. Vậy khoảng giá trị chiều sâu cắt a_p trong (1.12) là: $h < a_p < R$.

Khi chiều sâu cắt $a_p = h$, kết hợp công thức (1.10) và công thức (1.12), tính giới hạn nhỏ nhất của tốc độ bóc tách vật liệu MRR_{min} :

$$MRR_{min} = f \left[R^2 \cdot \sin \left(\frac{a_e}{2R} \right) - \frac{a_e}{4} \sqrt{4R^2 - a_e^2} \right] \quad (1.13)$$

Khi chiều sâu cắt $a_p = R$, thực hiện như trên tính giới hạn lớn nhất của tốc độ bóc tách vật liệu MRR_{max} :

$$MRR_{max} = f \left[R^2 \cdot \sin \left(\frac{a_e}{2R} \right) + \frac{a_e}{4} \sqrt{4R^2 - a_e^2} \right] \quad (1.14)$$

Trường hợp đặc biệt khi $a_e = R$, từ hai công thức (1.13) và (1.14) cho thấy $MRR_{min} = MRR_{max} = f \left[R^2 \cdot \frac{\pi}{2} \right]$. Khi đó tốc độ bóc tách vật liệu MRR bằng tích của tốc độ tiến dao f với $\frac{1}{2}$ diện tích hình tròn bán kính R .

Theo mục 1.1.4, thông số chiều sâu cắt a_p không ảnh hưởng nhiều đến giá trị nhám bề mặt nên có thể tăng a_p để đạt năng suất gia công cao hơn mà không ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt (theo công thức lý thuyết). Tốc độ bóc tách vật liệu MRR là yếu tố rất đáng quan tâm trong quá trình gia công và việc kiểm soát tốc độ bóc tách vật liệu rất quan trọng khi lập kế hoạch sản xuất. Từ đó hình thành ý tưởng về việc điều khiển tự động tốc độ bóc tách vật liệu thông qua kiểm soát lượng chạy dao và/hoặc chiều sâu cắt trong hệ thống điều khiển trên các trung tâm gia công CNC hiện đại, nhằm nâng cao năng suất gia công.

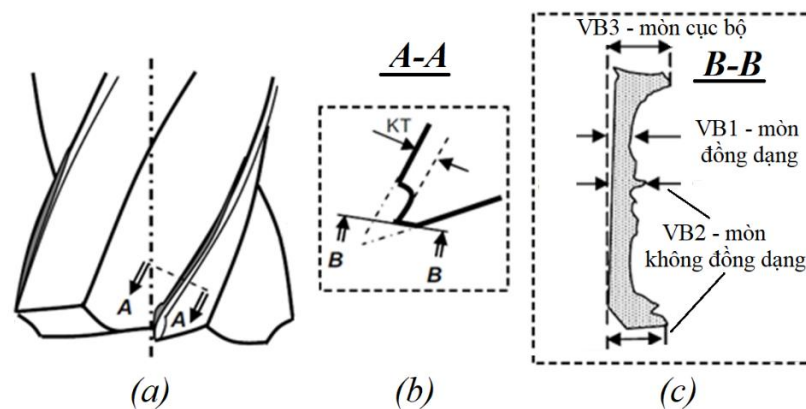
1.2. Tuổi bền dụng cụ và các yếu tố ảnh hưởng

1.2.1. Sự mòn dụng cụ

1.2.1.1. Các dạng mòn điển hình của dụng cụ

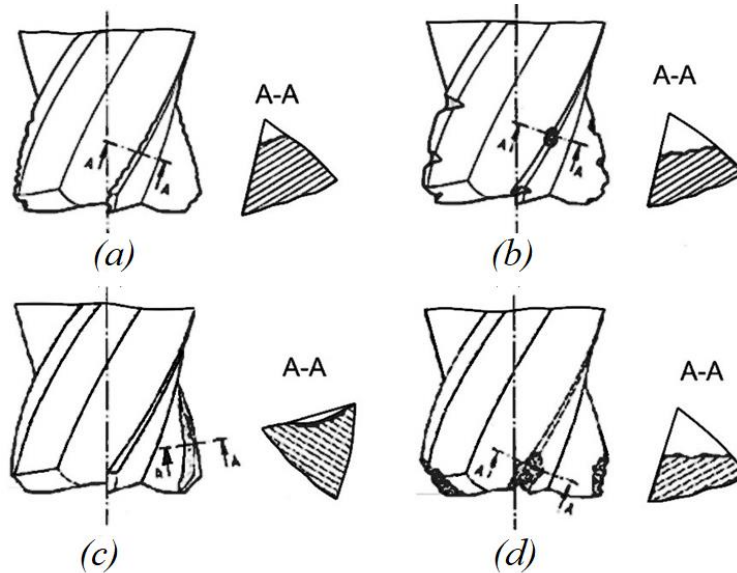
Các dạng mòn và tuổi bền của dụng cụ đã được tiêu chuẩn hóa theo Tổ chức Tiêu chuẩn hóa Quốc tế ISO hoặc được cụ thể hóa bằng TCVN: Tổ chức Tiêu chuẩn hóa Quốc tế ISO quy định tiêu chuẩn kiểm tra tuổi bền dụng cụ là ISO 8688-2/1989 đối với dao phay [30] [80]. Tiêu chuẩn Việt Nam quy định TCVN 11258:2015 “Thử nghiệm tuổi bền dao tiện một lưỡi cắt” hoàn toàn tương đương ISO 3685:1993 [1]. Theo đó các dạng mòn chính và phân bố vị trí mòn trên lưỡi cắt dao phay trụ cụ thể như sau:

- Mòn mặt sau (flank wear – VB): sự mất đi các phần tử dọc theo lưỡi cắt trong vùng giao tuyến giữa mặt trước và mặt sau của lưỡi cắt, có thể quan sát và đo được trên mặt sau của lưỡi cắt, phân thành ba dạng khác nhau (hình 1.10):
 - + Mòn đồng dạng mặt sau (VB1): Giá trị mòn trung bình dọc theo chiều sâu cắt.
 - + Mòn không đồng dạng mặt sau (VB2): mòn bất thường trên một vài vị trí trên lưỡi cắt.
 - + Mòn cục bộ mặt sau (VB3): kiểu mòn này thường xuất hiện trên vài điểm xác định.



Hình 1.10 Mòn mặt sau trên lưỡi dao phay trụ theo ISO 8688-2/1989, (a)-dao phay trụ, (b)- mặt cắt A-A, (c)- mặt cắt B-B

- Mòn mặt trước (KT): xảy ra tại vị trí mặt trong của dao phay. Đa phần là dạng mòn dạng hồ (KT1) (hình 1.11-c), một quá trình phát triển của hồ theo hướng song song với lưỡi cắt.



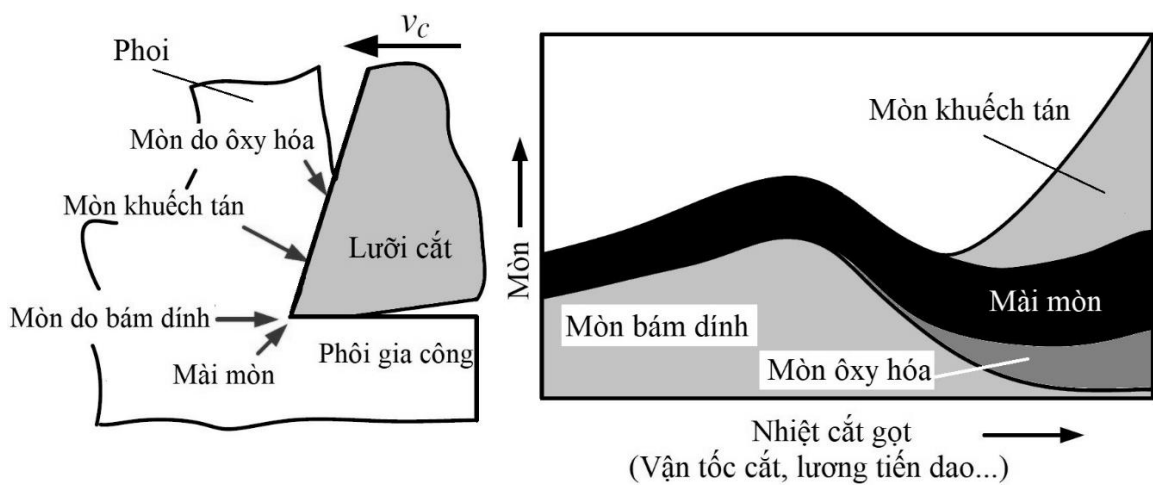
Hình 1.11 Các dạng mòn khác nhau trên lưỡi dao phay trụ, (a)- vỡ đồng dạng, (b)- vỡ không đồng dạng, (c)-mòn mặt trước, (d)-phá hủy

- Vỡ lưỡi cắt (CH): bong tróc bất thường của lưỡi cắt, tại những điểm ngẫu nhiên. Rất khó để đo và ngăn ngừa. bao gồm những mảnh vỡ nhỏ dọc theo lưỡi cắt do sự va chạm cơ học và ứng suất nhiệt đột ngột do sự tăng nhiệt và làm lạnh theo chu kỳ của hoạt động gia công.
- + Vỡ đồng dạng (CH1): phần lưỡi cắt nhỏ bị vỡ với kích thước tương đương dọc theo lưỡi cắt giao tiếp với vật liệu (hình 1.11-a).
- + Vỡ không đồng dạng (CH2): vỡ ngẫu nhiên trên một vài điểm của lưỡi cắt (hình 1.11-b).
- Bong tróc (FL): mất đi các mảng vật liệu trên lưỡi cắt, trong trường hợp dụng cụ được phủ là dễ quan sát nhất.
- Phá hủy khốc liệt (CF) (hình 1.11-d): khả năng cắt của dụng cụ bị suy giảm với tốc độ nhanh và dẫn đến gãy lưỡi cắt.

1.2.1.2. Cơ chế mòn và mô hình hóa

Sự mòn dụng cụ là sự kết hợp giữa quá trình vật lý và hóa học làm mất đi những phần nhỏ vật liệu của lưỡi cắt [30] [53]. Theo tiêu chuẩn DIN 50320,

mòn dao cắt được định nghĩa là “*giảm cường bức phần vật liệu dụng cụ cắt do sự tiếp xúc giữa lưỡi cắt với phần được cắt và chuyển động tương đối giữa dụng cụ cắt và chi tiết gia công...*” [45]. Mòn dụng cụ ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác gia công, chất lượng bề mặt và toàn bộ khía cạnh kinh tế của quá trình gia công. Trong phần lớn các trường hợp, dụng cụ bị mòn dần và quá trình gia công trở nên kém hiệu quả, chẳng hạn như: độ nhám bề mặt có giá trị lớn, lực cắt tăng dần dần đến các biến dạng và rung động vượt quá mức cho phép, tốc độ mòn của dao tăng lên đến mức không thể đảm bảo độ chính xác gia công.



Hình 1.12 Các cơ chế mòn trong cắt gọt kim loại

Có thể ước lượng gần đúng các cơ chế gây ra mòn dao là: khoảng 50% do mài mòn, khoảng 20% do bám dính, khoảng 10% do phản ứng hóa học và 20% còn lại do các cơ chế khác gây nên (đặc biệt là mòn do khuếch tán). Thiết lập ngưỡng lượng mòn giới hạn là rất quan trọng, bởi vì ngưỡng này kết quả gia công sẽ không được chấp nhận. Mòn có ảnh hưởng tiêu cực đối với dụng cụ và phụ thuộc vào các yếu tố sau:

- Sự kết hợp vật liệu dụng cụ và chi tiết gia công;
- Chế độ cắt (tốc độ cắt, lượng tiến dao, chiều sâu cắt...);
- Dung dịch làm trơn nguội;
- Nhiệt sinh ra tại vùng cắt.

Nhiều nhà nghiên cứu đã cố gắng phân tích cơ chế mòn xảy ra trong khi cắt gọt kim loại để tìm cách hợp lý làm giảm đi quá trình mòn [53] [65]. Người

ta thấy rằng mòn dụng cụ không được hình thành bởi từng cơ chế mòn riêng biệt mà là kết hợp một số cơ chế mòn khác nhau. Trên hình 1.12 thể hiện các cơ chế mòn xuất hiện phụ thuộc vào nhiệt cắt gọt và những vị trí xuất hiện trên lưỡi cắt dụng cụ. Cụ thể đặc điểm các cơ chế mòn được phân tích dưới đây:

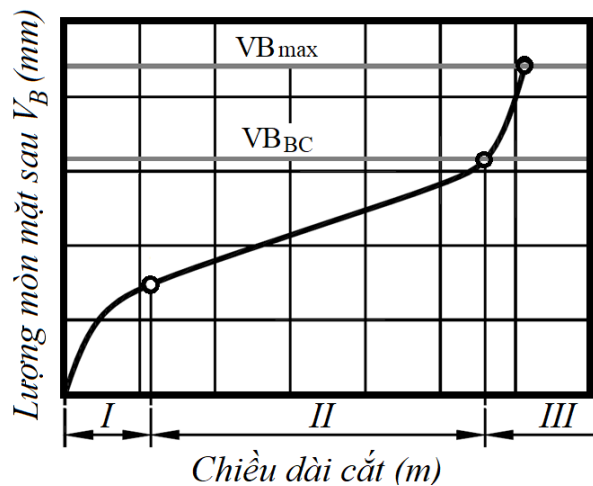
- Mài mòn: Một phần vật liệu của dụng cụ bị loại bỏ bởi hoạt động cơ học của những hạt tạp chất cứng trong vùng tiếp xúc trên mặt dụng cụ. Những hạt tạp chất cứng này có thể ở trong vật liệu phôi, là những mảnh vỡ lưỡi cắt bị tróc ra hoặc xảy ra biến cứng những mảnh vỡ của lẹo dao không ổn định.
- Mòn bám dính: Khi có sự trượt xảy ra, vật liệu ở vùng này bị trượt (biến dạng dẻo) dính sang bề mặt đối tiếp hoặc tạo thành các mảnh mòn rời, một số mảnh mòn còn được sinh ra do quá trình mòn do mài ở đỉnh các nhấp nhô. Các vùng dính bị trượt cắt và tái tạo liên tục theo chu kỳ thậm chí trong khoảng thời gian cắt ngắn, hiện tượng mòn có thể gọi là dính mài.
- Mòn khuếch tán: Xảy ra khi các phần tử tế vi dịch chuyển từ vật liệu dao cắt sang vật liệu phôi bởi có sự chênh lệch nồng độ (dao hợp kim cứng chứa nhiều cacbon hơn so với phôi). Tốc độ khuếch tán tăng theo hàm mũ theo mức tăng của nhiệt độ.
- Mòn do ôxy hóa: Lớp ôxít trên mặt dụng cụ rất hữu dụng cho việc giảm thiểu mòn vì làm giảm sự bám dính và khuếch tán bởi cách ly dao cắt và phôi. Khi ở nhiệt độ cao lớp ôxít này bị mềm, biến dạng nhanh chóng và sai đó tróc ra bởi phoi và vật liệu gia công.

Mòn dụng cụ trong quá trình gia công liên quan đến các cơ chế mòn phức tạp nên các nhà nghiên cứu luôn cố gắng tìm mối liên hệ trực tiếp giữa tuổi bền với các thông số gia công được áp dụng (tốc độ cắt, tốc độ tiến dao...). Nhiều mô hình đã được phát triển để mô tả mòn theo lượng (quantity) và thể hiện mối quan hệ giữa tuổi bền và các thông số gia công, ví dụ như công thức Taylor cho thấy mối quan hệ theo hàm mũ giữa tuổi bền và tốc độ cắt.

1.2.1.3. Quá trình phát triển của lượng mòn mặt sau

Lượng mòn trung bình mặt sau VB thường được sử dụng làm điều kiện xác định tuổi bền dao, bởi vì mặt sau là tác nhân chính làm thay đổi kích thước gia công, tức là ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác gia công [10]. Mối quan hệ giữa lượng mòn mặt sau và thời gian gia công (hoặc chiều dài cắt của đường chạy dao) được thể hiện bằng đường cong mòn (wear curve) trên đồ thị trên hình 1.13. Quan sát đường cong mòn thấy phân biệt rõ ràng ba đoạn có độ cong đặc biệt chia làm ba vùng đặc trưng I, II và III [17] như sau:

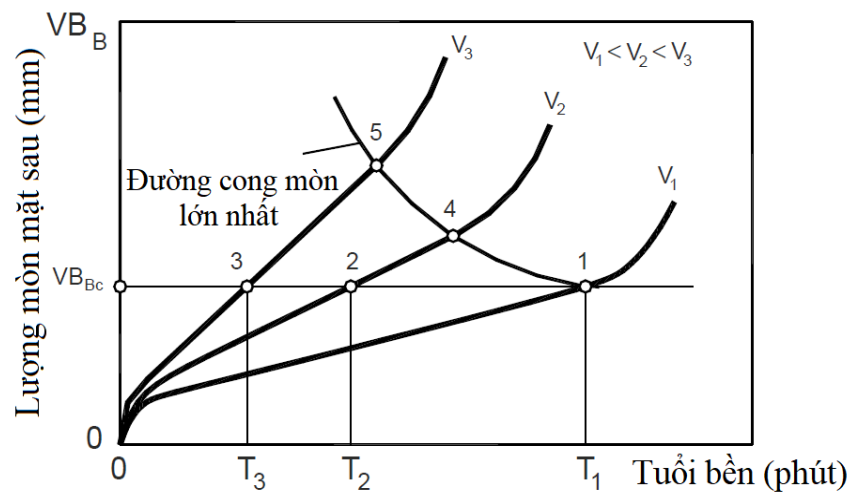
- Vùng I: mòn sơ cấp hay mòn ban đầu có tốc độ mòn tương đối cao vì nguyên nhân các lớp dụng cụ bị tổn hại trong quá trình chế tạo hoặc được mài lại.
- Vùng II: mòn ổn định, vùng hoạt động bình thường của dụng cụ.
- Vùng III: mòn mãnh liệt nguyên nhân bởi lực cắt lớn, nhiệt hoặc rung động của dao cắt. Thông thường dao cắt không nên tiếp tục sử dụng nếu lượng mòn trong vùng này (VB_{BC} là giới hạn cho phép lượng mòn), giá trị mòn VB_{max} là giới hạn cuối cùng.



Hình 1.13 Đường cong lượng mòn mặt sau VB theo chiều dài cắt

Trong thực tế, vận tốc cắt là mối quan tâm hàng đầu khi xem xét mòn dụng cụ. Do đó, các đường cong mòn dao được xây dựng cho các vận tốc cắt khác nhau trong khi giữ giá trị các thông số gia công khác không đổi. Khi khảo sát với giá trị vận tốc cắt khác nhau, biểu diễn các đường cong mòn đó trên cùng một đồ thị sẽ thấy rõ sự ảnh hưởng của vận tốc cắt lên sự tiến triển lượng mòn

dao (vận tốc cắt V_1 , V_2 và V_3 trên hình 1.14). Vận tốc cắt V_3 có giá trị lớn nhất nên nó sẽ tương ứng với đường cong mòn có tốc độ mòn nhanh nhất. Nếu lượng mòn đạt đến giá trị giới hạn cho phép VB_{BC} thì dụng cụ được xem là đã mòn đến giới hạn. Trong trường hợp chất lượng bề mặt gia công không yêu cầu cao thì nên sử dụng đường cong mòn lớn nhất thay cho đường nằm ngang VB_{BC} , lúc đó sự chênh lệch giá trị tuổi bền khi vận tốc cắt lớn nhất V_3 và nhỏ nhất V_1 trở nên gần nhau hơn đáng kể, kết quả làm tăng năng suất gia công, đặc biệt quan trọng khi gia công cao tốc trên máy CNC.



Hình 1.14 Sự phát triển lượng mòn ứng với vận tốc cắt khác nhau

1.2.2. Tuổi bền dụng cụ

1.2.2.1. Định nghĩa về tuổi bền dụng cụ

Theo tiêu chuẩn DIN 6583 – 1981, việc xác định tuổi bền là phép đo lượng mòn trên bề mặt lưỡi cắt của dụng cụ và có thể được đo trực tiếp hoặc gián tiếp theo nhiều phương pháp khác nhau [46]. Tiêu chuẩn Quốc gia “TCVN 11258:2015 ISO 3685:1993 Thử nghiệm tuổi thọ dao tiện một lưỡi cắt” định nghĩa tuổi bền như sau: “*Tuổi bền dụng cụ T (phút) là thời gian làm việc liên tục của dụng cụ giữa hai lần mài sắc. Nghĩa là thời gian làm việc từ lúc bắt đầu đến lúc dụng cụ mòn đến lượng mòn cho phép. Lượng mòn cho phép khi xác định tuổi bền của dụng cụ thường là lượng mòn cho phép theo mặt sau (hs) và phụ thuộc chủ yếu vào phương pháp gia công thô hoặc tinh*” [1].

Tuy nhiên trong thực tế, theo [30] thì tuổi bền dụng cụ có thể tính theo các loại đơn vị khác nhau tùy điều kiện tính toán cụ thể như sau:

- Đơn vị thời gian, khi các thông số gia công đã ổn định được sử dụng trong quá trình sản xuất hoặc so sánh giữa các hãng sản xuất;
- Thể tích vật liệu bị bóc tách (dùng cho gia công thô);
- Chiều dài đường chạy dao gia công (dùng cho gia công tinh).

Ba loại đơn vị đo trên đều có mối quan hệ về mặt toán học và có thể quy đổi thông qua các tham số gia công. Đối với gia công khoan và phay, người ta thường dùng tuổi bền theo chiều dài cắt hơn, tuổi bền được tính bằng tổng chiều sâu khoan hoặc tổng chiều dài cắt được khi phay giữa các lần mài lại.

1.2.2.2. Các chỉ tiêu xác định tuổi bền dụng cụ [26]

Chỉ tiêu xác định tuổi bền của dao phay đã được tiêu chuẩn hóa theo ISO 8688-2/1989 “*Kiểm tra tuổi bền khi phay - dao phay trụ*” [90] [103]. Theo đó tuổi bền của dụng cụ được xác định theo một trong các điều kiện sau:

- Dụng cụ cắt bị hư hỏng hoặc gãy bất ngờ;
- Lượng mòn mặt sau đối dao thép gió và gôm: $VB_{\max} = 0.3 \text{ mm}$ nếu là mòn đồng dạng, $VB_{\max} = 0.8 \text{ mm}$ nếu là mòn bất thường, vết xước hoặc mảnh vỡ. Đối với dao cacbit: $VB_{\max} = 0.3 \text{ mm}$ nếu là mòn đồng dạng, $VB_{\max} = 0.5 \text{ mm}$ nếu là mòn bất thường;
- Lượng mòn mặt trước $KT = 0.1 \text{ mm}$ là tiêu chuẩn đối với dao cacbit, thép gió và $KT = 0.09 \text{ mm}$ đối với dao vật liệu gôm [90].

Mòn mặt sau là chỉ tiêu thông dụng được sử dụng để đánh giá tuổi bền dụng cụ, là dạng phù hợp nhất của mòn và dễ dàng đo lường. Mòn mặt sau khi đạt đến 0.3 mm thì quy luật phát triển mòn trở nên bất thường và khó để tiếp tục gia công. Lượng mòn mặt sau cho phép trong khoảng $0.3 \div 0.5 \text{ mm}$; với giá trị ngưỡng dưới 0.3 mm phù hợp trong gia công tinh và giá trị ngưỡng trên 0.5 mm phù hợp với gia công thô.

Mòn mặt trước ít ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt và độ chính xác gia công cho nên ít được chọn làm chỉ tiêu đánh giá tuổi bền. Tuy nhiên trong một số trường hợp không yêu cầu cao (chất lượng bề mặt và độ chính xác gia công)

có thể lấy chiều sâu mòn mặt trước KT khoảng từ $0.05 \div 0.1\text{mm}$, hoặc có vết nứt bề mặt lớn hơn 0.5 mm làm chỉ tiêu tuổi bền dụng cụ. Những loại dụng cụ làm từ vật liệu hợp kim tính gia công kém có thể xuất hiện đồng thời nhiều dạng mòn, tăng gấp bội ảnh hưởng xấu của mòn.

1.2.2.3. Công thức Taylor xác định tuổi bền dụng cụ

Tuổi bền phụ thuộc vào dụng cụ cắt (vật liệu, hình học, lớp phủ, ...), phôi gia công (độ cứng, độ bền, thành phần hóa học, ...), chế độ cắt (tốc độ cắt, lượng tiến dao, chiều sâu cắt, ...) và các yếu tố khác thì việc tạo ra một bộ công cụ xác định tuổi bền tổng quát rất khó khả thi. Tuy nhiên lại có khả năng tạo ra một công thức tính toán tuổi bền nếu chế độ cắt và máy gia công được giới hạn và mòn dao đơn giản bởi một cơ chế đơn. Cuối thế kỷ XIX, Taylor [87] đã thực hiện số lượng lớn thí nghiệm nhằm thu thập dữ liệu tuổi bền dụng cụ để xây dựng hệ thống quản lý dụng cụ đầu tiên trên thế giới. Mặc dù những dữ liệu tuổi bền đó đã trở nên lỗi thời (ngày nay dụng cụ cắt và máy gia công thay đổi khác nhiều hơn trước) nhưng công thức tính tuổi bền dụng cụ (công thức Taylor) vẫn được sử dụng rộng rãi đến ngày nay.

Công thức Taylor xác định tuổi bền dao T được tính theo công thức (1.15):

$$\frac{V_c}{V_r} = \left(\frac{T_r}{T}\right)^n \rightarrow V_c T^n = V_r T_r^n \quad (1.15)$$

trong đó V_c : tốc độ cắt (m/phút),

V_r : vận tốc cắt ứng với tuổi bền T_r đã biết trước (m/phút),

n : hằng số phụ thuộc vào cặp đôi dụng cụ - vật liệu.

Công thức (1.15) cho thấy chỉ vận tốc cắt ảnh hưởng đến tuổi bền, nhưng thực tế tốc độ tiến dao và chiều sâu cắt cũng là thông số ảnh hưởng. Vì vậy công thức Taylor mở rộng có xét đến một số thông số gia công ảnh hưởng đến tuổi bền theo công thức (1.16) như sau:

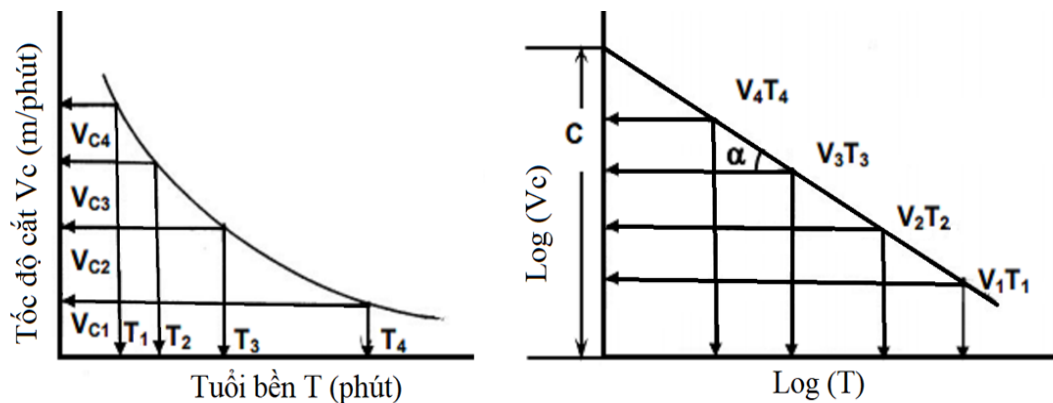
$$T \cdot V_c^x \cdot f^y \cdot a_p^z = C_T \quad (1.16)$$

trong đó f : tốc độ tiến dao (mm/phút),

a_p : chiều sâu cắt (mm),

C_T, x, y và z : hằng số, phụ thuộc vào dụng cụ - vật liệu.

Công thức Taylor (1.15) hoặc Taylor mở rộng (1.16) cho thấy mối quan hệ hàm mũ giữa tuổi bền và vận tốc cắt (hình 1.15-a), tuổi bền giảm mạnh khi vận tốc cắt tăng. Nếu biểu diễn trên đồ thị lưới Log-Log thì đường cong quan hệ vận tốc cắt - tuổi bền trở thành đường thẳng, gọi là đường $T-V$ (hình 1.15-b). Từ đường $T-V$ tính được tuổi bền tương ứng từ giá trị tốc độ cắt, vị trí và góc nghiêng α (hình 1.15-b) của đường $T-V$ thay đổi như một hàm của các thông số ảnh hưởng đã trình bày trong công thức Taylor mở rộng (1.16).



Hình 1.15 Mối quan hệ vận tốc cắt và tuổi bền dụng cụ

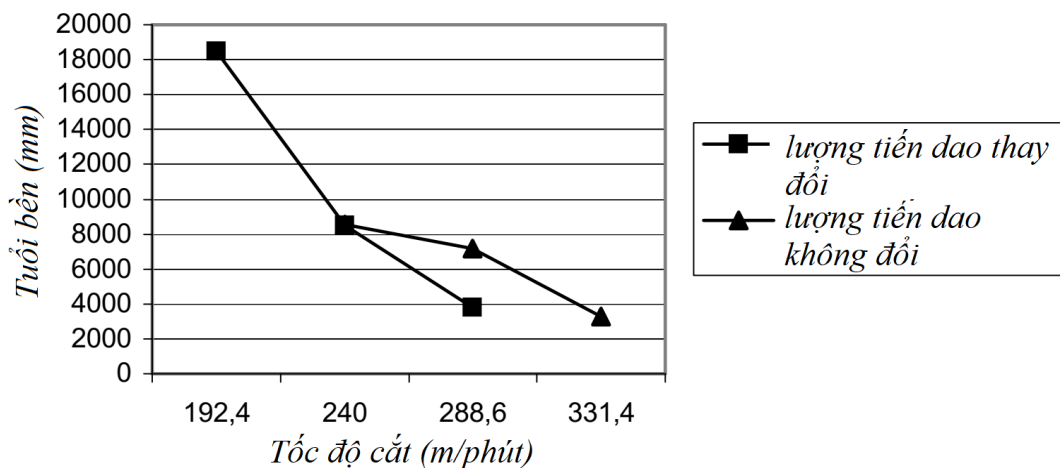
Áp dụng công thức Taylor trong tính toán tuổi bền dụng cụ gặp những khó khăn nhất định vì chế độ cắt thực tế không có sẵn các hằng số thực nghiệm của công thức Taylor mở rộng ứng với các cặp đôi dụng cụ - vật liệu gia công hiện tại [57]. Các chế độ cắt thường không được duy trì ổn định mà luôn thay đổi thường xuyên trong quá trình cắt. Điều đó sẽ dẫn đến hư hại trên dụng cụ luôn sớm hơn so với tuổi bền được tính toán. Một vấn đề khác nảy sinh là do những thay đổi về thông số cắt này trong quá trình gia công sẽ không có quy trình nào để tính toán phần tuổi bền còn lại của dao. Do đó đã có một số đề xuất xây dựng hệ thống dựa trên trí thông minh nhân tạo để xác định tuổi bền dụng cụ cho bất kỳ chế độ cắt nào khi gia công hoặc phần tuổi bền còn lại sau khi gia công.

1.2.3. Các yếu tố ảnh hưởng đến tuổi bền dụng cụ

1.2.3.1. Các thông số chế độ cắt chính

Vận tốc cắt: Công thức Taylor đã thể hiện rõ ràng sự ảnh hưởng của vận tốc cắt đến tuổi bền dụng cụ, đó là mối quan hệ hàm mũ và tuổi bền giảm mạnh

khi tăng vận tốc cắt (hình 1.16). Tăng vận tốc cắt (giữ nguyên lượng tiến dao) làm cho tần suất mỗi lưỡi cắt đi vào trong phôi tăng lên và đồng thời tăng ma sát giữa dụng cụ-phôi, dụng cụ-phoi. Từ đó làm phát sinh nhiều nhiệt cắt, giảm độ cứng của dụng cụ và tạo điều kiện cho hiện tượng mài mòn, khuếch tán xảy ra, đặc biệt là khi gia công tốc độ cao [43]. Quan sát lưỡi cắt trên kính hiển vi cho thấy xuất hiện những vết vỡ nổi trội hơn quá trình mài mòn, do sự ảnh hưởng của chấn động (shock) mỗi khi lưỡi cắt đi vào phôi quan trọng hơn lực ma sát đến tuổi bền dụng cụ [43]. Khi vận tốc cắt quá thấp, các vết nứt cơ học là nguyên nhân chính gây ra hỏng hóc dụng cụ bởi vì lực cắt lớn hơn và nhiệt độ cắt thấp hơn. Vận tốc cắt thấp còn là nguyên nhân gây ra hiện tượng lẹo dao (built up edge – BUE). Nhiệt độ bị truyền ra các thành phần xung quanh nên giảm đột ngột khiến cho vật liệu bị đông cứng, tự tôi cứng bám chặt vào mặt trước của dao cắt. Khi lẹo dao xảy ra làm giảm độ sắc của lưỡi cắt, vì thế dẫn đến làm giảm độ nhẵn bề mặt gia công hoặc dẫn đến mất khả năng cắt gọt của dụng cụ.

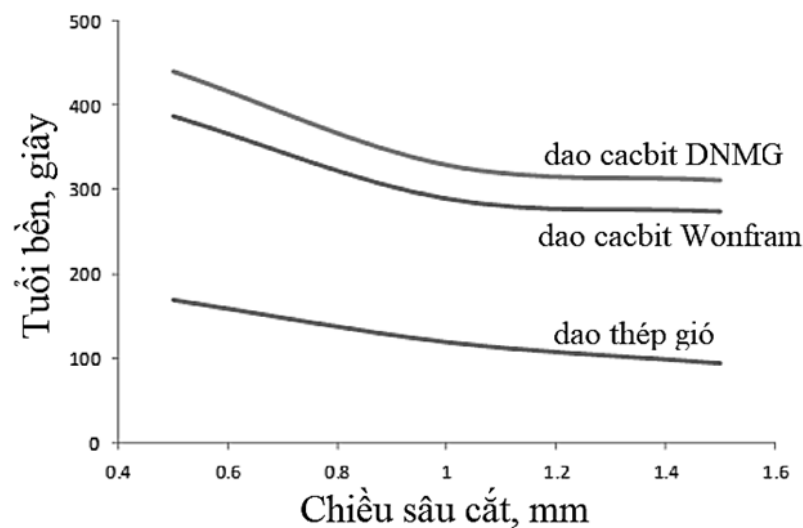


Hình 1.16 Đồ thị ảnh hưởng của vận tốc cắt đến tuổi bền [43].

Lượng tiến dao: Đây là thông số có mức độ ảnh hưởng nhỏ đến tuổi bền dụng cụ nên có rất ít nghiên cứu ảnh hưởng độc lập của lượng tiến dao. Khi tăng lượng tiến dao một cách hợp lý thì có thể giảm mòn mặt sau, lý do chính là do thời gian tiếp xúc giữa dao và phôi bị rút ngắn khi lượng tiến dao tăng cao [99]. Ứng với mỗi giá trị tốc độ cắt, sự ảnh hưởng của lượng tiến dao đến tuổi

bền dụng cụ cũng khác nhau, khi vận tốc cắt lớn, thì sự ảnh hưởng của lượng tiến dao đến tuổi bền càng mạnh.

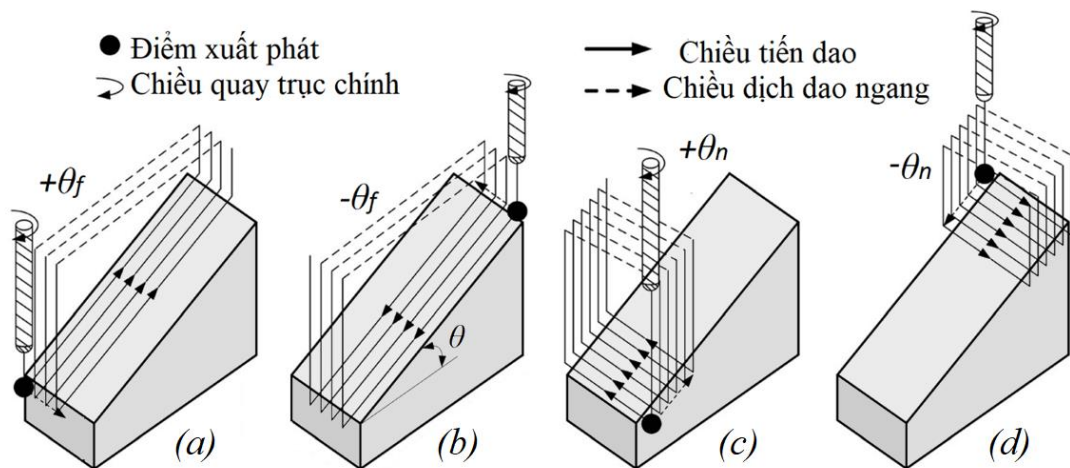
Chiều sâu cắt: Theo [43], vận tốc cắt có ảnh hưởng nhất đến tuổi bền dụng cụ, sau đó là lượng tiến dao và nhỏ nhất là chiều sâu cắt. Khi chiều sâu cắt tăng (khi lượng tiến dao không đổi) thì tỷ số biến đổi chiều dày phoi (chip compression ratio) và nhiệt cắt trung bình không thay đổi, dẫn đến sự thay đổi tốc độ mòn dao không đáng kể khi gia công ở chế độ cắt tối ưu [16]. Trên hình 1.17 thể hiện đồ thị ảnh hưởng chiều sâu cắt đến tuổi bền (trong điều kiện tốc độ quay trục chính giống nhau) đối với các loại vật liệu dụng cụ cắt khác nhau. Khuynh hướng các đường đồ thị cho thấy khi chiều sâu cắt tăng sẽ làm tuổi bền giảm. Nhưng chiều sâu cắt tăng đến giá trị nào đó (khoảng hơn 10 lần lượng tiến dao f_z [72]) thì hầu như không ảnh hưởng đến tuổi bền dụng cụ, ví dụ vật liệu dụng cụ bằng cacbit DNMG và cacbit Wonfram (hình 1.17).



Hình 1.17 Đồ thị ảnh hưởng của chiều sâu cắt đến tuổi bền [82]

1.2.3.2. Định hướng chuyển động dao phay cầu

Dao phay cầu có đặc điểm là lưỡi cắt bố trí trên mặt cầu nên khi thay đổi góc nghiêng trục dao sẽ không ảnh hưởng đến kích thước gia công. Khi khảo sát ảnh hưởng hướng chuyển động dao phay cầu đến tuổi bền, chỉ xét đến hai trường hợp: nghiêng theo hướng tiến dao $\theta_f \neq 0$ và $\theta_n = 0$; nghiêng vuông góc hướng tiến dao $\theta_f = 0$ và $\theta_n \neq 0$ như hình 1.18.



Hình 1.18 Các hướng chuyển động dao phay cầu khi gia công [84]

Cách gọi tên cho các hướng chuyển động chạy dao chưa có cách gọi thống nhất trong các tài liệu tham khảo trong nước, nên có thể gọi tên theo sự kết hợp tư thế nghiêng và chiều tiến dao [69] [84] như sau:

- a) nghiêng đứng - đi lên ($+\theta_f$) (vertical - upward);
- b) nghiêng đứng - đi xuống ($-\theta_f$) (vertical - downward);
- c) nghiêng ngang - đi lên ($+\theta_n$) (horizontal - upward);
- d) nghiêng ngang - đi xuống ($-\theta_n$) (horizontal - downward).

Trong một nghiên cứu của tác giả Tan [84] thực hiện khảo sát cả bốn tư thế nghiêng với góc nghiêng không thay đổi (hình 1.18), cho thấy: nghiêng đứng - đi xuống và nghiêng ngang - đi lên có thể quan sát rõ ràng ba giai đoạn trên đường cong mòn, trong khi nghiêng đứng - đi lên và nghiêng ngang - đi xuống có tuổi bền thấp hơn và giai đoạn mòn sơ cấp (giai đoạn I theo 1.2.1.3) rất nổi trội. Định hướng nghiêng ngang - đi lên cho kết quả tuổi bền thấp nhất, trong khi nghiêng đứng - đi xuống cho tuổi bền cao nhất. Theo mục 1.1.3.2, vận tốc cắt ở tư thế nghiêng ngang - đi lên là lớn nhất, kết hợp với lực cắt cao và rung động mạnh dẫn đến tuổi bền thấp nhất. Trong khi đó theo mục 1.1.3.3, vận tốc cắt của tư thế nghiêng đứng - đi xuống là nhỏ nhất bởi vì bán kính cắt hiệu dụng giảm khi điểm cắt dịch chuyển gần về đỉnh cầu của dao nên kết quả tuổi bền đạt lớn nhất. Nếu ưu tiên về chất lượng bề mặt, định hướng nghiêng ngang - đi lên là hài hòa giữa tuổi bền và chất lượng bề mặt tốt nhất.

Tác giả E-G Ng [59] đã thí nghiệm gia công hợp kim cứng Inconel 718, thấy rằng định hướng nghiêng ngang - đi xuống ($-\theta_n$) đạt chiều dài cắt cho phép lớn nhất và độ nhám bề mặt tốt nhất. Thông qua phân tích lực cắt và phân tích phổ từ tín hiệu đo lực thể hiện kiểu định hướng $-\theta_n$ tạo ít rung động nhất. Nhiều nghiên cứu khi gia công cao tốc hợp kim cứng đều ưu tiên lựa chọn hướng tiến dao đi xuống ($-\theta_f$ hoặc $-\theta_n$) đạt được tuổi bền cao hơn và chất lượng bề mặt tốt. Tác giả Layegh [51] đã chứng minh trong cùng điều kiện gia công, phay theo mô hình dao đi xuống tuổi bền lớn hơn mô hình dao đi lên ít nhất khoảng 33.33%. Ảnh hưởng của vận tốc cắt khá rõ ràng, mặc dù đỉnh dao tham gia vào cắt nhưng vận tốc cắt hiệu dụng nhỏ nên tuổi bền lớn hơn.

Tóm lại, định hướng đường chạy dao tốt nhất cho tuổi bền là hướng tiến dao đi xuống, tùy mục đích gia công cần chỉ tiêu tuổi bền hay chất lượng bề mặt mà lựa chọn nghiêng hướng đứng hay nằm ngang. Trong thực tế, định hướng nghiêng ngang - đi xuống được sử dụng phổ biến nhất, vì nó phù hợp với các chu trình phay hiện tại của các chương trình NC.

1.2.3.3. Góc nghiêng trục dao phay cầu

Gia công những bề mặt tự do trên máy CNC thì đường chạy dao luôn phải bám theo độ cong của bề mặt, độ dốc của các bề mặt gia công có thể thay đổi trong khoảng từ $0^0 \div 90^0$. Khi gia công tinh trên máy CNC, dao phay cầu được sử dụng vì hình học dao cắt phù hợp nhất với bề mặt tự do. Trong đó, góc nghiêng trục dao so với bề mặt phôi là yếu tố quyết định đến chất lượng bề mặt, độ chính xác gia công và tuổi bền của dụng cụ. Nhưng lưỡi cắt tại đỉnh chỏm cầu trở nên kém cứng vững và hoạt động cắt không xảy ra tại đó do vận tốc cắt bằng “không”. Tại đây, không gian tạo phoi hiệu dụng rất nhỏ và bề mặt sau gia công thường xuất hiện những đỉnh nhấp nhô hình vỏ sò, do đó việc tạo góc nghiêng tối thiểu giữa trục dao và phôi gia công rất cần thiết để tránh cắt tại đỉnh. Ngược lại nếu góc nghiêng quá lớn thì có thể làm giảm chất lượng bề mặt do dao cắt bị biến dạng vì lực cắt lớn hoặc quá nhiệt do vận tốc cắt quá lớn.

Tác giả Schulz [75] đã nghiên cứu vấn đề phay cao tốc các sản phẩm khuôn mẫu bằng dao phay cầu, dao phay được nghiêng theo góc pháp dẫn θ_n

nhằm tránh cắt tại đỉnh dao. Khi góc pháp dẫn $\theta_n > 15^\circ$, tải tập trung trên lưỡi cắt tăng và lượng mòn lớn nhất tại điểm tập trung tải cao nhất. Ngược lại, khi $\theta_n < 15^\circ$ thì lưỡi cắt bị hư hại chủ yếu là bị vỡ tập trung tại gần đỉnh dao. Góc nghiêng nhỏ thì độ biến thiên vận tốc cắt dọc theo lưỡi cắt rất lớn: tại đỉnh dao có vận tốc cắt nhỏ gây ra hiện tượng nghiền và ma sát là nổi trội, trong khi đó tại vị trí cao nhất của điểm cắt thì điều kiện cắt gần với khoảng tối ưu. Tuổi bền dao tốt nhất khi gia công theo định hướng nghiêng đứng - đi lên tốt nhất trong khoảng góc nghiêng $10^\circ \div 20^\circ$, giá trị tối ưu là 15° .

Khảo sát giá trị góc nghiêng trong khoảng thay đổi lớn, Kang [47] đã tiến hành thí nghiệm với ba giá trị góc nghiêng (15° , 30° và 45°), mỗi giá trị góc thực hiện bố định hướng dao như hình 1.18. Kết thúc thí nghiệm cho thấy hai kiểu định hướng nghiêng ngang - đi lên với góc $\theta_n = 15^\circ$ và nghiêng ngang - đi xuống với góc $\theta_n = -45^\circ$ là hiệu quả khi lưỡi cắt bị mòn đồng dạng. Định hướng dao nghiêng đứng - đi xuống với giá trị $\theta_f = -15^\circ$ cho tuổi bền thấp nhất, bởi vì xảy ra cắt tại đỉnh dao gây rung động quá mức dẫn đến mẻ dao và tăng cường mòn mặt sau. Định hướng với góc tiếp dẫn $\theta_f = 45^\circ$ gây rung động dọc trục và tạo ứng suất tập trung trên dao, đó là yếu tố có ảnh hưởng xấu đến nhiệt cắt và tuổi bền dao.

Adilson José [31] cho rằng ảnh hưởng của góc nghiêng tác động đến tuổi bền rõ ràng hơn là thông số lượng tiến dao và chiều sâu cắt. Tuổi bền giảm khi góc nghiêng tăng do vận tốc cắt hiệu dụng tăng theo đường kính cắt hiệu dụng. Thời điểm khi dụng cụ hết tuổi bền, với góc nghiêng $\theta_f = 45^\circ$ sẽ xuất hiện nhiều vết nứt nhỏ và số ít bám dính vật liệu gia công; với góc nghiêng $\theta_f = 75^\circ$ thì phần lớn là bám dính và chỉ có ít vết nứt nhỏ.

1.2.4. Các phương pháp xác định tuổi bền dụng cụ

1.2.4.1. Các phương pháp xác định trực tiếp

Hầu hết các phương pháp xác định lượng mòn đều sử dụng các hệ thống quang học đo lượng mòn lưỡi cắt mặt sau hoặc mặt trước để xác định tuổi bền dụng cụ. Thậm chí một số nhà sản xuất dụng cụ cắt đã phủ một lớp đặc biệt có

màu sắc phân biệt trên lưỡi cắt nhằm mục đích dễ đo và phát hiện mòn, ví dụ lớp phủ màu vàng của TiN hoặc màu xám của TiCN. Phương pháp đo lường mòn đơn giản nhất là sử dụng kính hiển vi điện tử, thực hiện đo định kỳ trong quá trình gia công bằng cách dừng máy gia công, lấy và đặt dụng cụ cắt vào đồ gá trên kính hiển vi điện tử. Wojciechowski [95] sử dụng kính hiển vi lập thể Carl Zeiss đo lường mòn mặt sau VB sau mỗi hành trình của 50 đường chạy dao ngang (khoảng 16 mét). Ngoài ra, sau mỗi hành trình của 5 đường chạy dao ngang thực hiện chụp ảnh sơ bộ (không đo mòn) hình ảnh lưỡi cắt nhằm phát hiện trường hợp dao cắt bị hư hỏng hoặc gãy bất ngờ. T. Pfeifer [68] đã thực hiện một số cải tiến nhằm nâng cao chất lượng đo lường bằng cách: đặt vật đo gần máy chụp ảnh, sử dụng kỹ thuật chiếu sáng thích ứng với ánh sáng môi trường xung quanh nhằm đạt được ảnh chụp tối ưu nhất cho nhiều chủng loại dao cắt khác nhau.

Giám sát tình trạng dụng cụ (Tool Condition Monitoring - TCM) là một hệ thống rất quan trọng trong môi trường gia công không người giám sát. Từ những năm 1990 đến nay, các nhà nghiên cứu đã tiến hành nghiên cứu về TCM sử dụng kỹ thuật xử lý ảnh như một công cụ trực tiếp đo lường mòn mặt sau và mặt trước lưỡi dao. Có hai nguyên lý được thiết kế là: thời gian-thực (real-time) và trong-quá trình (in-process). Mỗi nguyên lý có ưu điểm và nhược điểm khác nhau, được trình bày chi tiết như sau:

Nguyên lý trong quá trình: thực hiện đo và giám sát mòn trực tuyến cần phải dừng hoạt động máy công cụ. Hệ thống đo và giám sát đặt ngay trong vùng gia công, khi thực hiện đo thì dụng cụ cắt vẫn nằm trên trục chính, quá trình đưa dụng cụ đến vị trí đo lường bằng chương trình NC lập trình sẵn. Trong nghiên cứu của Zhang [102] đã thiết lập hệ thống chụp ảnh lưỡi cắt dao phay cầu bằng cách thiết lập chương trình NC cho trục chính máy công cụ di chuyển đến trước ống kính máy ảnh. Dụng cụ cắt được định vị, phân độ và điều chỉnh cường độ nguồn sáng (điều chỉnh được bằng máy tính) thích hợp để chụp ảnh mặt sau của dụng cụ. Phoi bám dính trên vùng mòn của lưỡi cắt được làm sạch bằng vòi phun khí nén đảm bảo hình ảnh của mòn dụng cụ tốt nhất.

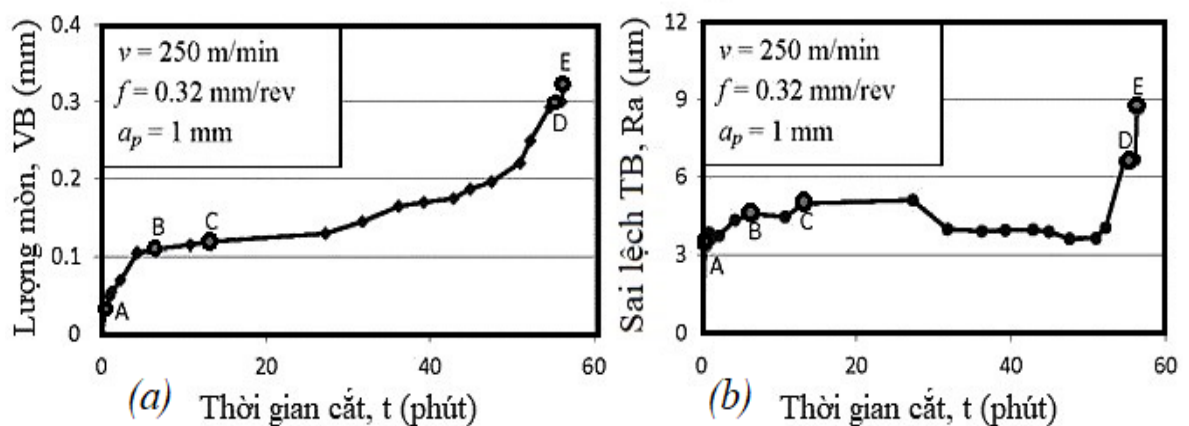
Nguyên lý thời gian-thực: thực hiện đo và giám sát trực tuyến ngay trong khi gia công mà không phải dừng máy công cụ. Giusti, F. [38] đã phát triển hệ thống chụp ảnh trực tuyến đồng thời mặt trước và mặt sau của mảnh cắt hợp kim trên máy tiện. Bằng cách bố trí hệ thống thấu kính quang học để truyền hình ảnh lưỡi cắt đến máy ảnh đặt ngoài vùng gia công nhằm loại bỏ rung động hoặc ảnh hưởng không gian vùng gia công. W. Wang [93] đã sử dụng hệ thống máy ảnh chụp tốc độ cao, hệ thống chiếu sáng điểm bằng sợi quang và hệ thống kích hoạt chụp ảnh bằng tia laser. Với hệ thống kích hoạt chụp bằng tia laser cho phép chụp từng lưỡi cắt ngay trong khi trục chính đang quay. Hình ảnh chụp mặt sau dụng cụ được khoanh vùng giới hạn, vùng mòn và không mòn được phân biệt dựa vào mức độ xám của ảnh chụp để làm giảm thời gian tính toán của máy tính. Cũng trong một nghiên cứu khác, W. Wang [92] áp dụng phương pháp ngưỡng độc lập trên cơ sở hệ thống quang học được đề xuất để đo lường mòn mặt sau của dụng cụ cắt. Đầu tiên là khoanh vùng giới hạn của ảnh chụp để giảm số lượng xử lý, sau đó dò tìm đường tham chiếu, cuối cùng tăng độ nét của đường biên ảnh dùng để đo lường mòn mặt sau sử dụng phương pháp dò tìm cạnh theo ngưỡng độc lập. Quá trình xử lý ảnh động trong khi trục chính mang dao đang quay sẽ tạo ra một hệ thống có triển vọng cho những ứng dụng tự động đo lường mòn mặt sau trong quá trình gia công.

1.2.4.2. Các phương pháp xác định gián tiếp

Trong thực tế có rất nhiều phương pháp gián tiếp để xác định tuổi bền dụng cụ như: phân tích tín hiệu phát xạ âm thanh (Acoustic Emission - AE) [48][61], đo lực cắt [9], đo mô men xoắn của trục chính [68], giá trị nhám bề mặt [8][90],... Mỗi phương pháp có ưu - nhược điểm, khả năng triển khai, trang bị công nghệ và độ chính xác rất khác nhau.

Theo ISO 8688-2/1989, giá trị nhám bề mặt sau gia công hoàn thiện bởi những loại dụng cụ cắt khác nhau là rất khác nhau, $R_a = 7.5\mu\text{m}$ đối với dụng cụ cacbit, $R_a = 6.0\mu\text{m}$ đối với dụng cụ thép gió, $R_a = 3.0\mu\text{m}$ đối với dụng cụ gôm. Bhuiyan [21] đã khảo sát sự thay đổi của lượng mòn mặt sau VB cùng độ

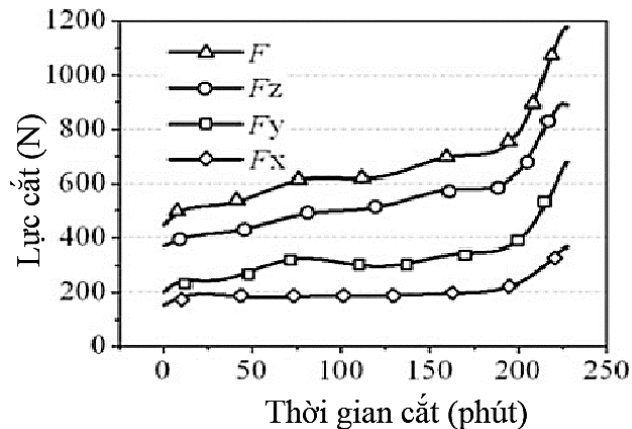
nhám bề mặt R_a (chi tiết gia công) theo tuổi bền của dụng cụ ứng với điều kiện gia công nhất định. Giá trị nhám bề mặt và lượng mòn mặt sau cùng được đo cùng thời điểm (điểm đo A, B, C, D và E trên hình 1.19). Hình 1.19-b thể hiện khuynh hướng của đường cong nhám bề mặt xuất hiện giống như của lượng mòn mặt sau theo ba giai đoạn. Như vậy, mặc dù không có một ngưỡng giá trị cụ thể của giá trị nhám bề mặt để xác định tuổi bền, nhưng căn cứ theo tốc độ thay đổi giá trị nhám theo thời gian gia công cũng là căn cứ để xác định thời điểm hết tuổi bền của dụng cụ [8].



Hình 1.19 Lượng mòn VB và nhám bề mặt thay đổi theo thời gian [21]

Phương pháp phân tích tín hiệu phát xạ âm thanh (Acoustic Emission-AE) là một trong những phương pháp giám sát mòn dụng cụ hiệu quả nhất. Phương pháp này thường được sử dụng trong những hệ thống giám sát tình trạng dụng cụ TCM “trong-quá trình” (in-process). Tín hiệu phát xạ AE là một sóng âm hoặc sóng ứng suất lan truyền trong vật liệu khi năng lượng biến dạng được giải phóng tức thời. Tần số sóng âm phát xạ ($\geq 100 \text{ kHz}$) lớn hơn nhiều lần tần số rung động máy và độ ồn của môi trường nên không ảnh hưởng đến kết quả đo lường. Sử dụng phương pháp phân tích AE kết hợp với mạng nơ-ron nhân tạo có thể dự đoán chính xác những biến đổi phi tuyến của lượng mòn dụng cụ [61]. Lĩnh vực ứng dụng rộng rãi nhất của phương pháp này là trong gia công cao tốc, đòi hỏi quá trình thu thập và xử lý dữ liệu mòn dao với tốc độ nhanh để kịp thời điều khiển chính xác máy gia công.

Các nghiên cứu về mối quan hệ giữa lực cắt và tuổi bền dụng cụ cho thấy rằng lực cắt là tổng hợp của các lực do hình thành phoi và cọ xát do mòn mặt sau. Khi dụng cụ cắt bị mòn mặt sau, lực ma sát tại vùng phân giới dụng cụ - phôi và diện tích tiếp xúc của vùng mòn tăng, kết quả làm tăng đáng kể giá trị lực cắt trong khi gia công.



Hình 1.20 Đồ thị quan hệ lực cắt theo thời gian gia công [81]

Đồ thị quan hệ lực cắt theo thời gian gia công [81] trên hình 1.20 cho thấy khuynh hướng thay đổi lực cắt tổng hợp theo thời gian cắt cũng rất giống quy luật thay đổi lượng mòn mặt sau, rất tương đồng với kết quả nghiên cứu của tác giả [9]. Khi gần đến thời điểm hết tuổi bền dụng cụ thì đường cong lực cắt theo thời gian cắt càng dốc, đó chính là dấu hiệu để giám sát tình trạng mòn hoặc hư hại bất ngờ của dụng cụ cắt. Mở ra hướng xây dựng hệ thống giám sát tình trạng dụng cụ TCM thông qua lực cắt, nhằm hiệu chỉnh các thông số cắt kịp thời để nâng cao tuổi bền dao cắt và chất lượng bề mặt.

1.3. Các nghiên cứu trong và ngoài nước

Bài toán tối ưu về tuổi bền dụng cụ trong hoạt động gia công phay trên máy CNC luôn là đề tài được quan tâm nghiên cứu trước đây, có thể bằng cách lựa chọn thông số chế độ cắt hợp lý, chiến lược trong chương trình gia công hoặc áp dụng các phương pháp tối ưu mới như trí tuệ nhân tạo.

Nâng cao tuổi bền dụng cụ bằng cách lựa chọn hợp lý thông số chế độ cắt là phổ biến và kinh tế nhất do sự đơn giản và dễ dàng triển khai trong điều kiện

gia công sẵn có. Một nghiên cứu trong nước của tác giả Nguyễn Quốc Tuấn [12] đã xem xét về mối quan hệ giữa chế độ cắt và tuổi bền dao phay cầu trong gia công thép hợp kim qua tôi. Nghiên cứu cho thấy dao phay cầu lớp phủ TiAlN có khả năng gia công được thép qua tôi và đã xác định điều kiện tránh gia công tại đỉnh dao, tuy nhiên nghiên cứu này không đưa ra giải pháp cải thiện tuổi bền cụ thể. Các nghiên cứu ngoài nước về vấn đề này thì đa dạng giải pháp hơn. Tác giả Ishan B Shah [77] áp dụng quy hoạch thực nghiệm để xem xét mức độ ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt đến tuổi bền dụng cụ, kết quả cho thấy vận tốc cắt và chiều sâu cắt là hai thông số ảnh hưởng chính đến tuổi bền, khi giảm vận tốc cắt, chiều sâu cắt và tăng lượng tiến dao sẽ đạt tuổi bền dụng cụ cao hơn. Tác giả S.V Kadam [45] cũng đã đề cập nhiều giải pháp nâng cao tuổi bền dụng cụ liên quan đến: vật liệu chế tạo dụng cụ, dạng hình học dụng cụ, thông số chế độ cắt, vật liệu lớp phủ...

Đặc điểm hình học dao phay cầu có cấu tạo rất đặc biệt, ngoài những phương pháp kéo dài tuổi bền đã đề cập như trên còn có các giải pháp khác rất đặc trưng đối với dao phay cầu. Lưỡi cắt dao phay cầu được bố trí trên bề mặt chỏm cầu nên vùng tiếp xúc dao-phôi có sự phân bố khác nhau, phụ thuộc chính vào góc nghiêng trục dao và bề mặt gia công. Tác giả Chen [25] đã nghiên cứu vận tốc cắt tại vùng tiếp xúc của dao-phôi với các góc nghiêng trục dao khác nhau, thấy rằng góc nghiêng không chỉ ảnh hưởng lớn đến nhám và topography bề mặt gia công, mà còn ảnh hưởng đến mòn dụng cụ. Tác giả Kang [47] đã nghiên cứu rất chi tiết về sự thay đổi điểm tiếp xúc dao-phôi khi gia công bề mặt tự do, khi gia công dao phay cầu với sự thay đổi của đường chạy dao (tool path) thì vùng tiếp xúc dao-phôi cũng thay đổi. Sự thay đổi này ảnh hưởng đến đặc tính gia công, đặc biệt là vận tốc cắt do bán kính cắt hiệu dụng khác nhau nên cần có biện pháp điều chỉnh thông số chế độ cắt phù hợp để kéo dài tuổi bền dụng cụ. Các nghiên cứu trên làm cơ sở ứng dụng một phương pháp tăng tuổi bền là áp dụng dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc. Hiện tại trong nước vẫn

chưa có nghiên cứu nào đề cập đến phương pháp này, nước ngoài cũng có một số nghiên cứu liên quan nhưng chưa đưa ra một giải pháp cụ thể nào.

Hiện nay trong nước cũng có những nghiên cứu về ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong tối ưu quá trình gia công cơ khí, như: Tối ưu hoá chế độ cắt và góc nghiêng dao phay cầu sử dụng giải pháp trí tuệ nhân tạo và giải thuật PSO [14], tối ưu hoá đa mục tiêu khi phay cao tốc sử dụng thuật toán PSO [2], hoặc một nghiên cứu khái quát nhất hiện trạng ứng dụng công cụ tin học với các thuật toán kiểm tối ưu cho phép giải các bài toán phức tạp hơn, tin cậy hơn [5]. Tuy nhiên, ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong lĩnh vực tối ưu tuổi bền ở trong nước vẫn còn rất hạn chế, chưa được quan tâm và phát triển, nhưng tại các nước phát triển lại được nghiên cứu rộng rãi. Nhằm đánh giá về độ chính xác dự đoán, tác giả Palanisamy [64] đã tiến hành thí nghiệm và dự đoán lượng mòn dao bằng hai mô hình: hồi quy và mạng nơ-ron nhân tạo. Kết quả mạng nơ-ron nhân tạo cho dự đoán chính xác hơn so với mô hình hồi quy và được đề xuất làm một phương pháp dự đoán mòn để biết rằng dụng cụ cắt có khả năng gia công bao lâu khi điều chỉnh chế độ cắt bị ràng buộc bởi điều kiện gia công cụ thể. Nghiên cứu này rất có ý nghĩa khi xây dựng hệ thống giám sát dụng cụ trong xây dựng hệ thống gia công tự động năng suất cao trong tương lai.

Tác giả Chao [23] đã sử dụng mô hình mạng nơ-ron lan truyền ngược (Backpropagation Neural Network Method - BNNM) trong dự đoán tuổi bền dụng cụ cho giá trị dự đoán chính xác, khả năng giải quyết những bài toán kỹ thuật phức tạp. Tác giả Zhang [104] dự đoán tuổi bền dụng cụ bằng BNNM đã được tối ưu bởi thuật toán di truyền, kết quả tăng độ chính xác dự đoán khoảng 5% so với BNNM tiêu chuẩn. Qua những nghiên cứu trên cho thấy cách tiếp cận sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo trong thiết lập mối quan hệ thực nghiệm sẽ cho kết quả dự đoán cao hơn các phương pháp dự đoán truyền thống. Theo lịch sử phát triển của các mô hình dự đoán thì mạng nơ-ron nhân tạo có thể xem là công cụ dự đoán phổ biến nhất hiện nay, nếu kết hợp với các mô hình khác tạo thành mô hình dự đoán lai (Hybrid model) sẽ càng cải thiện độ chính xác.

Qua tìm hiểu các nghiên cứu trong và ngoài nước thấy rằng nghiên cứu về các giải pháp nâng cao tuổi bền dao phay cầu cũng rất được quan tâm, tuy nhiên hướng nghiên cứu về ứng dụng phương pháp dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc ít được nghiên cứu. Vì vậy mục tiêu của luận án là mong muốn giải quyết bài toán tối ưu tuổi bền của dao phay cầu trong điều kiện gia công trên máy phay CNC 5 trục theo hướng ứng dụng phương pháp tối ưu quy hoạch thực nghiệm Taguchi và sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo tăng độ chính xác dự đoán hỗ trợ cho giải pháp nâng cao tuổi bền bằng dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc. Hướng tới tự phát triển một phần mềm hỗ trợ giải pháp làm công cụ tiện ích phục vụ cho thực tế sản xuất trong tương lai tại Việt Nam.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

- Dao phay cầu có thể định hướng chuyển động theo nhiều cách khác nhau, từ đó làm cơ sở tính toán vận tốc cắt hiệu dụng – một thông số ảnh hưởng chính đến tuổi bền. Ngoài các thông số chế độ cắt chính còn có thông số định hướng chuyển động và góc nghiêng ảnh hưởng đến tuổi bền dao phay cầu.
- Có nhiều chỉ tiêu để xác định tuổi bền dụng cụ, trong đó lượng mòn mặt sau được sử dụng phổ biến và cho độ chính xác cao. Tuổi bền có thể được xác định bằng phương pháp trực tiếp hoặc gián tiếp.
- Các nghiên cứu trong và ngoài nước có rất ít nghiên cứu về phương pháp dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc để nâng cao tuổi bền dao phay cầu, làm cơ sở cho nghiên cứu của luận án tiếp cận phương pháp này.

Chương 2

QUY HOẠCH THỰC NGHIỆM TAGUCHI VÀ PHƯƠNG PHÁP DỰ ĐOÁN BẰNG MẠNG NƠ-RON NHÂN TẠO

2.1. Quy hoạch thực nghiệm Taguchi và phân tích phương sai ANOVA

2.1.1. Quy hoạch thực nghiệm Taguchi

Quy hoạch thực nghiệm Taguchi là một phương pháp tối ưu hóa thực nghiệm được phát triển bởi kỹ sư - nhà thống kê Genichi Taguchi người Nhật Bản. Phương pháp kỹ thuật chất lượng (the Quality Engineering Method) do Taguchi đề xuất ra được gọi là “phương pháp Taguchi”, phương pháp này là một chiến lược thí nghiệm mới bởi vì ông sử dụng một dạng quy hoạch thực nghiệm được hiệu chỉnh và tiêu chuẩn hóa. Taguchi đã tiêu chuẩn hóa và tạo ra các mảng trực giao đặc biệt, mỗi loại sẽ ứng với một số trường hợp thí nghiệm. Taguchi cũng đã giới thiệu một phương pháp mới để phân tích kết quả, đó là thông qua tỷ số tín hiệu/nhiều (Signal to Noise Ratio – S/N) hay gọi là “độ sạch tín hiệu” để phân tích các kết quả lặp lại giúp cho các thí nghiệm loại trừ ảnh hưởng của các yếu tố không điều khiển được. Phương pháp Taguchi là một dạng của quy hoạch thực nghiệm, nhưng đã được cải tiến nhằm đơn giản hóa các quy trình sử dụng. Phương pháp này sử dụng các mảng trực giao được tiêu chuẩn hóa, số lượng các thí nghiệm được rút gọn rất đáng kể so với nguyên bản là thiết kế nhân tố đầy đủ (Full Factorial Design - FFD).

Tâm điểm của phương pháp Taguchi là đã định nghĩa được khái niệm khá mơ hồ và khó nắm bắt, đó là “chất lượng”, đúng như câu nói kinh điển của ông: *“Chất lượng là sự tránh tổn thất tài chính sau khi sản phẩm được xuất xưởng”* (Quality is the avoidance of financial loss after the product is shipped out). Tổn thất được đo bằng đơn vị tiền tệ và có liên quan đến đặc tính sản phẩm có thể định lượng. Hàm tổn thất là một hàm bậc hai, được định nghĩa như sau:

$$L(y) = k(y - y_0)^2 \quad (2.1)$$

trong đó: L : tổn thất tính theo đơn vị tiền tệ,
 y_0 : giá trị mong muốn của đặc tính,

y : giá trị thực tế của đặc tính,

k : hằng số phụ thuộc.

Từ công thức (2.1) trên rút ra được kết luận sau:

- Khi đặc tính của sản phẩm càng xa giá trị mục tiêu thì càng làm tổn thất nhiều hơn, về "0" khi đặc tính sản phẩm tiến tới giá trị mục tiêu.
- Tổn thất là một hàm liên tục chứ không đứt gãy đột ngột như hàm tổn thất truyền thống. Một sản phẩm nằm trong giới hạn tiêu chuẩn không có nghĩa là sản phẩm đó có chất lượng tốt.

Tổn thất trung bình trên một đơn vị sản phẩm được biểu diễn như sau:

$$L(y) = \frac{1}{n} [k(y_1 - y_0)^2 + k(y_2 - y_0)^2 + \dots + k(y_n - y_0)^2] \quad (2.2)$$

trong đó: $y_1, \dots, y_n$: giá trị thực của đặc tính sản phẩm thứ 1, ..., n
 n : số lượng sản phẩm lấy mẫu

Từ công thức (2.2) có thể được biểu diễn rút gọn như công thức (2.2):

$$L(y) = k \left[\frac{1}{n} ((y_1 - y_0)^2 + \dots + (y_n - y_0)^2) \right] = k(\text{MSD}) \quad (2.3)$$

trong đó: MSD là độ lệch trung bình bình phương (mean square deviation).

Phương pháp Taguchi không sử dụng giá trị trung bình y_{tb} cho các tính toán như phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) mà thay vào đó là tính theo giá trị tỷ số S/N. Công thức tính toán tỷ số S/N (đơn vị đề-xi-Ben - dB) được thiết lập tương ứng với ba đặc tính như sau:

$$S/N = -10\log(\text{MSD}) \quad (\text{dB}) \quad (2.4)$$

1) Đối với mục tiêu "đánh nghĩa là tốt nhất":

$$\text{MSD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2 \quad (2.5)$$

2) Đối với mục tiêu "nhỏ hơn thì tốt hơn" tức giá trị $\bar{y} = 0$:

$$\text{MSD} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (2.6)$$

3) Đối với mục tiêu "lớn hơn thì tốt hơn":

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (2.7)$$

Trong phân tích Taguchi sử dụng tỷ số S/N thay cho giá trị trung bình để quá trình đánh giá kết quả chính xác hơn:

- Sử dụng tỷ số S/N sẽ giúp lựa chọn được bộ thông số tối ưu dựa trên cơ sở độ phân tán ít nhất của các giá trị xung quanh giá trị mong muốn và giá trị trung bình gần nhất với giá trị mong muốn.
- Sử dụng tỷ số S/N giúp so sánh cả hai thông tin về giá trị trung bình gần nhất với giá trị mong muốn và độ lệch của các giá trị quanh giá trị mong muốn.

Sử dụng tỷ số S/N sẽ giúp lựa chọn được bộ thông số tối ưu dựa trên cơ sở độ phân tán ít nhất quanh giá trị mong muốn và giá trị trung bình gần giá trị mong muốn nhất. Theo đặc tính của tỷ số S/N, nếu nhiều càng ít thì giá trị tỷ số S/N càng lớn và ngược lại, nên có thể dùng giá trị tỷ số S/N đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố không điều khiển được.

Hiện nay, phương pháp Taguchi được sử dụng rộng rãi trong thiết kế công nghiệp. Các thí nghiệm được thực hiện theo các bảng trực giao được đưa ra trên nguyên tắc là cặp trạng thái của các yếu tố điều khiển trong hai cột bất kì có xác suất xuất hiện như nhau. Mặt khác, thông qua tỷ số S/N giúp những nhà công nghệ biết xu hướng và mức độ ảnh hưởng của từng thông số công nghệ đến kết quả đầu ra. Từ đó nhanh chóng tìm ra các thông số công nghệ và phạm vi cần tác động để nhận được hiệu quả đầu ra tốt nhất. Trên cơ sở đánh giá ảnh hưởng riêng lẻ các thông số có thể tìm ra được tổ hợp các thông số công nghệ tối ưu cho kết quả của đặc tính đầu ra mong muốn [6].

2.1.2. Phân tích phương sai ANOVA

Phương pháp phân tích phương sai (Analysis of Variance - ANOVA) là một kỹ thuật thống kê cho phép định lượng ảnh hưởng tương đối của các yếu tố và tầm quan trọng của chúng tới hàm mục tiêu, nó được sử dụng để phân tích

mức độ ảnh hưởng của từng yếu tố đến hàm mục tiêu. Phân tích phương sai đã là một công cụ phân tích được sử dụng trong thống kê phân tách biến thiên quan sát tổng hợp được tìm thấy bên trong một tập dữ liệu được chia thành hai phần: các yếu tố hệ thống và các yếu tố ngẫu nhiên. Sử dụng phương pháp phân tích phương sai ANOVA để xác định ảnh hưởng của các biến độc lập đối với biến phụ thuộc trong nghiên cứu hồi quy.

2.1.2.1. Bậc tự do

Bậc tự do là thước đo lượng thông tin của từng phần tử đơn trong tập hợp dữ liệu. Giả sử một yếu tố A có 4 mức, A1 có thể so sánh được với A2, A3 và A4 mà không thể so sánh được với chính nó. Như vậy một yếu tố 4 mức sẽ có bậc tự do bằng 3. Bậc tự do có thể mở rộng ra cho toàn bộ thí nghiệm, thí nghiệm có n phép thử và r lần lặp lại trong một phép thử, như vậy cần tiến hành N thí nghiệm, với $N = n.r$. Công thức tính toán số bậc tự do như sau:

$$\begin{cases} f_T = N - 1 \\ f_i = k_i - 1 \\ f_e = f_T - \sum f_i \end{cases} \quad (2.8)$$

trong đó: f_T : Tổng số bậc tự do; N : số thí nghiệm;

f_i : Bậc tự do của yếu tố i ; k_i : số mức của yếu tố i ;

f_e : Bậc tự do của sai số.

2.1.2.2. Tổng bình phương sai lệch

Trong phân tích dữ liệu thống kê, tổng toàn bộ bình phương đại lượng xuất hiện như một phần của phương thức chính tắc trong việc thể hiện kết quả của phân tích đó. Nó được định nghĩa là tổng, của toàn bộ các quan trắc, của bình phương độ sai lệch của mỗi quan trắc so với giá trị trung bình chung.

$$S_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.9)$$

trong đó: y_i : giá trị thí nghiệm thứ i ,

$\bar{y}$: giá trị trung bình các thí nghiệm

Tổng bình phương sai lệch từ giá trị mục tiêu y_0 được tính theo (2.10):

$$S_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 + n(\bar{y} - y_0)^2 \quad (2.10)$$

2.1.2.3. Phương sai của một yếu tố

Là phép đo mức chênh lệch giữa các số liệu của một tập dữ liệu trong thống kê. Nó đo khoảng cách giữa mỗi số liệu với nhau và đến giá trị trung bình của tập dữ liệu. Phương sai tổng quát được tính như sau:

$$V_T = \frac{\text{Tổng bình phương sai lệch}}{\text{Bậc tự do}} = \frac{S_T}{f_T} \quad (2.11)$$

Phương sai của từng yếu tố cũng được tính bằng tổng bình phương sai lệch của thí nghiệm có mặt yếu tố đó, chia cho bậc tự do của yếu tố:

$$V_A = \frac{S_A}{f_A}; V_B = \frac{S_B}{f_B}; \dots; V_N = \frac{S_N}{f_N} \quad (2.12)$$

Phương sai của sai số

$$V_e = \frac{S_T - (S_A + S_B + \dots + S_N)}{f_T - (f_A + f_B + \dots + f_N)} = \frac{S_e}{f_e} \quad (2.13)$$

2.1.2.4. Mức độ ảnh hưởng của yếu tố

Mỗi yếu tố đầu vào đều ảnh hưởng tác động đến yếu tố đầu ra thể hiện mức độ ảnh hưởng của yếu tố làm thay đổi giá trị đầu ra, mức độ ảnh hưởng của nhiều làm sai lệch đầu ra. Mức độ ảnh hưởng của yếu tố tính theo (2.14):

$$P_i = \frac{S_i}{S_T} * 100(\%) \quad (2.14)$$

trong đó: P_i là ảnh hưởng của yếu tố i đến yếu tố đầu ra

S_i là tổng bình phương sai lệch của yếu tố i .

Ảnh hưởng của yếu tố nhiều cũng có thể được tính theo (2.15):

$$P_e = \frac{S_e}{S_T} * 100(\%) \quad (2.15)$$

Mức độ ảnh hưởng của yếu tố có ý nghĩa lớn đến quyết định giá trị của các yếu tố điều khiển. Theo công thức (2.14) thì mức độ ảnh hưởng được thể

hiện theo phần trăm, giá trị phần trăm phân bố ảnh hưởng lớn thể hiện mức độ ảnh hưởng lớn của yếu tố đến đầu ra. Ngược lại nếu phần trăm phân bố nhỏ ($\leq 2\%$) thì có thể coi yếu tố đó là một tác động của nhiễu đến đầu ra, việc điều khiển yếu tố này không có hiệu quả. Sau khi phân tích, nếu giá trị phần trăm ảnh hưởng của yếu tố nhiễu quá lớn thì cần xem xét lại quá trình thí nghiệm có bị ảnh hưởng bởi yếu tố không điều khiển khác chưa được nhận biết hay không, từ đó có biện pháp khắc phục hợp lý.

2.2. Các phương pháp dự đoán dùng trong lĩnh vực gia công cơ khí

2.2.1. Các loại mô hình dự đoán

Mô hình dự đoán (prediction modeling) là một kỹ thuật thống kê thường được sử dụng để dự đoán hành vi trong tương lai. Giải pháp mô hình dự đoán là một dạng công nghệ khai thác dữ liệu hoạt động (data mining) bằng cách phân tích dữ liệu quá khứ và hiện tại, đồng thời tạo ra một mô hình để giúp dự đoán kết quả trong tương lai. Nhìn chung, các mô hình được phân thành ba loại: mô hình thực nghiệm (experimental models), mô hình phân tích (analytical models) và mô hình cơ sở Trí tuệ nhân tạo (Artificial Intelligent - AI). Các mô hình phân tích và thực nghiệm có thể được phát triển bằng cách sử dụng các phương pháp tiếp cận thông thường như kỹ thuật hồi quy (regression technique). Trong khi, các mô hình dựa trên AI được phát triển bằng cách sử dụng các phương pháp tiếp cận phi truyền thống như mạng nơ-ron nhân tạo (Artificial Neural Network - ANN) [101].

Phân tích hồi quy: là một phân tích thống kê để xác định xem các biến độc lập (biến thuyết minh) quy định các biến phụ thuộc (biến được thuyết minh) như thế nào. Đây là một phương pháp thống kê mà giá trị kỳ vọng của một hay nhiều biến ngẫu nhiên được dự đoán dựa vào điều kiện của các biến ngẫu nhiên (đã tính toán) khác. Cụ thể, có hồi qui tuyến tính, hồi qui lôgic, hồi qui Poisson và học có giám sát. Trong các bài toán liên quan đến gia công cơ khí, kỹ thuật hồi quy thường hay được sử dụng để ước lượng giá trị của biến phụ thuộc với giá trị đã cho của biến độc lập, kiểm định giả thiết về bản chất sự phụ thuộc hoặc dự đoán giá trị trung bình của biến phụ thuộc khi biết giá trị biến độc lập. Kỹ

thuật phân tích hồi quy có ưu điểm là sử dụng số liệu trong quá khứ nghiên cứu để xác định và khoảng vùng phạm vi nghiên cứu và đạt độ chính xác cao nếu có nhiều mẫu nghiên cứu để phân tích. Hiện nay, nhiều công cụ hỗ trợ tính toán phân tích hồi quy trên phần mềm Matlab[®], MiniTab[®] hoặc SPSS[®].

Học máy (Machine Learning): hiểu đơn giản là tập hợp các phương pháp, các giải thuật khiến cho máy tính có thể tự “học”, tự “suy nghĩ” và đưa ra các quyết định giống như con người. Chính vì lý do đó người ta xếp Machine Learning thuộc vào phạm vi của lĩnh vực “Trí tuệ nhân tạo”. Mạng nơ-ron nhân tạo ANN là một trong những mô hình tính toán mạnh mẽ nhất, được kiểm chứng qua nhiều công trình nghiên cứu của nhiều lĩnh vực khác nhau, dùng để mô hình hóa các mối quan hệ phức tạp không thể biểu diễn bằng mô hình vật lý. Lựa chọn số lượng nơ-ron, số lớp ẩn, hàm truyền hoặc thuật toán huấn luyện là rất quan trọng để thu được kết quả tốt.

Sự khác biệt giữa mô hình hồi quy và mô hình ANN chủ yếu nằm ở các vùng phi tuyến. Mô hình ANN có thể được sử dụng như một phương pháp hiệu quả và thay thế cho các nghiên cứu thực nghiệm mà mô hình toán học (như mô hình hồi quy) không thể giải quyết được.

2.2.2. Dự đoán tuổi bền dụng cụ

Trong hoạt động gia công cắt gọt, việc phát hiện được diễn biến của mòn dao cắt trước khi bị phá hủy là rất quan trọng, vì khi xảy ra vết gãy của dụng cụ cắt sẽ ảnh hưởng đến độ chính xác của chi tiết gia công và thời gian gia công, giảm thời gian dừng không của máy. Trước đây, một phương pháp dự đoán tuổi bền dao phay cầu thông qua nhiệt độ cắt bằng tính toán theo lý thuyết được thực hiện bởi Arsecularatne [15] vào năm 1996, khi mà các kỹ thuật dự đoán chưa có nhiều. Thông thường để xác định tuổi bền dụng cụ thì phải lên kế hoạch thực hiện từng thí nghiệm gia công cho đến khi hết tuổi bền dụng cụ bằng cách xác định giá trị mòn mặt sau. Tuy nhiên, do hạn chế về thời gian và vật liệu thí nghiệm, người ta quyết định áp dụng phương pháp kiểm tra tuổi bền dụng cụ nhanh được phát triển bởi Taylor, cho phép xác định tuổi bền của dao bằng kỹ

thuật hồi quy tuyến tính. Sau đó dùng các giá trị mòn mặt sau VB từ thí nghiệm để tính toán đường T-V, làm công cụ dự đoán tuổi bền cho các thí nghiệm khác.

Sử dụng các công cụ dự đoán bằng trí tuệ nhân tạo, Shafiq [76] đề xuất một số cấu trúc của mạng nơ-ron lan truyền ngược một lớp và nhiều lớp để dự đoán sự phát triển mòn của dụng cụ. Tuy nhiên rất khó để xác định cấu trúc mạng nơ-ron nào cho giá trị dự đoán tốt nhất, vì thế sử dụng phân tích hồi quy và sai số phần trăm tuyệt đối trung bình (Mean Absolute Percentage Error - MAPE) để đánh giá hiệu suất dự đoán của cấu trúc ANN. Cấu trúc ANN (là số lượng các nơ-ron trong lớp ẩn) nào có giá trị hệ số hồi quy (regression coefficient) $R^2 \approx 1$ hoặc giá trị MAPE nhỏ nhất sẽ được chọn là cấu trúc tốt nhất cho dự đoán mòn dụng cụ.

Một hệ thống giám sát thông minh được Haber [40] đề xuất trên cơ sở mô hình ANN dùng ước lượng lượng mòn dụng cụ trực tuyến. Để dự đoán độ mòn của dụng cụ, sai số dư (residual errors) được sử dụng làm cơ sở cho thuật toán ra quyết định. Quy trình liên tục kiểm tra xem một chỉ số nhất định (điều kiện công cụ) có vượt quá ngưỡng tới hạn hay không, chỉ số vượt ngưỡng được hiểu là chỉ ra độ mòn dụng cụ không thể chấp nhận được cần phải thay thế dụng cụ ngay lập tức. Mô hình đã làm việc tốt và chứng minh tính hiệu quả trong quá trình phay thực tế. Cùng mô hình giám sát trực tuyến, Chen [24] cũng đề xuất hệ thống dự đoán lượng mòn dụng cụ sử dụng mô hình mạng truyền thẳng lan truyền ngược (Feed Forward BackPropagation – FFBP). Sử dụng phương pháp này, hệ thống có thể dự đoán lượng mòn với sai số nhỏ nhất (khoảng $\pm 0.037\text{mm}$) so với giá trị mòn thực tế.

Tác giả Zuperl [106] đã tích hợp một bộ tối ưu tốc độ tiến dao ngoại tuyến và hệ thống điều khiển thích nghi lực cắt vào quá trình phay trên máy CNC. Hệ thống vẫn đảm bảo tốc độ bóc tách vật liệu cao trong khi vẫn giữ quá trình cắt trong điều kiện mong muốn. Hệ thống đã thay tốc độ tiến dao cho phù hợp với tốc độ trục chính và dừng gia công khi lực cắt tăng quá cao, đảm bảo tối thiểu lượng mòn dụng cụ trong khi vẫn đảm bảo chất lượng bề mặt.

Palanisamy [64] kết hợp hai mô hình khác nhau: hồi quy toán học và mô hình ANN để ước lượng mòn dụng cụ. Thí nghiệm được tiến hành để đo lượng mòn dụng cụ khi phay thép AISI 1020 với dao phay cacbit. Kết quả thí nghiệm được phân tích bằng phần mềm 6-Sigma để tìm các hệ số cho mô hình hồi quy và dùng huấn luyện mạng nơ-ron nhân tạo. Cả hai mô hình đều được dùng dự đoán lượng mòn dụng cụ và thấy rằng mô hình ANN đạt độ chính xác và hiệu quả hơn so với mô hình hồi quy.

2.2.3. Dự đoán chất lượng bề mặt gia công

Chất lượng bề mặt chi tiết là một chỉ tiêu rất quan trọng đối với quá trình gia công, nhất là ở giai đoạn gia công tinh. Vì vậy rất nhiều nghiên cứu đề cập đến xây dựng mô hình dự đoán độ nhám bề mặt sử dụng kỹ thuật mạng nơ-ron nhân tạo, đạt độ chính xác dự đoán ngày càng hoàn thiện. Các mô hình dự đoán được xây dựng khá đa dạng với nhiều thông số đầu vào khác nhau nhằm đánh giá ảnh hưởng đến thông số đầu ra là độ nhám bề mặt.

Tsai [88] xây dựng một hệ thống dự đoán trực tuyến sử dụng mạng nơ-ron lan truyền ngược với bốn thông số: tốc độ quay trục chính, tốc độ tiến dao, chiều sâu cắt và độ rung động trung bình trong một vòng quay (Vibration Average Per Revolution (VAPR)) cho đầu vào và giá trị nhám bề mặt R_a cho đầu ra của mạng. Kết quả cho thấy mô hình ANN đề xuất đạt độ chính xác cao (từ 96 đến 99%) cho dự đoán độ nhám của các bộ đầu vào kết hợp của nhiều thông số cắt khác nhau. Hệ thống này cũng tiết kiệm, hiệu quả và có thể được thực hiện mục tiêu dự đoán độ nhám bề mặt ngay trong quá trình (in-process) bằng cách truy xuất các trọng số (được tạo ra từ quá trình huấn luyện và thử nghiệm bởi mạng nơ-ron nhân tạo), đưa ra phản hồi cho người vận hành khi cần thực hiện hành động cần thiết.

Thông thường, kỹ thuật đo độ nhám trực tiếp bằng tay, ngoại tuyến được sử dụng để đánh giá độ nhám bề mặt và chất lượng chi tiết, điều này được cho là rất tốn thời gian và chi phí. Vì lý do đó, hệ thống độ nhám bề mặt cơ sở mạng nơ-ron Pokayoke (Neural Network - Based Surface Roughness Pokayoke NN-SRPo) được phát triển để duy trì độ nhám bề mặt trong một giá trị mong muốn

ngay trong quá trình gia công. Huang [41] đã xây dựng hệ thống dự đoán trực tuyến để thích nghi với thay đổi độ nhám bề mặt nhờ điều chỉnh lượng tiến dao khi độ nhám bề mặt hiện tại lớn hơn giá trị mong muốn trong lúc gia công. Một mạng nơ-ron lan truyền ngược được áp dụng với cấu trúc 5-8-7-1 đạt được độ chính xác khoảng 90%. Khó khăn hiện tại của nghiên cứu này là tích hợp phần mềm vào bộ điều khiển máy CNC và tương lai phát triển thành công sẽ giảm thời gian dự đoán độ nhám và thích nghi việc điều chỉnh thông số cắt trực tuyến.

Benardos [20] sử dụng mạng nơ-ron lan truyền ngược BP được huấn luyện với thuật toán Levenberg-Marquard, với số lượng đầu vào lớn: chiều sâu cắt, lượng tiến dao, tốc độ cắt, mòn dụng cụ, điều kiện trôn nguội và ba lực cắt thành phần. Nghiên cứu đã cho kết quả dự đoán với sai số trung bình bình phương khoảng 1.86%. Để khẳng định sức mạnh của ANN, Erdurumlu [35] đã thực hiện so sánh kết quả dự đoán độ nhám bề mặt bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface Methodology – RSM) và mạng nơ-ron truyền thẳng lan truyền ngược FFBP, kết quả là FFBP cho dự đoán chính xác hơn nhiều so với mô hình RSM trong cùng điều kiện gia công. Ngoài ra, trong nghiên cứu của Zain [100], Rashid [71] cũng tiến hành so sánh hồi quy đa biến và ANN trong dự đoán độ nhám bề mặt đã kết luận mô hình ANN chính xác hơn nhiều so với hồi quy đa biến.

Mạng nơ-ron nhân tạo cũng được kết hợp với thuật toán di truyền GA để tối ưu hóa các điều kiện gia công và dự đoán độ nhám bề mặt, cùng với hồi quy đa biến và phân tích phương sai để nghiên cứu ảnh hưởng của điều kiện gia công đến độ nhám bề mặt [60]. Kết hợp phương pháp GA và mạng nơ-ron nhân tạo lan truyền ngược BP-ANN đã giảm thiểu 20% thời gian gia công và sai số kết quả dự đoán so với kết quả thí nghiệm kiểm chứng là 3.27%. Từ những kết quả này, có thể dễ dàng nhận ra rằng nghiên cứu được phát triển là đáng tin cậy và phù hợp để giải quyết các vấn đề khác gặp phải trong các hoạt động cắt kim loại, là độ nhám bề mặt trong hoạt động gia công.

2.2.4. Dự đoán lực cắt khi phay

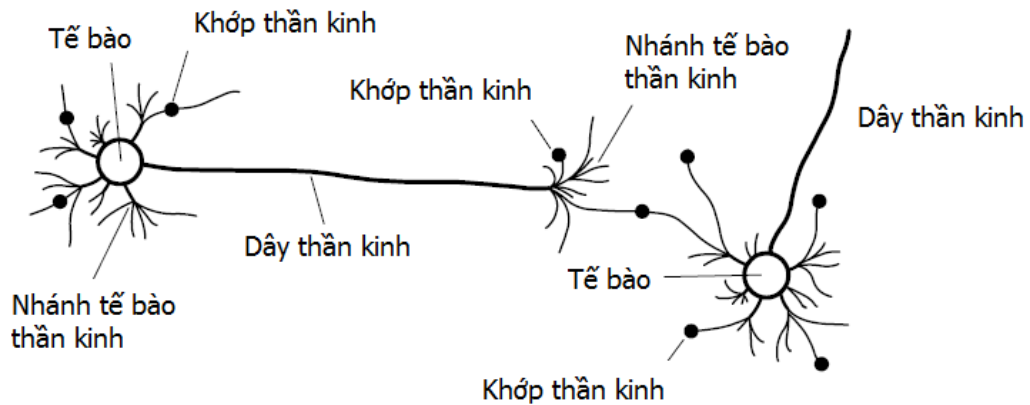
Mục tiêu trong hoạt động gia công sản xuất là tạo ra những sản phẩm chất lượng cao với chi phí gia công thấp. Nhưng nếu không kiểm soát lực cắt, lực

cắt tăng trong quá trình gia công sẽ làm tiêu tốn nhiều công suất máy và ảnh hưởng chất lượng bề mặt, do đó chi phí gia công cũng tăng cao. Vì vậy đã nhiều mô hình dự đoán lực cắt sử dụng ANN cũng được áp dụng rộng rãi. Mô hình mạng nơ-ron sử dụng mô hình mạng FFBP phổ biến trong dự đoán lực cắt, như: V. Tandon [85] xây dựng mô hình dự đoán lực cắt từ tám biến đầu vào cho quá trình phay bằng dao phay trụ, kết quả dự đoán đạt độ chính xác cao so với kết quả đo lực thí nghiệm; Briceno [22] kết hợp ANN và DOE (Design Of Experiments – DOE) để tăng hiệu quả trong hệ thống bởi giảm số thí nghiệm cần thiết cho huấn luyện. Phương pháp tối ưu bầy đàn (particle swarm optimization - PSO) sử dụng kết quả dự đoán từ ANN nhằm tối ưu các điều kiện gia công, kết quả thời gian gia công giảm đến 36% [86]. Mô hình ANN cho dự đoán lực cắt được El-Mounayri [33] xây dựng đối với quá trình phay bằng dao cầu, sử dụng mô hình cơ sở bán kính nhằm tận dụng ưu điểm về tốc độ hội tụ, tác giả đã áp dụng mô hình trực tuyến quá trình phay và cho kết quả tốt với sai số chỉ 3%. Ngoài ra, các bộ điều khiển lực cắt dùng trong điều khiển thích nghi cũng sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo và lượng tiến dao sẽ được hiệu chỉnh trực tuyến nhằm giảm thiểu mòn dao, trong khi vẫn đồng thời duy trì được vận tốc cắt bỏ vật liệu. Quá trình cắt được tối ưu thông qua bộ đôi: bộ điều khiển thích nghi và bộ điều khiển NC.

2.3. Mạng nơ-ron nhân tạo trong bài toán dự đoán

2.3.1. Mạng nơ-ron nhân tạo

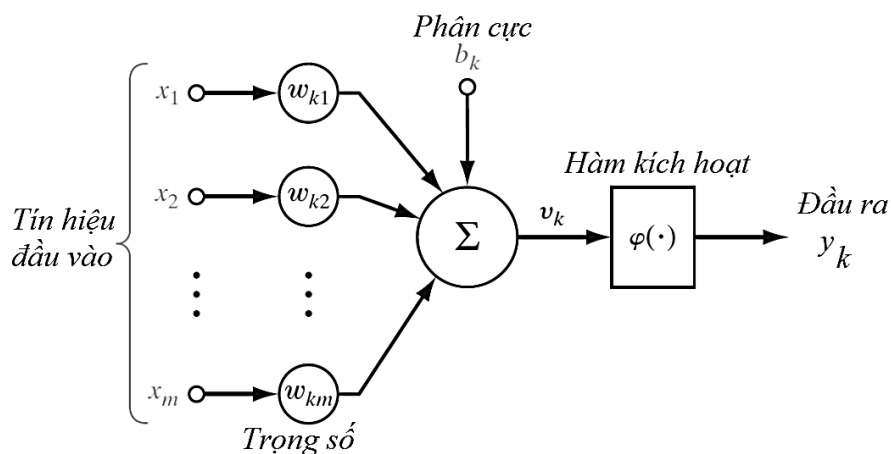
Ý tưởng xây dựng các mô hình mạng nơ-ron nhân tạo bắt nguồn từ việc khám phá ra các cơ chế hoạt động đơn giản của mạng nơ-ron sinh học (biological neural network). Trong hệ thống thần kinh sinh học, nơ-ron tế bào sống và còn là đơn vị lưu trữ cơ bản trong bộ não của con người. Bộ não con người có khoảng 100 tỷ các tế bào này, được gọi là nơ-ron thần kinh. Mỗi nơ-ron có thể kết nối với hơn 200.000 nơ-ron thần kinh khác (hình 2.1). Sức mạnh của tư duy con người đến từ số lượng tuyệt đối những thành phần cơ bản và những mối liên kết giữa chúng, đó là đến từ lập trình di truyền và học tập.



Hình 2.1 Cấu trúc của nơ-ron và liên kết giữa chúng

Các nhà nghiên cứu đã tìm cách chuyển đổi những hiểu biết về cách thức hoạt động của các tế bào thần kinh sinh học thành các mô hình mạng nơ-ron nhân tạo có thể hoạt động được trên máy tính. Hình 2.2 thể hiện mô hình của một nơ-ron đơn lẻ, được xem như đơn vị xử lý thông tin cơ bản của một mạng nơ-ron. Có ba thành phần cơ bản của một mạng nơ-ron:

1. Một tập hợp các khớp thần kinh (synapse) dùng để kết nối các nơ-ron với nhau. Mỗi khớp thần kinh được đặc trưng bởi cường độ liên kết của nó - là trọng số w_{jk} (nơ-ron có nhãn j sang nơ-ron nhãn k).
2. Một bộ cộng (adder) dùng để tổng hợp các tín hiệu đầu vào tại mỗi nơ-ron và gửi kết quả đi tiếp.
3. Một hàm kích hoạt (activation function) dùng để đưa các tín hiệu đầu ra của nơ-ron vào một miền giá trị nhất định hoặc vào một tập hợp các giá trị cố định.



Hình 2.2 Mô hình một nơ-ron nhân tạo

Mô tả hoạt động của nơ-ron bằng các phương trình toán học (2.16) sau:

$$\begin{cases} u_k = \sum_{j=1}^m w_{kj} x_j \\ v_k = u_k + b_k \\ y_k = \varphi(v_k) \end{cases} \quad (2.16)$$

trong đó: $x_1, x_2, \dots, x_m$ là giá trị các tín hiệu đầu vào,

$w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{km}$ là các trọng số tương ứng,

u_k là bộ tổng hợp tuyến tính đầu ra,

b_k là độ lệch, hay phân cực,

$\varphi(.)$ là hàm kích hoạt và y_k là tín hiệu đầu ra nơ-ron.

Hàm kích hoạt đơn giản đầu tiên được McCulloch và Pitts đề xuất là hàm mức (hay là hàm ngưỡng), tức đầu ra chỉ có hai mức "0" và "1" [39]. Sau này, người ta nhận thấy sử dụng hàm truyền cho đầu ra có giá trị liên tục thì tính linh hoạt và phù hợp với các bài toán phi tuyến hơn [29], ví dụ như hàm Sigmoid, hàm Tang, hàm Gaussian, hàm cơ sở bán kính,...

2.3.2. Mạng nơ-ron truyền thẳng đa lớp

Mô hình mạng nơ-ron truyền thẳng (feed-forward neural network) được giới thiệu vào năm 1986 bởi Rumelhart cho thấy sự đột phá về khả năng tổ chức và huấn luyện mạng đa lớp phức tạp. Trong mô hình này, các nơ-ron được tổ chức theo lớp, không có kết nối giữa các nơ-ron cùng lớp và kết nối chỉ tồn tại giữa hai lớp liên tiếp (hình 2.3). Mạng truyền thẳng đa lớp có thể được cấu trúc với đơn vị nơ-ron là McCulloch-Pitts (Perceptron), hàm kích hoạt thường được dùng là hàm Sigmoid. Đặc tính của hàm Sigmoid rất giống các mối quan hệ vào/ra của nơ-ron sinh học và rất được đánh giá cao vì đạo hàm của nó rất dễ tính toán và hữu ích cho các thuật toán huấn luyện.

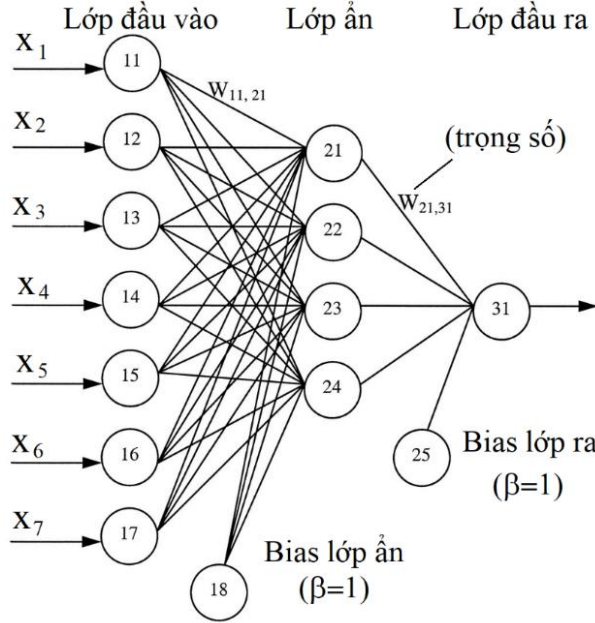
Hàm kích hoạt Sigmoid được biểu diễn theo công thức (2.17) như sau:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}} \quad (2.17)$$

trong đó hằng số $\lambda > 0$ xác định độ dốc của đường cong Sigmoid.

Đối với mạng truyền thẳng một lớp đơn, bộ véc tơ đầu vào (giả sử có J đầu vào) $\bar{x} = (x_1, \dots, x_j, \dots, x_J)$ và véc tơ đầu ra (giả sử có K đầu ra) $\bar{y} = (y_1, \dots, y_k, \dots, y_K)$. Giá trị của mỗi đầu ra k được tính theo công thức (2.18).

$$y_k = f(net_k) = f\left(\sum_{j=1}^J w_{kj}y_j\right) \quad (2.18)$$



Hình 2.3 Mô hình mạng truyền thẳng đa lớp

Đặt $y_j = -1$ và $w_{kj} = \theta_k$ là ngưỡng cho $k = 1, \dots, K$ nơ-ron đầu ra. Với giá trị đầu ra mong muốn $\bar{d} = (d_1, \dots, d_k, \dots, d_K)$ thì hàm sai số được định nghĩa theo công thức (2.19). Quá trình huấn luyện thực chất là quá trình tìm kiếm giá trị trọng số sao cho sai số E_p là nhỏ nhất.

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (d_{pk} - y_{pk})^2 \quad (2.19)$$

trong đó: p là chỉ số huấn luyện, E_p là tổng bình phương sai số đầu ra.

2.3.3. Huấn luyện mạng nơ-ron nhân tạo

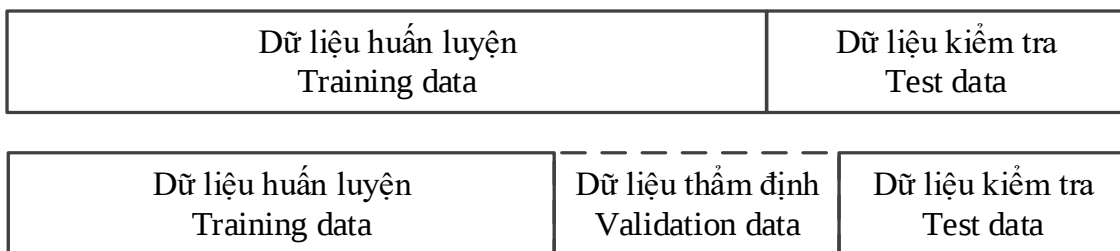
Huấn luyện mạng nơ-ron là quá trình đi tìm giá trị các trọng số kết nối cho các liên kết của mỗi nơ-ron, quá trình này gọi là huấn luyện mạng. Có nhiều thuật toán huấn luyện lan truyền ngược như phương pháp xuống dốc (gradient

descent), thuật toán truyền ngược co giãn (resilient backpropagation) hoặc thuật toán Levenberg-Marquardt.

Lựa chọn số nơ-ron trong lớp ẩn cũng khá quan trọng vì thời gian huấn luyện phụ thuộc rất nhiều vào cấu trúc của mạng. Nếu số lượng nơ-ron quá nhỏ, mô hình trở nên quá cứng nhắc (sai lệch lớn) và không đủ thích ứng, kết quả huấn luyện sẽ ít thay đổi. Nếu số lượng nơ-ron lớp ẩn quá lớn sẽ làm cho mô hình thêm phức tạp, dữ liệu cụ thể sẽ được nội suy chính xác nhưng sự thay đổi của mô hình với những mẫu huấn luyện khác nhau trong cùng một quá trình sẽ rất lớn. Do đó, cần phải tiến hành thiết lập nhiều cấu trúc mạng với số lượng nơ-ron lớp ẩn khác nhau. Sau đó sử dụng tiêu chí đánh giá sự hiệu quả của cấu trúc mạng bằng phân tích hồi quy (Regression analysis) hoặc sai số phần trăm tương đối trung bình MAPE.

Dữ liệu dùng cho huấn luyện thường được chia thành ba nhóm (hình 2.4):

- Nhóm huấn luyện (training) sẽ cung cấp cho mạng nơ-ron nhân tạo thông tin xử lý cần thiết để học từ quá trình;
- Nhóm xác nhận hay thẩm định (validation) phục vụ như một người đánh giá mô hình. Ở một số mô hình huấn luyện, nhóm thẩm định có thể không có, mà sử dụng chính dữ liệu huấn luyện để thẩm định;
- Nhóm kiểm tra (test) là những dữ liệu bổ sung dùng kiểm tra tính đúng đắn cuối cùng của mô hình.



Hình 2.4 Phân chia bộ dữ liệu cho huấn luyện mạng nơ-ron

Cách phân chia bộ dữ liệu thực nghiệm có thể dùng nhiều phương pháp khác nhau, điển hình là hai phương pháp Hold-out và phương pháp Cross Validation. Phương pháp Hold-out phân chia tập dữ liệu thành hai tập độc lập: tập huấn luyện (training set) khoảng 2/3, tập kiểm tra (testing set) khoảng 1/3.

Phương pháp này thích hợp cho các tập dữ liệu nhỏ, nhưng các mẫu có thể không đại diện cho toàn bộ dữ liệu (thiếu lớp trong tập thử nghiệm). Vì thế có thể cải tiến phương pháp lấy mẫu sao cho mỗi lớp được phân bố đều trong cả 2 tập dữ liệu huấn luyện và thử nghiệm. Phương pháp Cross validation phân chia dữ liệu thành k (thường $k = 10$) tập con có cùng kích thước. Tại mỗi vòng lặp sử dụng một tập con là tập thử nghiệm và các tập con còn lại là tập huấn luyện. Nếu tập dữ liệu nhỏ thì k bằng số mẫu trong dữ liệu. Nếu tập dữ liệu lớn thì dùng phương pháp lấy mẫu phân tầng để các lớp trong từng tập con phân bố như trên toàn bộ dữ liệu.

2.3.4. Các thuật toán huấn luyện mạng nơ-ron nhân tạo

Có nhiều thuật toán khác nhau dùng để huấn luyện cho mạng nơ-ron nhân tạo đã được nghiên cứu và ứng dụng rộng rãi như:

Thuật toán học perceptron: là thuật toán học cho mạng nơ-ron đầu tiên (từ năm 1957). Thuật toán sử dụng với một lớp mạng hoạt động, ở đây mỗi nơ-ron có hàm kích hoạt là hàm ngưỡng (threshold). Phạm vi ứng dụng của thuật toán này nhỏ hơn và chủ yếu phù hợp với bài toán phân nhóm có loại dữ liệu khả phân tách tuyến tính (linearly separable).

Thuật toán học luật Delta: thuật toán này là bước phát triển tiếp theo của học perceptron. Chỉ sử dụng trong mạng đơn lớp, với các nơ-ron có hàm kích hoạt là hàm liên tục thay cho hàm ngưỡng. Phổ biến nhất là hàm Sigma đơn cực (unipolar) và lưỡng cực (bipolar). Bởi vì thuật toán chỉ áp dụng được cho mạng đơn lớp nên chủ yếu sử dụng trong các bài toán phân nhóm và nhận dạng.

Thuật toán học lan truyền ngược: là thuật toán học phổ biến nhất cho mạng đa lớp, ra đời từ năm 1974 được sử dụng rộng rãi đến ngày nay. Bởi vì thuật toán có khả năng huấn luyện cho mạng đa lớp nên phạm vi ứng dụng của nó rất lớn như: bài toán xấp xỉ, dự đoán, nhận dạng...

Thuật toán học SOM: được phát triển bởi Kohonen và được xem là loại phổ biến nhất trong các thuật toán học không giám sát. Mạng nơ-ron có dạng bản đồ 2D các điểm nút, mỗi điểm nút biểu diễn một lớp phân tách, nên thích hợp cho các bài toán tìm mối liên hệ hoặc tương tự trong khối dữ liệu.

Thuật toán học mạng mềm (Elastic Network Learning): tương tự như thuật toán học SOM, chỉ khác là mạng không tổ chức như bản đồ 2D các điểm nút mà tổ chức dạng vòng. Ứng dụng phổ biến nhất của thuật toán học này là trong “Bài toán người đi du lịch” (Traveling Salesman Problem).

Nghiên cứu các thuật toán học mạng trên làm cơ sở cho lựa chọn thuật toán học hợp lý cho bài toán dự đoán mà luận án đang đề cập. Bởi sự phổ biến và ứng dụng rộng rãi của thuật toán học lan truyền ngược đối với mạng nơ-ron đa lớp, là cơ sở cho tác giả lựa chọn thuật toán này trong xây dựng công cụ dự đoán phục vụ giải quyết bài toán tối ưu tuổi bền dụng cụ.

2.3.5. Ứng dụng mạng nơ-ron nhân tạo trong bài toán dự đoán

Có nhiều phương pháp dự đoán đã được nghiên cứu như trên dựa trên nhiều mô hình khác nhau: mô hình thực nghiệm, mô hình phân tích và mô hình cơ sở trí tuệ nhân tạo. Hai mô hình thực nghiệm và mô hình phân tích cũng đã đạt được một số thành công nhất định đáng ghi nhận. Tuy nhiên một phương pháp dự đoán đủ tốt và đáp ứng được các yêu cầu thực tế giải quyết bài toán trong gia công cơ khí hiện nay lại là mô hình cơ sở trí tuệ nhân tạo, cụ thể là mạng nơ-ron nhân tạo. Nếu xét về mặt lý thuyết, mạng nơ-ron nhân tạo tương đối độc lập với bản chất của các quá trình vật lý cần phân loại và dự đoán. Khi giải bài toán bằng mạng nơ-ron nhân tạo đều phải thực hiện các bước: thu thập dữ liệu mẫu, tiền xử lý dữ liệu, xác định thông số mạng và huấn luyện, do đó dễ dàng tổng quát hóa và xây dựng phần mềm tính toán.

Trong số các nghiên cứu liên quan đến mạng nơ-ron nhân tạo, phần lớn đều sử dụng mạng nơ-ron truyền thẳng và thuật toán huấn luyện lan truyền ngược. Mô hình được sử dụng rộng rãi vì có khả năng giải được nhiều dạng bài toán ở các lĩnh vực khác nhau như: dự đoán, phân loại, mô hình hóa. Thích hợp nhất là bài toán thể hiện mối quan hệ giữa một tập hợp đầu vào và đầu ra biết trước, đó là cơ sở để xây dựng bộ công cụ dự đoán phục vụ cho quá trình dự đoán tuổi bền dụng cụ tương ứng với một bộ thông số chế độ cắt bất kỳ.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

- Phương pháp quy hoạch thực nghiệm Taguchi và phân tích phương sai ANOVA được sử dụng để xác định mức độ ảnh hưởng của thông số chế độ cắt đến các yếu tố đầu ra, làm cơ sở lựa chọn bộ thông số chế độ cắt tối ưu nhằm đạt giá trị mục tiêu tốt nhất.
- Phương pháp dự đoán trong bài toán kỹ thuật chia thành hai loại: kỹ thuật hồi quy và trí tuệ nhân tạo. Mạng nơ-ron nhân tạo là một mô hình trí tuệ nhân tạo được sử dụng phổ biến cho bài toán dự đoán, đạt độ chính xác và hiệu quả hơn so với các mô hình truyền thống.
- Một phương pháp dự đoán đủ tốt và đáp ứng được các yêu cầu thực tế giải quyết bài toán trong gia công cơ khí hiện nay là mô hình cơ sở trí tuệ nhân tạo, cụ thể là mạng nơ-ron nhân tạo. Được lựa chọn nghiên cứu để làm cơ sở xây dựng bộ dự đoán cho giải pháp dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc nhằm nâng cao tuổi bền dao phay cầu.

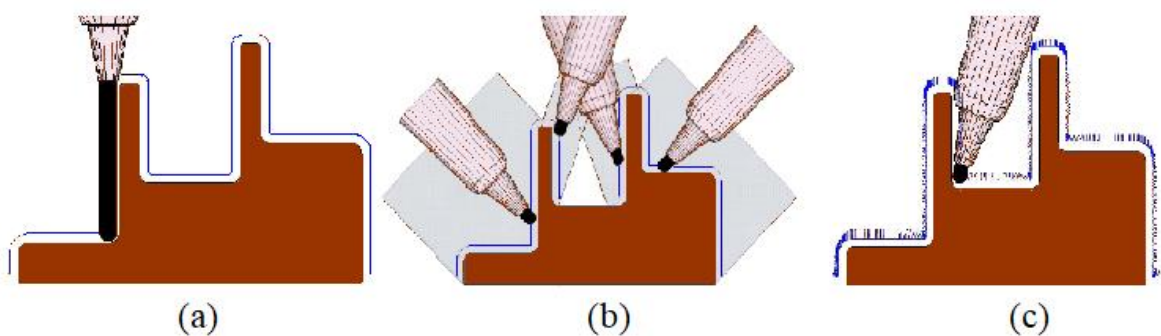
Chương 3

GIẢI PHÁP DỊCH ĐOẠN LƯỠI CẮT LÀM VIỆC NHẪM NÂNG CAO TUỔI BỀN DAO PHAY CẦU GIA CÔNG TRÊN MÁY PHAY CNC NHIỀU TRỤC

3.1. Đặc điểm gia công dao phay cầu trên máy CNC nhiều trục

3.1.1. Hệ thống máy CNC nhiều trục

Sự phát triển của công nghệ CNC bắt đầu từ những năm 1950 của thế kỷ 20, những máy từ thời kỳ đầu tiên chỉ có khả năng làm việc với 3 trục. Cho đến năm 1980, hệ thống CAM đầu tiên ra đời và có khả năng tạo ra chương trình gia công bề mặt phức tạp với năng suất cao. Từ ban đầu với hệ thống máy 3 trục, hệ thống CAM đã dần phát triển lên 3+2 trục và 5 trục đồng thời. Nhu cầu về tự động hóa ngày càng cao đòi hỏi hệ thống CAM phải phát triển tương xứng, đặc biệt đối với gia công trên máy 5 trục. Mối liên hệ giữa hệ thống CAM, động học của máy và bộ điều khiển ngày càng gần nhau hơn. Máy CNC 5 trục có khả năng đáp ứng tốt việc gia công các bề mặt phức tạp, ngoài ra có thể giải quyết những vấn đề tồn tại đối với gia công 3 trục hoặc 3+2 trục, đó là: chiều dài của dụng cụ cắt lớn làm giảm độ cứng vững, tạo nhiều góc nghiêng khác nhau sẽ phải phát sinh nhiều đường chạy dao, chế độ cắt không liên tục ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt (hình 3.1).



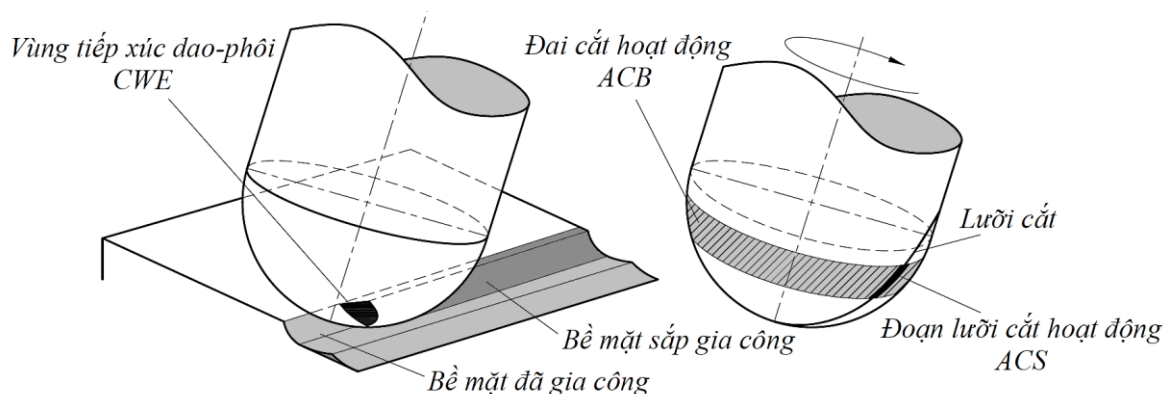
Hình 3.1 Tư thế dụng cụ trên máy CNC a) 3 Trục; b) 3+2 Trục; c) 5 Trục

Máy phay CNC nhiều trục có thêm nhiều bậc tự do cho phép linh hoạt tạo nhiều tư thế dụng cụ khác nhau trên cùng một đường chạy dao (chủ yếu đối với dao phay cầu) mà vẫn phải đảm bảo điều kiện không va chạm dụng cụ (hình 3.1-c). Máy phay CNC nhiều trục (5 trục) cho phép thay đổi vị trí cắt trên lưỡi

cắt của dao phay cầu mà vẫn đảm bảo các thông số công nghệ, chế độ cắt yêu cầu. Cắt ở các vị trí khác nhau bằng cách dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc sẽ liên quan đến tư thế, trạng thái đối với bề mặt gia công, ảnh hưởng đến các thông số công nghệ như vận tốc cắt, chiều sâu cắt, góc nghiêng... Do đó cần thiết phải nghiên cứu đặc điểm gia công dao phay cầu trên máy CNC nhiều trục để làm cơ sở cho giải pháp dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc đã được đề xuất ở trên.

3.1.2. Vùng tiếp xúc dao-phôi của dao phay cầu

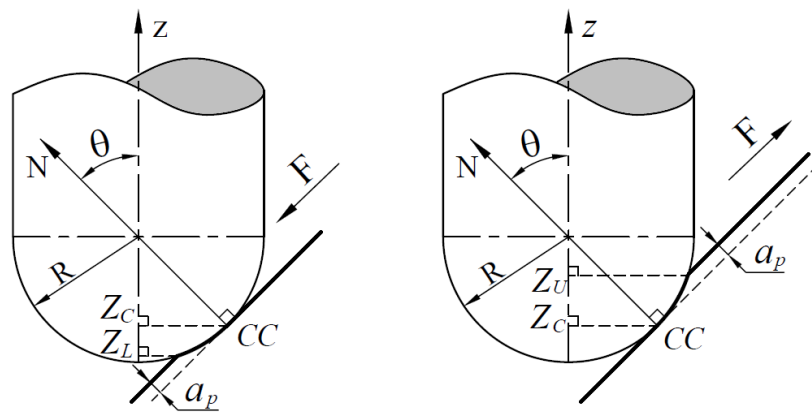
Trong quá trình gia công trên máy CNC, khi dụng cụ chuyển động theo đường chạy dao lập trình thì dụng cụ cắt (đúng hơn là lưỡi cắt) sẽ tiếp xúc với vật liệu gia công trên một vùng gọi là vùng tiếp xúc dao-phôi (Cutter-Workpiece Engagement - CWE) như thể hiện trên hình 3.2. Vùng tiếp xúc dao-phôi liên quan tới phần hình cầu của dao phay cầu, đó là bề mặt tiếp xúc tức thời bởi hình học của phôi trong giai đoạn gia công thay đổi liên tục do đó hình học của vùng tiếp xúc này cũng thay đổi liên tục. Vùng tiếp xúc dao-phôi đóng vai trò quan trọng trong mô phỏng quá trình gia công và ảnh hưởng trực tiếp đến dự đoán lực cắt và mô men cắt. Việc xác định vùng tiếp xúc dao-phôi trong quá trình gia công rất khó khăn và phức tạp, nhất là gia công trên máy nhiều trục. Thực tế có nhiều phương pháp xác định như: khoảng cách trường quét thể tích [34], mô hình lưới tam giác [97] hoặc cắt lát song song [37]. Các phương pháp trên có ưu điểm là dễ số hóa và tính toán trên máy tính.



Hình 3.2 Vùng tiếp xúc dao-phôi và đoạn lưỡi cắt làm việc trên dao phay cầu

Nếu chỉ xem xét trên một lưỡi cắt của dao phay cầu, trong một thời điểm phần lưỡi cắt (trên một lưỡi cắt) đi vào trong vùng tiếp xúc dao-phôi gọi là đoạn lưỡi cắt làm việc (Active Cutting Segment - ACS). Khi gia công, dụng cụ quay

quanh trục của nó thì đoạn lưỡi cắt làm việc sẽ quét thành hình đai được gọi là đai cắt làm việc (Active Cutting Belt - ACB) như hình 3.2. Tất cả các phần lưỡi cắt của dao nằm trong đai cắt làm việc sẽ trở thành đoạn lưỡi cắt làm việc. Vùng tiếp xúc dao-phôi có vai trò rất quan trọng trong nghiên cứu về động học và động lực học quá trình phay như: xác định lực cắt, mô men, công suất, biến dạng dụng cụ và rung động. Bên cạnh đó, từ việc xác định mô hình hình học của vùng tiếp xúc dao-phôi thì có thể xác định được các thông số chế độ cắt như: chiều sâu cắt, lượng tiến dao hoặc chọn thông số hình học của dụng cụ cắt để giảm thiểu sai số khi gia công, đặc biệt cần thiết trong gia công những bề mặt phức tạp trên máy phay CNC 5 trục.

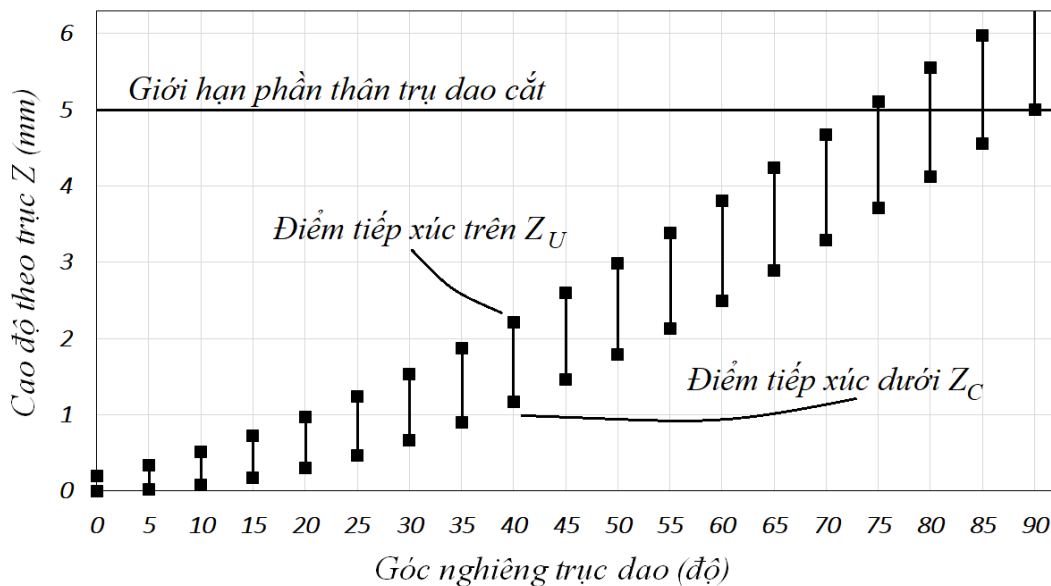


Hình 3.3 Vị trí các điểm tiếp xúc khi cắt nghiêng trục dao phay cầu

Trong lĩnh vực CAD/CAM thường biết đến khái niệm điểm tiếp xúc dao cắt (Cutter Contact - CC), đó là một điểm nằm trên lưỡi cắt mà pháp tuyến bề mặt gia công đi qua điểm tâm mặt cầu đối với dao phay cầu, có cao độ z_C chiều lên trục dao như trên hình 3.3. Ngoài ra cũng xác định được z_L là cao độ điểm tiếp xúc giới hạn dưới khi dao cắt đi xuống và z_U là cao độ điểm tiếp xúc giới hạn trên khi dao cắt đi lên. Khi trục dao nghiêng so với pháp tuyến bề mặt gia công một góc θ thì cao độ các điểm tiếp xúc dao cắt có thể tính toán dễ dàng bằng phép tính lượng giác theo công thức (3.1):

$$\begin{cases} z_U = R - \left[(R - a_p) \cos \theta - \sqrt{2 \cdot R \cdot a_p - a_p^2} \sin \theta \right] \\ z_L = R - \left[\frac{R - a_p}{\cos \theta} - \left((R - a_p) \tan \theta - \sqrt{2 \cdot R \cdot a_p - a_p^2} \right) \sin \theta \right] \\ z_C = R(1 - \cos \theta) \end{cases} \quad (3.1)$$

Khi đã biết giá trị góc nghiêng θ và chiều sâu cắt a_p , đoạn lưỡi cắt làm việc ACS có thể được xác định bởi giới hạn giữa điểm z_C và z_U đối với chiều tiến dao lên hoặc z_C và z_L đối với chiều tiến dao xuống. Từ công thức (3.1) kết hợp sử dụng phần mềm Microsoft Excel[®] tính toán các giá trị z_U , z_C và z_L ứng với các giá trị góc nghiêng θ thay đổi từ 0° đến 90° . Giả sử với các thông số: chiều sâu cắt 0.2 mm và bán kính dao cầu $R = 5\text{mm}$, với trường hợp chiều tiến dao lên có thể vẽ được đồ thị thể hiện chiều cao hình chiếu đoạn lưỡi cắt làm việc ACS, là đoạn thẳng giới hạn bởi hai điểm z_C và z_U như hình 3.4:



Hình 3.4 Hình chiếu các đai cắt làm việc trên trục dao phay cầu

Quan sát kích thước đoạn lưỡi cắt làm việc trên hình 3.4, khi góc nghiêng trục dao thay đổi thì chiều cao đoạn lưỡi cắt làm việc cũng thay đổi tương ứng từ đỉnh đến phần thân trụ của dao cầu. Nghiên cứu vùng tiếp xúc dao-phôi có nhiều lợi ích: phục vụ tính toán lực cắt hoặc lên biểu đồ tốc độ tiến dao cho hoạt động phay. Mỗi đoạn lưỡi cắt làm việc (hình 3.4) sẽ có tuổi bền nhất định được tính theo “chiều dài cắt cho phép lớn nhất” (Maximally Allowed Cutting Length - MACL). Nếu nghiên cứu việc phân bố vị trí của đoạn lưỡi cắt làm việc để khai thác khả năng cắt trên toàn bộ lưỡi cắt của dao phay cầu thì có thể tận dụng hoàn toàn lưỡi cắt dụng cụ, mở ra hướng tăng tuổi bền dụng cụ bằng phương pháp điều chỉnh góc nghiêng trục dao trong quá trình gia công.

3.1.3. Điều kiện cắt của mỗi đai cắt làm việc

Việc nghiên cứu sự phân bố đai cắt làm việc cùng với nghiên cứu tuổi bền dụng cụ (quá trình mòn của lưỡi cắt) là nội dung chính của giải pháp nâng cao tuổi bền dao cầu khi phay trên máy CNC nhiều trục. Với chiều sâu cắt a_p , góc nghiêng dao θ cho trước và điểm tiếp xúc dao CC, có thể xác định được vùng tiếp xúc dao-phôi cũng như đai cắt làm việc. Theo mục 1.2.3.2 có rất nhiều phương án nghiêng trục dao, để đơn giản ta chỉ xét một trường hợp dao phay cầu có định hướng nghiêng ngang - đi lên (hình 1.18-c).

Đai cắt làm việc được giới hạn giữa hai điểm z_U và z_C trên mặt bán cầu khi dao phay cầu định hướng nghiêng ngang - đi lên. Đối với phương pháp dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc thì các đai cắt làm việc này không được chồng lẫn nhau khi thay đổi giá trị góc nghiêng θ khác nhau. Áp dụng công thức (3.1) để tính toán các đai cắt làm việc liên tiếp không chồng lẫn nhau và đồng thời để tránh hiện tượng cắt tại đỉnh dao thì phải đảm bảo góc nghiêng trục dao không nhỏ hơn 15° (theo Ozturk [62]).

Nếu gọi chiều dài cắt cho phép lớn nhất (MACL) của mỗi đai cắt làm việc là l_{maxj} (với j là thứ tự đai cắt làm việc) thì tổng chiều dài cắt cho phép L_{max} (hình 3.5) của toàn bộ lưỡi cắt được tính theo công thức (3.2):

$$L_{max} = \sum_{j=1}^{n_{ACB}} l_{maxj} \quad (3.2)$$

trong đó: n_{ACB} là tổng số đai cắt làm việc có thể chia được trên toàn bộ chiều dài lưỡi cắt trên mặt bán cầu của dao.

Mặt khác, trong quá trình gia công trên máy CNC, dụng cụ cắt được điều khiển di chuyển theo đường chạy dao đúng theo chương trình NC, tổng chiều dài chạy dao L_{cd} của chương trình NC được xác định bằng công thức (3.3):

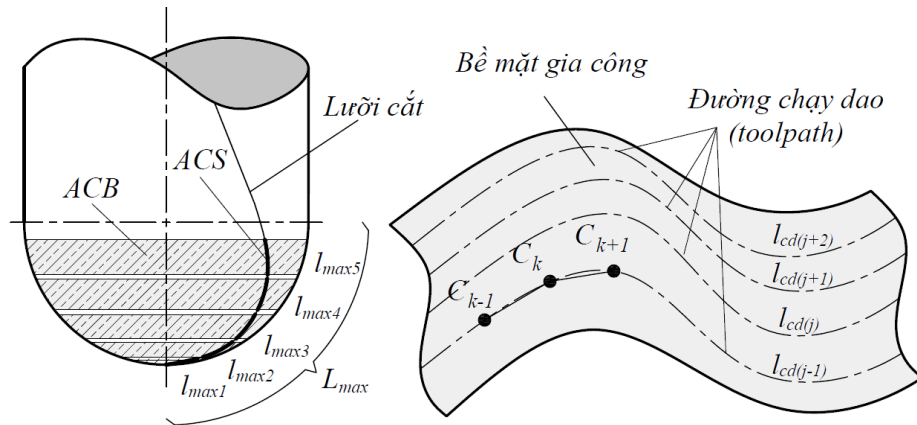
$$L_{cd} = \sum_{j=1}^{n_{ACB}} l_{cdj} \quad (3.3)$$

trong đó: l_{cdj} là chiều dài chạy dao đối với đoạn lưỡi cắt làm việc thứ j .

Các đường chạy dao khi gia công các bề mặt tự do không phải là những đường thẳng do đó tính toán chiều dài đường chạy dao rất khó khăn. Do đó, bằng cách phân chia phần đường chạy dao l_{cdj} thành các đoạn nhỏ, tổng chiều dài đường chạy dao ứng với mỗi đoạn lưỡi cắt làm việc thứ j là l_{cdj} có thể được tính gần đúng bằng cách cộng dồn các đoạn nối hai điểm tiếp xúc dao cắt CC lân cận nhau (hình 3.5). Nếu các điểm tiếp xúc cắt liên tiếp lân cận nhau là C_{k-1} , C_k và $C_{k+1} \dots$ thì chiều dài cắt được tính theo công thức (3.4):

$$l_{cdj} = \sum_{k=1}^{n-1} \overline{C_k C_{k+1}} \quad (3.4)$$

trong đó $\overline{C_k C_{k+1}}$ là chiều dài đoạn chia nhỏ thứ k , n là tổng số điểm tiếp xúc dao cắt.

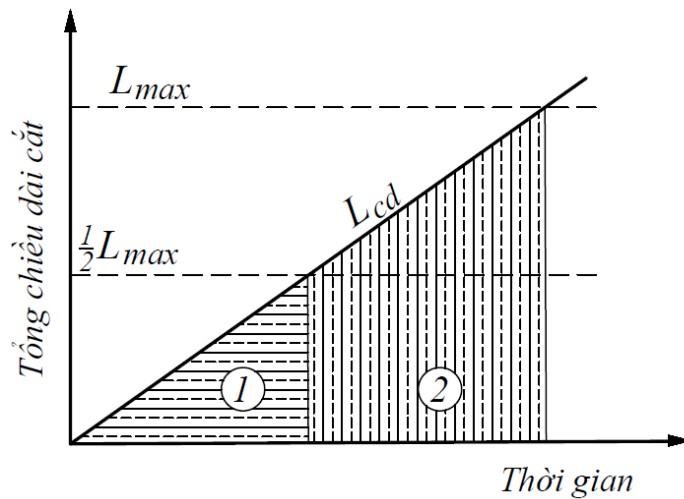


Hình 3.5 Xác định chiều dài chạy dao của mỗi đai cắt làm việc

Nếu xét trên một đai cắt làm việc thì chiều dài cắt cho phép lớn nhất l_{max} ứng với một giá trị góc nghiêng dao θ nhất định và điều kiện để đoạn lưỡi cắt đó có thể làm việc tiếp là $l_{cd} < l_{max}$. Sau khi gia công xong toàn bộ bề mặt chi tiết mà chiều dài chạy dao l_{cd} của đai cắt đó chưa đạt đến l_{max} của nó thì có thể tiếp tục cắt gọt cho chi tiết tiếp theo. Trong quá trình gia công nếu chiều dài đường chạy dao l_{cd} đạt đến giới hạn l_{max} tức là đạt đến ngưỡng chiều dài cắt cho phép của đai cắt làm việc hiện tại thì phải chuyển sang đai cắt làm việc khác còn cho phép. Nếu tất cả các đai cắt làm việc đã đạt đến ngưỡng cho phép của chúng thì cần thiết phải thay dao cắt mới.

Tổng chiều dài cắt cho phép L_{max} của dao cắt được xác định dựa trên MACL của từng đoạn lưỡi cắt làm việc l_{maxj} theo công thức (3.2), và chiều dài đường chạy dao gia công L_{cd} theo công thức (3.3). Tỷ số $\frac{L_{cd}}{L_{max}}$ được thể hiện dạng đồ thị như trên hình 3.6 được chia làm hai vùng:

- 1) Khi $L_{cd} \leq \frac{1}{2}L_{max}$ thì dụng cụ cắt chắc chắn được sử dụng để gia công chi tiết tiếp theo.
- 2) Khi $\frac{1}{2}L_{max} \leq L_{cd} \leq L_{max}$ thì có thể tiếp tục gia công đến khi đạt chiều dài cắt L_{max} rồi thay dao mới hoặc thay luôn dao mới nếu không cho phép thay dao trong quá trình gia công.



Hình 3.6 Tỷ số chiều dài cắt chạy dao và chiều dài cắt cho phép lớn nhất

Như vậy, nếu khai thác hết tổng chiều dài cắt cho phép L_{max} bằng việc dịch các đai cắt làm việc thì số lượng chi tiết N_{ct} được gia công bằng một dao phay cầu tính theo công thức (3.5):

$$N_{ct} = \frac{L_{max}}{L_{cd}} \quad (3.5)$$

3.1.4. Dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc của dao phay cầu

Dao phay cầu được sử dụng rộng rãi trong gia công bán tinh và tinh những bề mặt tự do bởi lưỡi cắt được bố trí trên mặt cầu nên cho phép dao có thể

ngiên theo một số góc nhất định khi gia công nhằm tránh va chạm. Nhờ khả năng đó cho phép thực hiện phân bố lại các đai cắt làm việc, hay gọi là dịch đoạn lưỡi cắt làm việc theo chiều dài lưỡi cắt nhằm khai thác triệt để khả năng làm việc của dao phay cầu nhằm cải thiện tuổi bền của dụng cụ.

Chiến lược chạy dao thông dụng trong thực tế gia công những bề mặt dạng tự do trên máy CNC nhiều trục luôn duy trì góc nghiêng trục dao so với phôi không đổi bởi vì chuyển động của dao êm mượt và độ cứng vững gia công cao hơn. Trong trường hợp này vùng tiếp xúc dao-phôi trên lưỡi cắt có thể không đổi trong một thời gian dài sẽ dẫn đến mòn cục bộ trên lưỡi cắt và tuổi bền dụng cụ bị hạn chế mà không tận dụng hết khả năng cắt của dụng cụ. Nếu chủ động thay đổi góc nghiêng trục dao phay cầu thì vùng tiếp xúc dao-phôi cũng sẽ phân bố trên các vị trí khác nhau theo chiều dài lưỡi cắt, dẫn tới mỗi điểm trên lưỡi cắt tham gia cắt với thời gian ít hơn nên tốc độ mòn cục bộ sẽ được giảm thiểu. Tuy nhiên phương pháp định hướng góc nghiêng dao cố định vẫn được sử dụng nhiều do thuận lợi trong lập trình chương trình NC, để có được thay đổi góc nghiêng dao một cách chủ động cần thực hiện hậu xử lý các chương trình CAM.

Theo mô hình cắt nghiêng trục dao như trên hình 3.3, khi thay đổi hướng nghiêng dao nhưng không làm thay đổi đường cong tiếp xúc CC (quỹ đạo điểm CC trên bề mặt gia công), tốc độ tiến dao và tốc độ trục chính không thay đổi. Khi đó, mòn tại một số điểm đặc biệt trên lưỡi cắt dao được xem là một hàm tăng đơn điệu đối với chiều dài cắt l - là chiều dài của quỹ đạo điểm tiếp xúc CC quét dọc theo đường chạy dao.

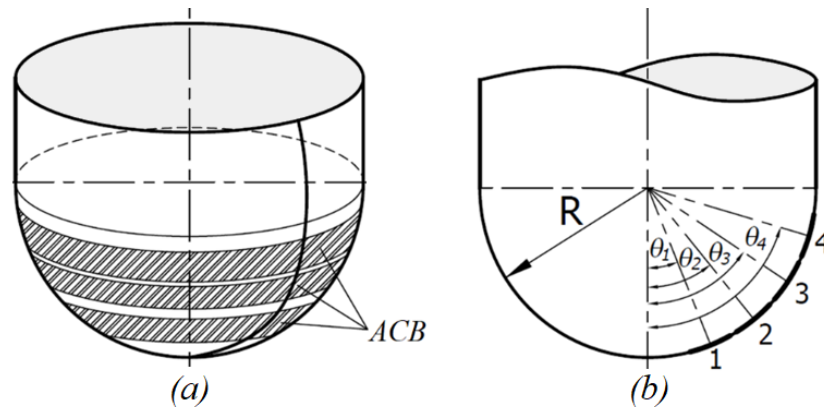
Theo mục 1.2.3.1, lượng mòn dao chịu ảnh hưởng chính bởi vận tốc cắt nên những điểm trên lưỡi cắt có cùng vận tốc cắt thì có tốc độ mòn giống nhau. Đặt $w(z, l)$ là hàm lượng mòn dao phụ thuộc theo cao độ z và chiều dài cắt l ; w_{max} là lượng mòn lớn nhất cho phép (0.3mm theo mục 1.2.2.2). Khi lấy hàm ngược của hàm $w(z, l)$ sẽ xác định được chiều dài cắt cho phép lớn nhất $l_{max}(z)$ của đai cắt làm việc tại cao độ z theo công thức (3.6):

$$(z, l_{max}(z)) = w^{-1}(w_{max}) \quad (3.6)$$

Cần lưu ý rằng giá trị $l_{max}(z)$ cho chiều dài cắt lớn nhất cho phép MACL trong công thức (3.6) chỉ xác định cho điểm có cao độ z , những điểm cao độ z khác sẽ có giá trị l_{max} khác tương ứng mặc dù ngưỡng w_{max} có thể như nhau.

Đai cắt làm việc được phân bố từ đỉnh dao cho đến phần thân trụ dao theo từng đoạn liên tiếp nhau như trên hình 3.7-a. Mỗi đai cắt làm việc ứng với cao độ z nhất định (một giá trị góc nghiêng dao nhất định) và có giới hạn ngưỡng chiều dài cắt cho phép lớn nhất là $l_{max}(z)$. Khi chiều dài cắt gia công tại điểm đó đạt đến ngưỡng $l_{max}(z)$ thì thay đổi góc nghiêng để chuyển sang đai cắt làm việc khác nhằm tránh hiện tượng quá lượng mòn cho phép gây ra sai số gia công. Quá trình này cứ tiếp diễn cho đến khi toàn bộ lưỡi cắt của dao được tham gia cắt hoặc toàn bộ đường chạy gia công đã hoàn thành.

Ví dụ trên hình 3.7-b có bốn đai cắt làm việc 1, 2, 3 và 4 phân bố từ đỉnh đến thân trụ của dao, chiều cao mỗi đai cắt làm việc phụ thuộc vào chiều sâu cắt nên sẽ quyết định số lượng đai cắt làm việc được phân chia. Tuy nhiên, trong thực tế gia công, chuyển đổi giữa các đai cắt làm việc có thể không theo thứ tự liên tục từ đỉnh đến phần thân trụ dao mà thay đổi bất kỳ phụ thuộc vào chương trình gia công NC tạo ra bởi phần mềm CAM.



Hình 3.7 Phân bố đai cắt làm việc trên lưỡi cắt dao phay cầu

Phương pháp điều khiển dịch chuyển các đoạn lưỡi cắt làm việc trong quá trình phay gọi là phương pháp “dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc” - là phương pháp được đề cập trong một số nghiên cứu [56][79] đã chứng minh tính hiệu quả ưu việt. Dịch đoạn lưỡi cắt làm việc cần tránh vị trí cắt tại đỉnh dao, vì vận tốc cắt tại đỉnh dao là rất thấp sẽ làm tăng lực cắt và giá trị nhám bề mặt.

Vấn đề khó khăn ở đây không phải là cách phân bố đoạn lưỡi cắt làm việc, mà là việc xác định giá trị chiều dài cắt cho phép lớn nhất $l_{\max}(z)$ của mỗi đai cắt làm việc. Có thể tính toán bằng công thức Taylor (1.15) hoặc (1.16) nếu biết giá trị các hằng số phụ thuộc nhưng có thể không có sẵn đối với cặp vật liệu dao-phôi, đặc biệt trong giai đoạn hiện nay. Cho nên đề xuất một phương pháp dự đoán lượng mòn là rất cần thiết trong bài toán nâng cao tuổi bền. Có nhiều phương pháp dự đoán đã được áp dụng, trong đó sử dụng trí tuệ nhân tạo đã và đang được áp dụng rất rộng rãi. Chi tiết về lý thuyết và ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong bài toán dự đoán đã được trình bày trong mục 2.2 của luận án này.

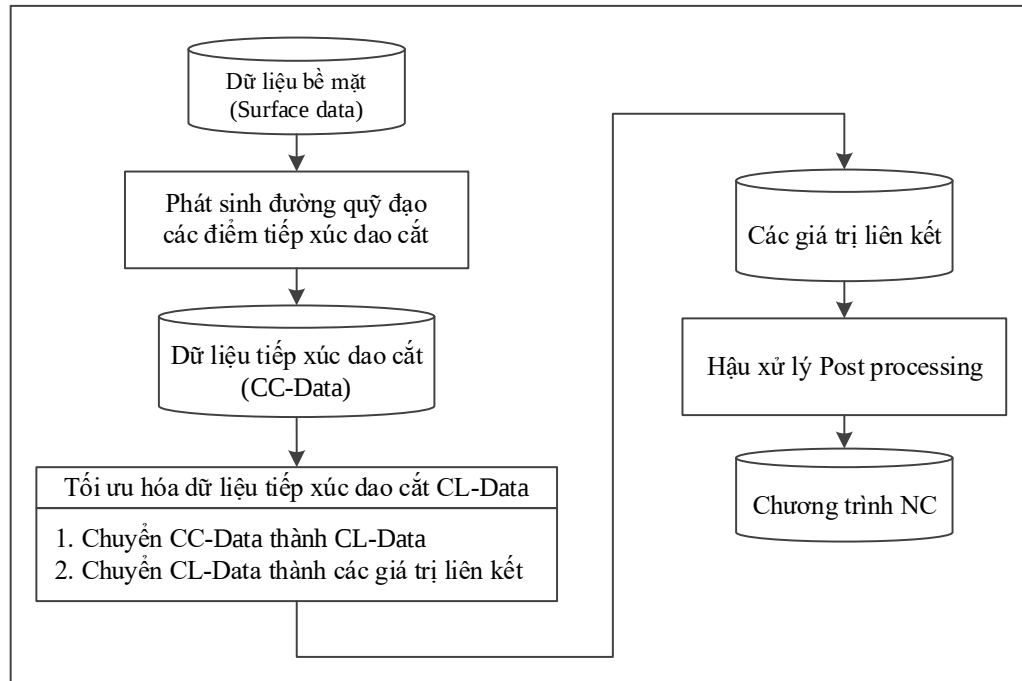
3.2. Dữ liệu vị trí dao trong chương trình gia công CNC

3.2.1. Quá trình tạo một chương trình gia công NC

Máy phay CNC 5 trục được sử dụng rộng rãi để gia công các chi tiết có biên dạng phức tạp, bề mặt tự do như cánh tuốc bin, cánh bom, chân vịt tàu thủy... Những chi tiết có bề mặt phức tạp nhưng kích thước lớn thường sử dụng dao phay mặt đầu nhằm đạt năng suất cao, trong khi các chi tiết kích thước nhỏ hơn thường sử dụng dao phay trụ hoặc dao phay cầu. Trong phay biên dạng trên máy CNC 5 trục, dao phay thường được đánh nghiêng theo chiều tiến dao, kỹ thuật này gọi là kỹ thuật phay Sturz [27].

Một quá trình phay biên dạng (Contour milling) trên máy CNC 5 trục thông thường sẽ qua bốn bước xử lý thông tin (hình 3.8) như sau:

1. Các đường tiếp xúc dao cắt (cutter contact paths) được tạo từ dữ liệu bề mặt (surface data) nhập vào.
2. Dữ liệu vị trí dao (CL-Data) thu được từ dữ liệu tiếp xúc dao (CC-Data), sau đó được chuyển đổi thành các giá trị liên kết (Joint values) của máy CNC.
3. Lập đường liên kết sai lệch biên (Bounded-deviation joint path planning [27]) nếu cần thiết để đảm bảo các quỹ đạo đường thẳng.
4. Cuối cùng, các giá trị liên kết được hậu xử lý để chuyển thành mã NC – mã chương trình mà các máy CNC có thể đọc được.



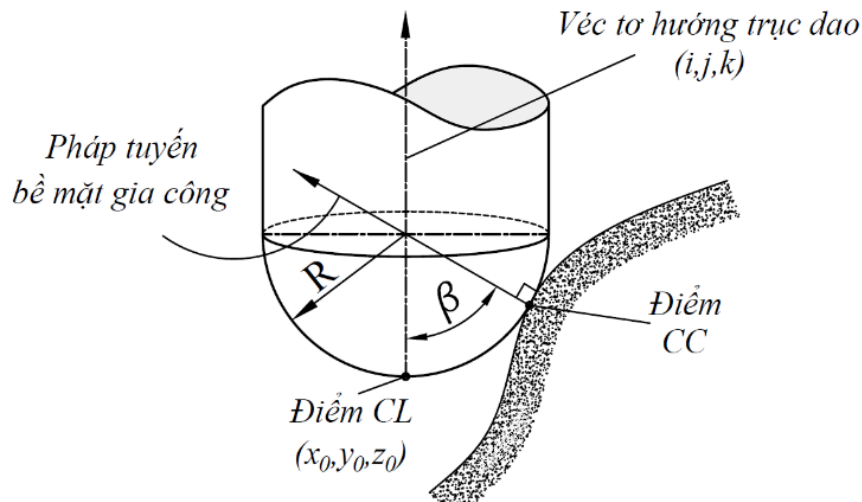
Hình 3.8 Quá trình xử lý thông tin cho gia công 5 trục [27]

Một số phần mềm CAD/CAM tạo chương trình gia công cho máy CNC thương mại đều có hỗ trợ cho khả năng gia công 5 trục, nhưng có rất ít công bố thông tin về hiệu suất gia công, bởi lẽ do hai vấn đề chính trong phay 5 trục:

- Cách để tạo ra các đường tiếp xúc dao cắt nhằm tối thiểu thời gian gia công (hoặc đạt năng suất cao nhất);
- Cách để tạo ra dữ liệu vị trí dao (CL-Data) từ các các đường tiếp xúc dao cắt đã tạo ra, sao cho chiều cao các đỉnh nhấp nhỏ nhất.

Khi sử dụng hệ thống CAD/CAM để tạo chương trình gia công thì cần phải có một bộ hậu xử lý post-processing tương ứng với mã máy CNC để đảm bảo chuyển đổi dữ liệu vị trí dao CL-Data thành chương trình NC. Dữ liệu vị trí dao CL-Data là đầu ra của hệ thống CAM và hậu xử lý post-processing phân liên kết giữa hệ thống CAM và hệ thống máy NC, có nhiệm vụ chuyển đổi dữ liệu đường chạy dao thành mã máy phù hợp để hệ thống NC có thể đọc và phân tích được [89]. Hậu xử lý post-processing có thể là một chương trình độc lập, có chức năng chính là tạo ra chương trình NC trên cơ sở xử lý dữ liệu của tệp tin CL-Data. Trong tệp tin CL-Data, ngoài dữ liệu về hệ tọa độ, dụng cụ cắt,

tọa độ đường chạy dao, còn bao gồm các thông tin về dao gia công, lượng tiến dao, tốc độ trục chính, điều khiển trơn nguội, loại nội suy...



Hình 3.9 Điểm CC và điểm CL đối với dao phay cầu

Tham khảo tài liệu trực tuyến “Creo Parametric 5.0.6.0” thì tệp tin CL-Data được phát sinh từ các đường chạy dao xác định với các chu trình NC khác nhau, mỗi chu trình NC sẽ là một tệp tin CL-Data riêng biệt. Trong tệp tin CL-Data không chứa thông tin cụ thể cấu trúc của máy CNC vì vậy kết cấu máy khác nhau có thể dùng chung một tệp tin CL-Data. Theo định dạng tiêu chuẩn ISO, dữ liệu CL-Data được biểu diễn bởi (x, y, z, i, j, k) trong đó (x, y, z) là tọa độ vị trí dao và (i, j, k) là véc tơ hướng trục dao (hình 3.9). Đồng thời trên hình 3.9 cũng cho thấy, tọa độ vị trí dao là một điểm ở đỉnh (hoặc tâm bán cầu) dao chứ không phải tại vùng tiếp xúc dao cắt với bề mặt gia công.

3.2.2. Dữ liệu vị trí dao của phần mềm NX CAM

Phần mềm NX, một sản phẩm của hãng Siemens, là giải pháp tổng thể CAD/CAM/CAE linh hoạt, tối ưu và có tính đồng bộ cao. Phần mềm NX được dùng cho các mục đích: Thiết kế theo tham số và cho tạo hình mặt/khối trực tiếp; phân tích kỹ thuật và dùng trong các mô đun gia công. Tệp tin CLS (Cutter Location Source - CLS) được tạo ra sau khi phát sinh đường quỹ đạo chạy dao (tool path) trên phần mềm NX, dùng định dạng ký tự tiêu chuẩn ASCII theo tiêu chuẩn ISO-4343 năm 1978. Từ dữ liệu đường chạy dao trong tệp tin CLS,

thông qua bộ hậu xử lý trung gian sẽ tạo ra chương trình NC mà một mã máy CNC cụ thể có thể đọc và chạy được chương trình [105].

Ngoài ra, thêm tệp tin dữ liệu máy MDF (Machine Data File) bao gồm các mô tả chi tiết về máy công cụ và hệ điều khiển của nó. Tệp tin MDF được tạo ra bởi bộ phát sinh đặc biệt MDFG (Machine Data File Generator), chứa các danh mục tổng hợp hậu xử lý riêng cho từng mã máy CNC cụ thể, làm căn cứ phát sinh chương trình gia công CNC phù hợp với máy. Dữ liệu trong tệp tin MDF rất quan trọng để mô tả những đặc điểm của máy CNC, đặc biệt là các máy nhiều trục với nhiều kết cấu khác nhau.

Dữ liệu vị trí dao từ tệp tin CLS chứa thông tin về đường quỹ đạo chạy dao (tool path) và véc tơ hướng trục dao, làm cơ sở để xác định các đai cắt làm việc trong chương trình gia công hiện tại, từ đó tính toán chiều dài chạy dao của từng đai cắt trong chương trình gia công của dao phay cầu.

3.3. Đề xuất một giải pháp nâng cao tuổi bền dao phay cầu

Theo những cơ sở lý thuyết đã được nghiên cứu trong luận án, để xây dựng được một giải pháp nâng cao tuổi bền của dao phay cầu khi gia công tinh bằng máy phay CNC 5 trục theo phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc đã được lựa chọn ở trên, cần tiến hành các bước sau:

1. Xây dựng cơ sở dữ liệu (CSDL) từ sổ tay tra cứu công nghệ, thông số công bố của nhà sản xuất, hoặc từ thí nghiệm tuổi bền dụng cụ theo các thông số công nghệ trong điều kiện gia công cụ thể. Tuổi bền dụng cụ được xác định thông qua chiều dài cắt cho phép lớn nhất l_{max} tại các điểm thực nghiệm rời rạc trên lưỡi cắt.
2. Xây dựng bộ công cụ dự đoán chiều dài cắt cho phép lớn nhất l_{max} (là tuổi bền tính theo đơn vị chiều dài cắt) tại điểm bất kỳ trên lưỡi cắt ứng với thông số gia công cụ thể bằng mạng nơ-ron nhân tạo.
3. Phần mềm CAM phải có đầy đủ tính năng điều khiển định hướng góc nghiêng trục dao (phần mềm NX có thể đáp ứng được). Từ dữ liệu CL-Data, phân tích và xác định đai cắt làm việc. Sử dụng bộ dự đoán (bằng mạng nơ-ron nhân tạo) để dự đoán chiều dài cắt cho

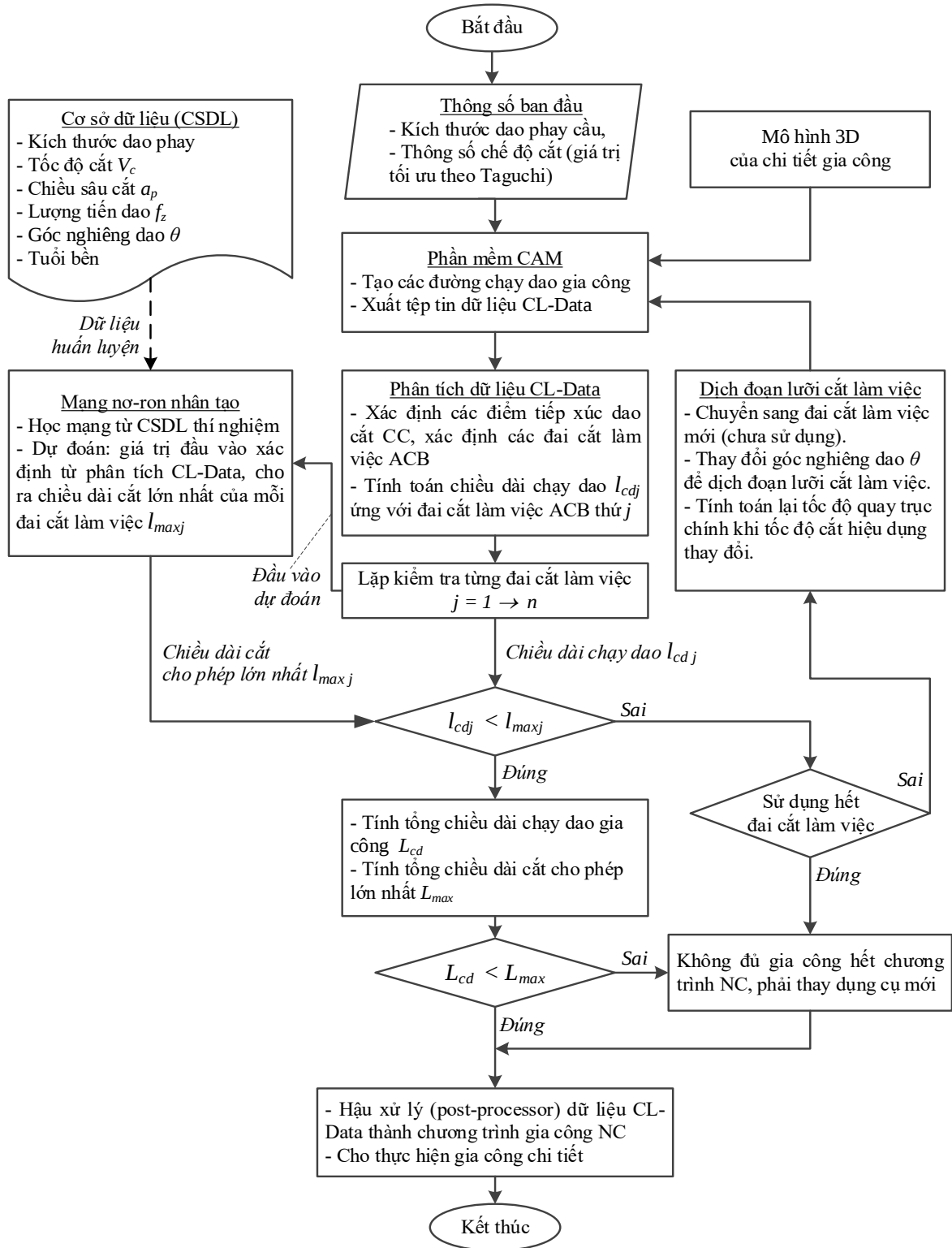
phép lớn nhất l_{max} , tính toán điều kiện $l_{cd} \leq l_{max}$ cho từng đai cắt làm việc. Nếu không thỏa mãn điều kiện trên thì cần thay đổi định hướng dao phay cầu trên phần mềm CAM để tạo chương trình gia công mới, lặp lại quá trình tính toán sao cho thỏa mãn điều kiện $l_{cd} \leq l_{max}$ của từng đai cắt làm việc. Nếu toàn bộ các đai cắt làm việc của dao phay cầu mà không thỏa mãn $l_{cd} \leq l_{max}$ thì cần thiết phải thay thế dụng cụ cắt mới.

4. Tính tổng chiều dài cắt cho phép lớn nhất L_{max} và tổng chiều dài đường chạy dao gia công L_{cd} của toàn bộ lưỡi cắt, tỷ số $\frac{L_{cd}}{L_{max}}$ là điều kiện xem xét dao cắt hiện tại có thể tiếp tục gia công hay phải thay thế dao cắt mới.

Các bước thực hiện giải pháp nâng cao tuổi bền dao phay cầu bên trên được mô tả chi tiết trên hình 3.10, giải thích chức năng của các khối chính trong sơ đồ và trình tự hoạt động của quá trình như sau:

Cơ sở dữ liệu (CSDL): là các thông số đầu vào (thông số dao phay cầu, thông số chế độ cắt) và giá trị đầu ra (tuổi bền). Dữ liệu được lấy từ các sổ tay tra cứu công nghệ, tài liệu công bố của nhà sản xuất dụng cụ hoặc cần phải thí nghiệm gia công để thu thập nếu dữ liệu không có sẵn [67]. CSDL là một thành phần quan trọng trong tiến trình thực hiện giải pháp, là dữ liệu đầu vào huấn luyện mạng nơ-ron nhân tạo để tạo ra bộ dự đoán. Mỗi loại dao phay cầu có thông số hình học khác nhau thì sẽ có một bộ CSDL dùng làm dữ liệu huấn luyện mạng nơ-ron nhân tạo khác nhau tương ứng. Mặt khác có thể bổ sung thêm dữ liệu nhằm cải thiện độ chính xác dự đoán trong tương lai.

Mạng nơ-ron nhân tạo: phải được huấn luyện từ trước để tạo khả năng dự đoán, thông số mạng (giá trị các trọng số) được lưu trữ phục vụ cho việc dự đoán sau này mà không cần thiết phải huấn luyện lại. Đầu vào dự đoán là các thông số chế độ cắt phân tích từ chương trình gia công NC. Mạng nơ-ron nhân tạo có thể dự đoán ra giá trị đầu ra là chiều dài cắt cho phép lớn nhất ứng với giá trị đầu vào bất kỳ trong khoảng giới hạn giá trị huấn luyện của mạng.



Hình 3.10 Sơ đồ khối các bước thực hiện giải pháp nâng cao tuổi bền

Phần mềm CAM: tạo ra các đường quỹ đạo chạy dao (tool path) tương ứng với bề mặt chi tiết gia công, đồng thời có khả năng xuất tệp tin dữ liệu CL-Data làm cơ sở phân tích thành các đai cắt làm việc. Phần mềm CAM còn thực

hiện chức năng hậu xử lý (post-processing) để chuyển đổi quỹ đạo chạy dao thành chương trình gia công NC tương ứng với mã máy CNC cụ thể.

Phân tích dữ liệu CL-Data: mỗi đai cắt làm việc được xác định chiều dài chạy dao l_{cd} tương ứng. Đối với mỗi đai cắt làm việc, chiều dài cắt cho phép lớn nhất l_{max} (dự đoán từ mạng nơ-ron nhân tạo) được so sánh với chiều dài chạy dao l_{cd} (tính toán từ phần mềm CAM). Nếu $l_{cd} > l_{max}$ nghĩa là đai cắt làm việc đó không đủ để chạy dao gia công hết chiều dài gia công trong chương trình hiện tại, cần phải thay bằng đoạn lưỡi cắt làm việc mới có l_{max} thỏa mãn.

Đối với trường hợp gia công những bề mặt phẳng hoặc phẳng gầy khúc thì việc thực hiện giải pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc sẽ đơn giản hơn và dễ dàng kiểm soát vấn đề va chạm trong gia công. Dịch đoạn lưỡi cắt làm việc sẽ thực hiện lần lượt theo thứ tự các đai cắt làm việc, khi đai cắt làm việc này đã sử dụng hết sẽ chuyển sang đai cắt mới kế tiếp. Tuy nhiên, trường hợp gia công những bề mặt phức tạp sẽ gặp nhiều trở ngại: Dịch đoạn lưỡi cắt làm việc không thể thực hiện bằng cách thay đổi góc nghiêng của dao trong một chương trình gia công nên có thể phải phân tách nhiều chương trình gia công khác nhau; Các đoạn lưỡi cắt làm việc không được dịch theo thứ tự lần lượt mà có thể phải ngẫu nhiên. Do đó cần phải làm rõ tính khả thi của phương pháp bằng chứng minh thực nghiệm đánh giá hiệu quả của phương pháp.

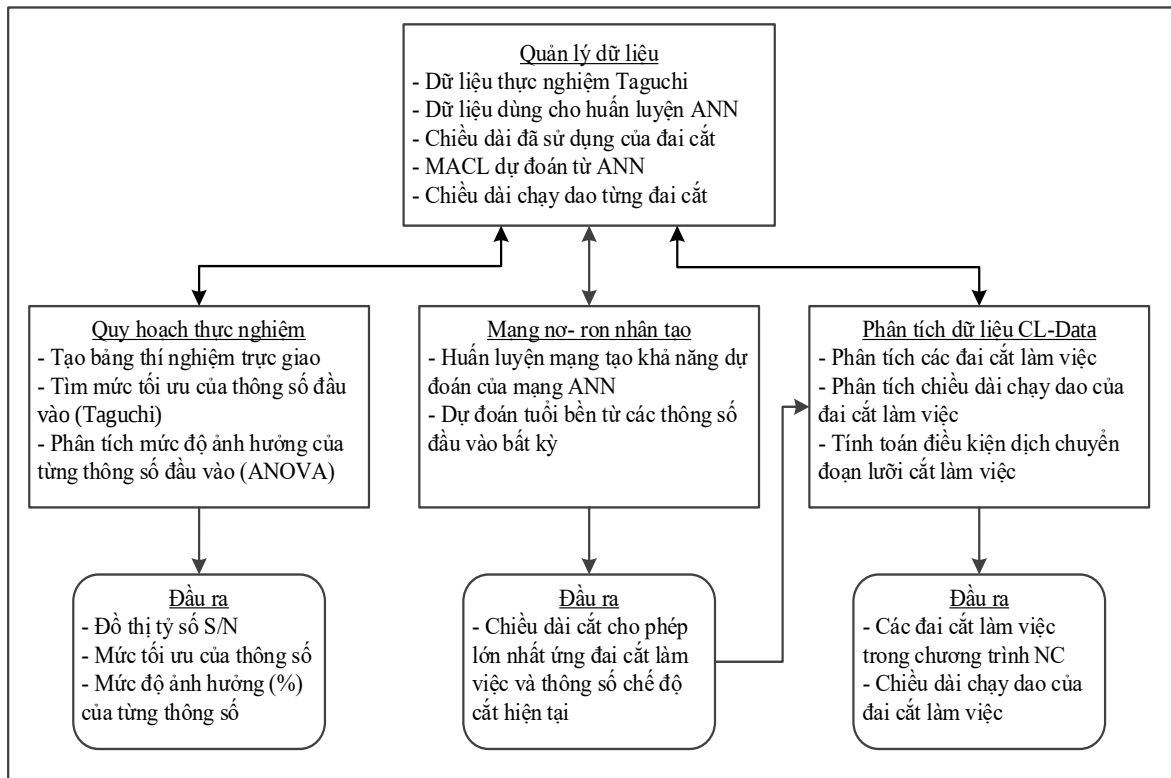
3.4. Xây dựng phần mềm hỗ trợ giải pháp nâng cao tuổi bền dụng cụ

3.4.1. Ngôn ngữ lập trình cho phần mềm

Như đã phân tích chi tiết trong mục 3.2, tiến trình thực hiện giải pháp nâng cao tuổi bền dao phay cầu khi gia công trên máy CNC 5 trục cần thực hiện theo các bước như trong sơ đồ khối trên hình 3.10. Tiến trình trên có liên quan đến nhiều vấn đề cần xử lý: thực hiện quy hoạch thực nghiệm, phân tích mức độ ảnh hưởng các thông số chế độ cắt đến các thông số đầu ra, xây dựng bộ dự đoán chiều dài cắt cho phép lớn nhất của từng đoạn lưỡi cắt làm việc bất kỳ... nên rất cần một phần mềm quản lý một bộ dữ liệu thống nhất phục vụ cho nhiều hoạt động phân tích khác nhau. Ngoài ra, việc tạo ra một phần mềm phục vụ

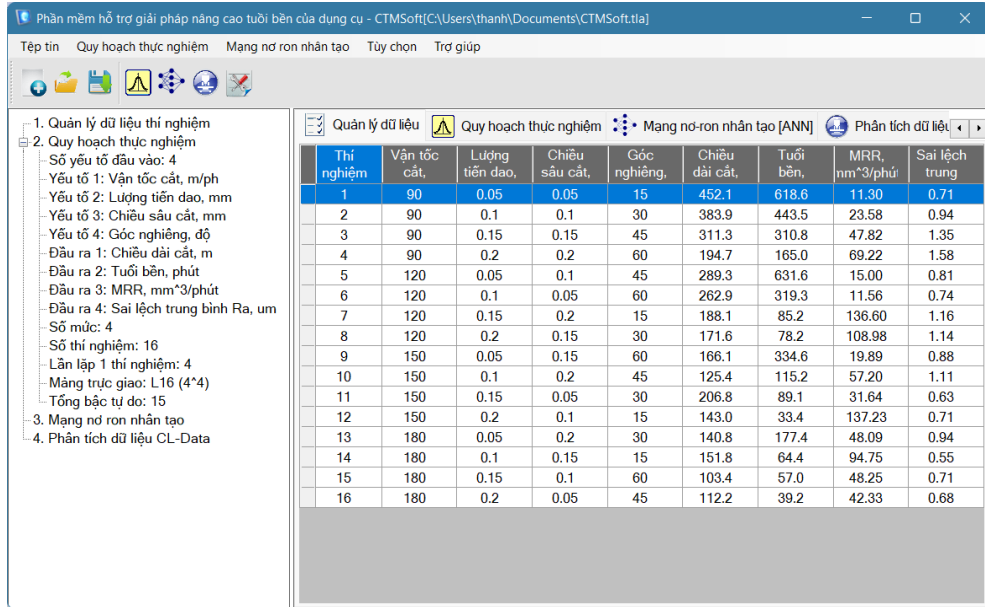
cho quá trình nghiên cứu đào tạo tại nhà trường cũng như các nghiên cứu mở rộng trong tương lai là rất hữu ích. Phần mềm được thiết kế với giao diện thân thiện, dễ sử dụng và hỗ trợ tính toán nhiều về công nghệ gia công cơ khí.

Từ đề xuất giải pháp trình bày trong mục 3.3, phần mềm cần được thiết kế với mục đích hỗ trợ cho giải pháp gồm các mô đun chính như hình 3.11 sau:



Hình 3.11 Các khối mô đun chức năng của phần mềm

Phần mềm tích hợp các chức năng độc lập như: quy hoạch thực nghiệm (đầu vào là các thông số chế độ cắt, đầu ra là tuổi bền, nhám bề mặt hoặc tốc độ bóc tách vật liệu), mạng nơ-ron nhân tạo (đầu vào dự đoán là giá trị thông số chế độ cắt, đầu ra là tuổi bền theo chiều dài cắt), phân tích dữ liệu tệp tin CLS (tệp tin xuất từ phần mềm NX – theo mục 3.2.2) để xác định đai cắt làm việc và chiều dài chạy dao tương ứng. Phần mềm được đặt tên là CTMSOft, ngôn ngữ lập trình phần mềm là Microsoft Visual C# cho phép dễ dàng tạo giao diện làm việc và mạnh mẽ trong tính toán số học. Giao diện phần mềm được thiết kế với tiêu chí là: rõ ràng, trực quan, dễ sử dụng đối với người dùng với nhiều mô đun chức năng khác nhau như trên hình 3.12.



Hình 3.12 Bố trí giao diện chính của phần mềm CTMSoft

3.4.2. Xây dựng các khối chức năng phần mềm

Phần mềm được dự định tổ chức thành bốn mô đun chức năng có mối liên hệ dữ liệu như sơ đồ trên hình 3.11, cụ thể là:

1. Quản lý dữ liệu: Chức năng này quản lý tất cả các dữ liệu liên quan đến xử lý của phần mềm như: quy hoạch thực nghiệm, dữ liệu học mạng nơ-ron nhân tạo và dữ liệu vị trí dao từ tệp tin CLS. Giao diện quản lý dữ liệu được thiết kế theo dạng bảng tính, cho phép người dùng phần mềm dễ dàng nhập liệu bằng tay hoặc từ tệp tin dữ liệu (định dạng Excel, CSV) hoặc dán từ bộ nhớ đệm (clipboard) (hình 3.13). Khi dữ liệu được quản lý thống nhất, việc cập nhật hoặc liên kết giữa các khối chức năng được thực hiện dễ dàng, tránh sai sót.

The screenshot shows the "Quản lý dữ liệu dự án" window. It has a menu bar with "Nhập từ Excel", "Nhập từ CSV", and "Dán cho cột". The table below is displayed:

Thí nghiệm	Vận tốc cắt, m/ph	Lượng tiến dao, mm	Chiều sâu cắt, mm	Góc nghiêng, độ	Chiều dài cắt, m	Tuổi bền, phút	MRR, mm ³ /phút	Sai lệch trung bình Ra, um
1	90	0.05	0.05	15	452.1	618.6	11.30	0.71
2	90	0.1	0.1	30	383.9	443.5	23.58	0.94
3	90	0.15	0.15	45	311.3	310.8	47.82	1.35
4	90	0.2	0.2	60	194.7	165.0	69.22	1.58
5	120	0.05	0.1	45	289.3	631.6	15.00	0.81
6	120	0.1	0.05	60	262.9	319.3	11.56	0.74
7	120	0.15	0.2	15	188.1	85.2	136.60	1.16
8	120	0.2	0.15	30	171.6	78.2	108.98	1.14
9	150	0.05	0.15	60	166.1	334.6	19.89	0.88
10	150	0.1	0.2	45	125.4	115.2	57.20	1.11
11	150	0.15	0.05	30	206.8	89.1	31.64	0.63
12	150	0.2	0.1	15	143.0	33.4	137.23	0.71
13	180	0.05	0.2	30	140.8	177.4	48.09	0.94
14	180	0.1	0.15	15	151.8	64.4	94.75	0.55
15	180	0.15	0.1	60	103.4	57.0	48.25	0.71
16	180	0.2	0.05	45	112.2	39.2	42.33	0.68

Hình 3.13 Giao diện chức năng nhập và quản lý dữ liệu

Cấu hình thiết kế thí nghiệm Taguchi

Thiết kế thí nghiệm Taguchi

1. Thiết kế thí nghiệm 2. Phương pháp phân tích 3. Mạng trực giao (L16 (4⁴4))

Số mức (Levels): 4

Số yếu tố (Factors): 4

Mạng trực giao: L16 (4⁴4)

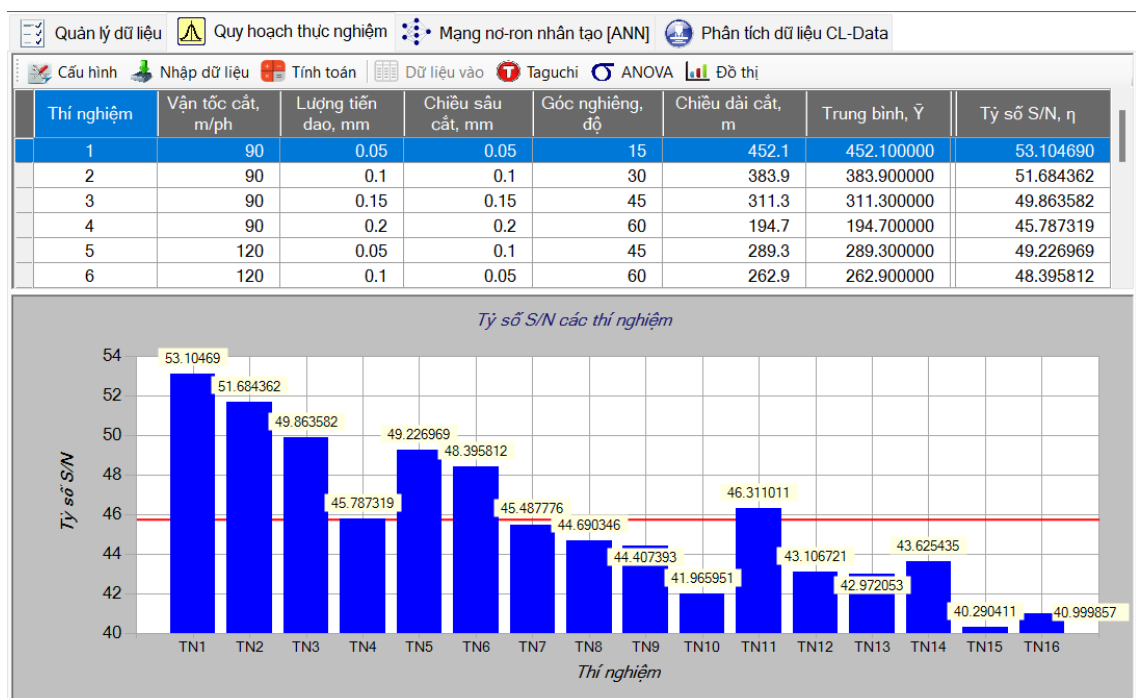
Các yếu tố (Factors)

Yếu tố	Mức 1	Mức 2	Mức 3	Mức 4
Vận tốc cắt, m/ph	90	120	150	180
Lượng tiến dao, mm	0.05	0.1	0.15	0.2
Chiều sâu cắt, mm	0.05	0.1	0.15	0.2
Góc nghiêng, độ	15	30	45	60

Tạo dữ liệu mới Thoát

Hình 3.14 Lựa chọn thông số quy hoạch thực nghiệm Taguchi

2. Quy hoạch thực nghiệm (hay gọi là Thiết kế thí nghiệm): Được tổ chức trong mục “Quy hoạch thực nghiệm” như trên giao diện hình 3.12. Cơ sở lý thuyết sử dụng cho lập trình tính toán theo phương pháp Taguchi và phân tích phương sai ANOVA đã trình bày tại mục 2.1 và tham khảo thêm từ các tài liệu [50][54][55][73][74]. Tại giao diện cửa sổ “Cấu hình thiết kế Taguchi” (hình 3.14) cho phép lựa chọn số lượng yếu tố đầu vào, số lượng mức của các yếu tố, số lượng yếu tố đầu ra, đặc tính đầu ra hoặc giá trị mục tiêu đầu ra (nếu là đặc tính “danh nghĩa tốt nhất”).



Hình 3.15 Giao diện chức năng quy hoạch thực nghiệm

Trong mô đun quy hoạch thực nghiệm, từ những yêu cầu đầu vào sẽ chọn bảng trực giao hợp lý nhất phục vụ cho lên kế hoạch tổ chức thực nghiệm. Sau khi có đầy đủ dữ liệu thí nghiệm, phần mềm có thể thực hiện các tính toán và cho kết quả đầy đủ theo các chỉ tiêu đã nêu tại mục 2.1. Mô đun này được thiết kế cho phép người dùng tùy ý cấu hình để sử dụng độc lập mà không nhất thiết phải ràng buộc theo cấu hình của luận án. Ngoài số liệu tính toán, phần mềm còn có chức năng thể hiện đồ thị các tỷ số S/N , mức tối ưu hay mức độ ảnh hưởng (ví dụ đồ thị kết quả tỷ số S/N theo Taguchi trên hình 3.15).

3. Mạng nơ-ron nhân tạo: Cơ sở lý thuyết xây dựng chức năng này đã trình bày tại mục 2.3 và tham khảo thêm các tài liệu [29][24][39]. Phần mềm có sử dụng thư viện mã nguồn mở *Aforge.NET*, là một framework C# được thiết kế cho các nhà phát triển nghiên cứu trong các lĩnh vực Computer Vision, mạng nơ-ron, thuật toán di truyền, logic mờ, ... Mô đun mạng nơ-ron nhân tạo sẽ dùng thư viện con *Aforge.Neuro* trong gói *Aforge.NET* để xây dựng bộ công cụ dự đoán. Thư viện hỗ trợ các hàm kích hoạt: *ThresholdFunction* (hàm ngưỡng), *SigmoidFunction* (hàm Xích-ma), và *BipolarSigmoidFunction* (hàm Xích-ma lưỡng cực). Thuật toán huấn luyện hiện có rất nhiều loại khác nhau, theo phân tích lựa chọn tại mục 2.3.4, tác giả đã chọn thuật toán huấn luyện mạng *BackPropagationLearning* (học lan truyền ngược).

4. Phân tích dữ liệu vị trí dao (CL-Data) từ tệp tin CLS: Theo trình tự được đề xuất ở mục 3.2, từ dữ liệu trong tệp tin CLS (bao gồm dữ liệu vị trí dao CL-Data và dữ liệu điểm tiếp xúc dao CC-Data) cùng được xuất ra từ phần mềm CAM khi lập trình gia công, phân tích phân bố của các đai cắt làm việc sau đó xác định chiều dài chạy dao của từng đai cắt làm việc, kết hợp với mô đun dự đoán bằng mạng nơ-ron nhân tạo để tính điều kiện $l_{cd} \leq l_{max}$ của mỗi đai cắt làm việc. Khi điều kiện trên không thỏa mãn chứng tỏ dụng cụ cắt không thể gia công đến hết chương trình NC hiện tại, vì vậy có hai cách tiến hành để xem xét việc gia tăng thêm khả năng cắt của dụng cụ cắt như sau:

Cách 1: Quay trở lại phần mềm CAM đang dùng để tạo chương trình gia công, thay đổi định hướng dao phay cầu (ví dụ dùng chức năng “Tilt Tool Axis” của phần mềm NX CAM) để tạo đường chạy dao mới nhằm tạo sự phân bố

điểm tiếp xúc CC và điểm vị trí CL khác nhau (hình 3.9). Bản chất cách làm này là thực hiện dịch đoạn lưỡi cắt làm việc một cách bị động, tức thay đổi ngẫu nhiên định hướng dao phay để thực hiện dịch đoạn lưỡi cắt làm việc. Cách này không đạt hiệu quả khai thác khả năng cắt của lưỡi cắt cao, nhưng dễ thực hiện nhờ nhiều chức năng tiên tiến của phần mềm CAM đã có sẵn.

Cách 2: Từ dữ liệu vị trí dao CL-Data chứa quỹ đạo các điểm CC và CL thu được, tạo thêm chức năng của phần mềm CTMSoft thực hiện hậu xử lý post-processing tạo ra đường chạy dao mới chủ động được dịch đoạn lưỡi cắt làm việc để khai thác khả năng cắt của toàn bộ lưỡi cắt. Cách này đạt hiệu quả cao, nhưng rất khó khăn trong xây dựng chức năng hậu xử lý post-processing trong thuật toán và kỹ thuật lập trình khi xây dựng phần mềm này.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

- Từ đặc điểm gia công dao phay cầu cho thấy có thể thực hiện dịch đoạn lưỡi cắt làm việc bằng cách thay đổi góc nghiêng dao.
- Dữ liệu vị trí dao CL-Data từ phần mềm CAM là cơ sở tính chiều dài chạy dao của đai cắt làm việc trong một chương trình gia công NC. Chiều dài cắt cho phép lớn nhất của đai cắt làm việc được dự đoán bằng mạng nơ-ron nhân tạo.
- Phân bố lại đai cắt làm việc bằng phương án dịch đoạn lưỡi cắt làm việc để thỏa mãn chiều dài chạy dao không vượt quá chiều dài cắt cho phép lớn nhất của đai cắt làm việc, sẽ làm lượng mòn được phân bố đều trên lưỡi cắt, nâng cao tuổi bền của dao phay cầu.
- Phần mềm CTMSoft hỗ trợ giải pháp nâng cao tuổi bền dụng cụ được viết bằng ngôn ngữ lập trình Visual C# với các mô đun chức năng cho phép giải quyết các bài toán đặt ra của luận án.

Chương 4

THỰC NGHIỆM KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG CỦA CHẾ ĐỘ CẮT VỚI CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ VÀ KIỂM CHỨNG GIẢI PHÁP NÂNG CAO TUỔI BỀN DỤNG CỤ

4.1. Khảo sát ảnh hưởng của chế độ cắt đối với các thông số công nghệ

4.1.1. Xây dựng mô hình thí nghiệm

Quá trình tối ưu theo phương pháp Taguchi trên cơ sở tám bước (8-steps) để lên kế hoạch, thực hiện và đánh giá kết quả của ma trận thực nghiệm nhằm xác định mức tốt nhất của các yếu tố điều khiển [18][49]. Tám bước tiến hành sẽ thực hiện theo trình tự như sau:

1. Xác định các thông số đầu vào và thông số đầu ra.
2. Xác định số lượng mức của từng thông số kiểm tra.
3. Lựa chọn bảng trực giao phù hợp, gán từng giá trị của từng thông số đầu vào kiểm tra vào trong bảng.
4. Thực hiện thí nghiệm theo thứ tự ngẫu nhiên trên cơ sở sắp xếp của mảng trực giao.
5. Đo lường và thu thập dữ liệu.
6. Tính toán tỷ số S/N cho mỗi sự kết hợp của các thông số kiểm tra.
7. Tìm mức tối ưu cho mỗi thông số kiểm tra.
8. Thực hiện các thí nghiệm kiểm chứng mức tối ưu.

4.1.1.1. Các thông số đầu vào

Theo những phân tích trong mục 1.2.3, thấy rằng có rất nhiều thông số ảnh hưởng đến tuổi bền dao phay cầu, có thể chia thành hai loại:

1. Các thông số điều khiển được như tốc độ cắt, chiều sâu cắt, lượng tiến dao, góc nghiêng dao, chế độ trơn nguội...
2. Các thông số không điều khiển xuất hiện ngẫu nhiên (gọi là thông số nhiễu) như rung động máy, rung động phôi gia công, điều kiện môi trường, nhiệt cắt, kỹ năng vận hành...

Trong các thông số nêu trên thì các thông số điều khiển được có ảnh hưởng mạnh nhất tới kết quả quá trình phay nên ưu tiên chọn chúng làm các đại lượng đầu vào. Nhưng cũng chỉ có thể lựa chọn một số thông số chính để tiến hành thực nghiệm, bởi nếu tăng số yếu tố đầu vào sẽ làm tăng số lượng thí nghiệm đồng nghĩa với tăng chi phí (do cần gia công đến hết tuổi bền của dụng cụ).

Sau khi tham khảo các nghiên cứu [42][91][94][96] với mô hình thí nghiệm tương đương đã có căn cứ chọn các thông số đầu vào thí nghiệm là: tốc độ cắt, lượng tiến dao, chiều sâu cắt và góc nghiêng trục dao. Khoảng giá trị của các thông số gia công được chọn dựa trên cơ sở tham khảo các tài liệu như sổ tay tra cứu chế độ cắt, bảng khuyến nghị của hãng sản xuất dụng cụ và tham khảo tại một số nhà máy cơ khí trong quân đội. Các dải giá trị cụ thể đó được lựa chọn như sau:

1. Tốc độ cắt: hãng sản xuất khuyến nghị dải vận tốc cắt với dao liên thân khi gia công vật liệu thép hợp kim là $150 \div 250$ m/phút.
2. Chiều sâu cắt: đối với gia công tinh, $a_p \leq 0.3\text{mm}$ [94].
3. Lượng tiến dao: đối với gia công tinh, $f_z = 0.05 \div 0.2\text{mm}$.
4. Góc nghiêng trục dao: gia công trên máy CNC góc nghiêng thay đổi từ $0^\circ \div 75^\circ$ [98].

Vận tốc cắt tính theo đường kính cắt hiệu dụng (theo mục 1.1.3) do đó khi gia công thí nghiệm phải điều khiển tốc độ quay trục chính n (vòng/phút) sao cho góc nghiêng trục dao và vận tốc cắt là hai thông số độc lập với nhau.

4.1.1.2. Các thông số đầu ra

Các thông số đầu ra của thí nghiệm khi phay bằng dao phay cầu trên máy CNC được lựa chọn bao gồm:

1. Tuổi bền dao phay cầu được đánh giá thông qua lượng mòn mặt sau VB với lượng mòn tối đa là 0.3mm khi gia công tinh (theo 1.2.2.2).
2. Chất lượng bề mặt được đánh giá thông qua chỉ tiêu sai lệch trung bình số học của profin nhám bề mặt R_a , phương đo vuông góc với đường tiến dao (theo 1.1.4).

3. Năng suất gia công được đánh giá bằng tổng khối lượng kim loại bóc tách được trong quá trình phay hoặc theo tốc độ bóc tách vật liệu MRR (theo 1.1.5).

4.1.1.3. Các thông số cố định

Là những đại lượng không thay đổi, liên quan đến điều kiện thí nghiệm trong khi gia công như: thiết bị gia công (máy phay CNC và trang bị công nghệ), vật liệu phôi, dụng cụ cắt, dung dịch trơn nguội, chương trình NC...

4.1.2. Các điều kiện thí nghiệm

4.1.2.1. Máy phay gia công

Các thí nghiệm sẽ được gia công trên máy phay CNC 5 trục SPINNER U5-620 tại phòng thí nghiệm bộ môn Chế tạo máy – khoa Cơ khí – HVKTQS. Các thông số kỹ thuật của máy gia công được trình bày theo quy định ISO 8688-2/1989, chi tiết như trong bảng 4.1:

Bảng 4.1 Đặc tính kỹ thuật máy phay SPINNER U5-620

Đặc tính kỹ thuật	Giá trị
Hành trình làm việc trục X (mm)	620
Hành trình làm việc trục Y (mm)	520
Hành trình làm việc trục Z (mm)	460
Góc quay lớn nhất trục B/C (độ)	$(-90^0 \div +90^0)/360^0$
Khối lượng phôi lớn nhất (kg)	320
Tốc độ tiến dao lớn nhất không tải (m/phút)	40
Tốc độ quay bàn máy lớn nhất (vòng/phút)	250
Tốc độ trục chính lớn nhất (vòng/phút)	12,000
Công suất trục chính (kW)	15
Xuất xứ	Cộng hòa liên bang Đức

4.1.2.2. Mẫu gia công thí nghiệm

Tiêu chuẩn ISO 8688-2/1989 quy định phôi dùng trong thí nghiệm phải có mặt cắt ngang hình chữ nhật, với chiều rộng có kích thước tối thiểu bằng hai lần đường kính dao, chiều dài có kích thước tối thiểu bằng mười lần đường kính dao. Phôi cũng được lựa chọn phù hợp với không gian làm việc của máy và đồ gá ê tô, nên được chọn kích thước là 220x160x30 mm.

Vật liệu của mẫu gia công là thép hợp kim có mác 40Cr, đạt độ cứng cao sau nhiệt luyện, có độ dai va đập và chống biến dạng tốt. Thành phần hóa học và đặc tính cơ lý được cho trong bảng 4.2 và bảng 4.3. Phôi được nhiệt luyện bằng phương pháp tôi thể tích trong bể muối nóng chảy nhằm đạt độ cứng đồng đều và độ thấm tôi sâu. Sau khi nhiệt luyện, bề mặt trên và dưới được mài phẳng nhằm tạo chuẩn gá đặt đảm bảo góc nghiêng khi gia công. Độ cứng bề mặt được đo tại năm điểm cách đều nhau trên bề mặt và lấy giá trị độ cứng trung bình, sai lệch giá trị đo độ cứng tại mỗi điểm đo không vượt quá $\pm 5\%$.

Bảng 4.2 Thành phần vật liệu thép 40Cr (GOST 4543-71)

Thành phần	C	Mn	P	S	Si	Cr
(%)	0.36÷0.44	0.5÷0.8	0.035	0.035	0.17÷0.37	0.8÷1.1

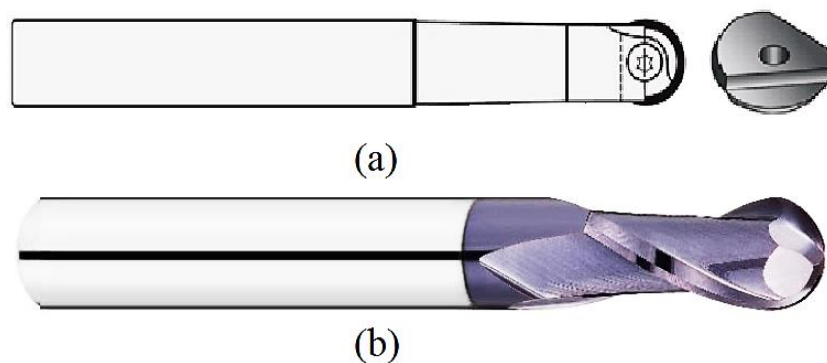
Bảng 4.3 Cơ tính thép 40Cr, vật liệu mẫu gia công thí nghiệm

Re, MPa	Rm, MPa	A5, %	HRC
293	572	28.6	45 – 50

4.1.2.3. Dụng cụ cắt

Do phôi thí nghiệm đã được tôi thể tích đảm bảo độ thấm tôi và mài phẳng nên chỉ thực hiện phay bán tinh nhằm tạo mặt phẳng nghiêng chuẩn (loại bỏ sai số do gá đặt). Phay bán tinh sử dụng dao phay cầu gấn mảnh hợp kim loại một mảnh có hai lưỡi cắt nhằm tăng năng suất cắt. Số hiệu mảnh cắt BNR-16MM-CB đường kính 16mm, vật liệu lớp phủ là TiAlN (hình 4.1-a).

Dao phay cầu chính được dùng để thí nghiệm phay tinh là loại dao liên thân mã hiệu QBLMx1010-R5-75-10 với hai lưỡi cắt có góc xoắn 30° và được phủ TiAlN (hình 4.1-b).



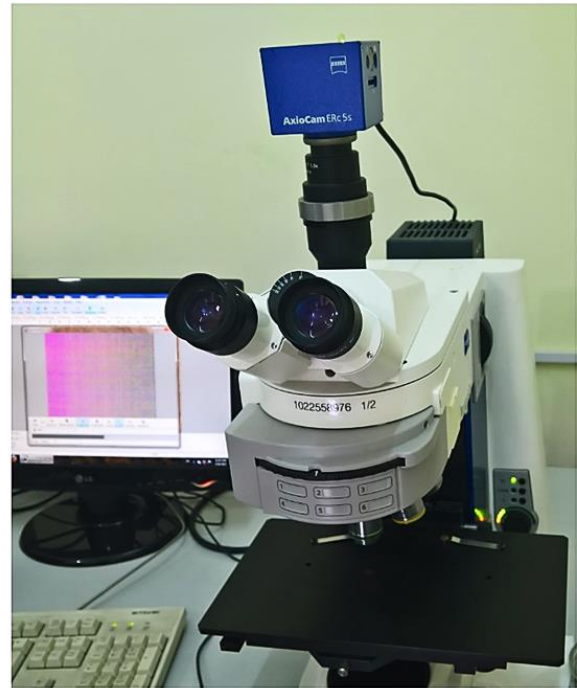
Hình 4.1 Dao phay cầu sử dụng cho gia công thí nghiệm, (a)- dao dùng phay bán tinh, (b)- dao dùng phay tinh

4.1.2.4. Kính hiển vi điện tử đo lường mòn lưỡi cắt

Trong quá trình gia công thí nghiệm cần phải thực hiện giám sát trạng thái và đo lường mòn mặt sau của lưỡi cắt ngay trong-quá trình (in-process) nên đã sử dụng kính hiển vi số AD7013MT. Đây là loại thiết bị có kích thước nhỏ gọn, dễ dàng bố trí ngay trong khu vực gia công và kết nối dễ dàng với phần mềm máy tính. Bố trí kính hiển vi đo trong-quá trình như trên hình 4.2-a, tham khảo theo phương pháp trình bày tại mục 1.2.3 [102]. Sau khi dừng thí nghiệm khi lượng mòn đạt đến giới hạn, cần chụp ảnh lưỡi cắt với độ chi tiết và độ phóng đại cao bằng cách sử dụng kính hiển vi điện tử AXIO-A2M của hãng Zeiss dùng đo lường mòn chính xác để xác nhận (hình 4.2-b).



(a)



(b)

Hình 4.2 Kính hiển vi đo lường mòn mặt sau, (a)- kính hiển vi đo trong-quá trình, (b)- kính hiển vi đo xác nhận

4.1.2.5. Máy đo độ nhám

Đo độ nhám bằng máy đo độ nhám SJ-301 tại Trung tâm đo lường – Viện Công Nghệ - Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng. Thiết bị cho phép đo được giải đo rộng theo tiêu chuẩn độ nhám: EN ISO, JIS, ANSI cùng bộ lọc kỹ thuật số Gauss, 2CR75 và PC75 cho kết quả đo tin cậy với độ chính xác cao. Đặc tính kỹ thuật của máy đo độ nhám SJ-301 được cho trong bảng 4.4.

Bảng 4.4 Đặc tính kỹ thuật máy đo độ nhám SJ-301

Đặc tính kỹ thuật	Giá trị
Dải đo	0.005 ÷ 16 μ m (R_a , R_q)
Hệ đơn vị	mét, inch
Độ phân giải	0.001 μ m

4.1.3. Xây dựng quy hoạch thực nghiệm

4.1.3.1. Xây dựng bảng thí nghiệm trực giao Taguchi

Sử dụng phương pháp phân tích Taguchi để phân tích mức độ ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến các đầu ra. Do đó các chế độ cắt cho thí nghiệm theo phương pháp Taguchi phải được sắp xếp theo bảng ma trận trực giao, bảng này có số lượng thí nghiệm ít nhất nhưng đạt được lượng thông tin nhiều nhất. Tuy nhiên, dự định sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo ANN làm công cụ dự đoán thì cần đảm bảo số lượng dữ liệu phục vụ huấn luyện. Không có giới hạn cụ thể số lượng dữ liệu dùng huấn luyện ANN, nếu số lượng quá ít sẽ không tìm ra mối quan hệ của mạng được chính xác, ngược lại nếu tiến hành nhiều thí nghiệm sẽ tăng thêm chi phí. Trong một nghiên cứu của tác giả Briceno [22] cũng chỉ sử dụng 35 thí nghiệm kế thừa từ bảng thí nghiệm trực giao để dùng cho huấn luyện ANN nhưng vẫn đạt độ chính xác cần thiết. Mạng nơ-ron nhân tạo sau khi xây dựng xong có khả năng bổ sung dữ liệu huấn luyện trong tương lai để cải thiện độ chính xác dự đoán. Vì vậy, sau khi khẳng định được kết quả nghiên cứu là tích cực thì có thể tiếp tục mở rộng thí nghiệm để hoàn thiện mạng nơ-ron nhân tạo cho kết quả dự đoán tốt hơn.

Số lượng mức của yếu tố đầu vào có ảnh hưởng đến mức độ quan hệ giữa các yếu tố đầu vào và đáp ứng (đầu ra) và xác định yếu tố nào ảnh hưởng nhất đến đáp ứng của quá trình. Lựa chọn số lượng mức tùy thuộc vào loại ảnh hưởng của các yếu tố này đến đáp ứng. Nếu ảnh hưởng là tuyến tính thì số mức nên chọn là hai mức, nếu ảnh hưởng là phi tuyến thì số mức của các yếu tố này có thể là ba hoặc bốn (tùy thuộc mối quan hệ là bậc hai hoặc bậc ba). Tham khảo các nghiên cứu liên quan và bản thân tác giả cũng đã thực hiện các thí nghiệm khảo sát trước đó [8][9], cho thấy số lượng mức được lựa chọn hợp lý nhất là bốn mức. Kết hợp lựa chọn dải giá trị các yếu tố đầu vào (mục 4.1.1.1), giá trị mức của từng yếu tố được liệt kê trong bảng 4.5 sau đây:

Bảng 4.5 Giá trị các mức của các yếu tố đầu vào

STT	Yếu tố đầu vào	Giá trị các mức				Đơn vị đo
		1	2	3	4	
1	Vận tốc cắt (V_c)	90	120	150	180	m/phút
2	Lượng tiến dao (f_z)	0.05	0.10	0.15	0.20	mm/răng
3	Chiều sâu cắt (a_p)	0.05	0.10	0.15	0.20	mm
4	Góc nghiêng (θ)	15	30	45	60	độ

Theo lựa chọn có bốn yếu tố đầu vào, mỗi yếu tố được chọn bốn mức giá trị, do vậy chọn bảng trực giao Taguchi $L_{16}(4^4)$ với 16 thí nghiệm là phù hợp [83]. Sử dụng phần mềm thống kê Minitab® cho ra bảng trực giao với các mức của từng yếu tố được mã hóa (1, 2, 3 và 4) thể hiện trong phụ lục 1 (trang 132), thay giá trị mức của từng yếu tố trong bảng 4.5 vào bảng trực giao $L_{16}(4^4)$ có được dữ liệu thực nghiệm như trong bảng 4.6.

Bảng 4.6 Chế độ cắt của các thí nghiệm theo bảng trực giao $L_{16}(4^4)$

Thí nghiệm	Thông số đầu vào điều khiển			
	Vận tốc cắt V_c (m/ph)	Lượng tiến dao f_z (mm)	Chiều sâu cắt a_p (mm)	Góc nghiêng θ (độ)
1	90	0.05	0.05	15
2	90	0.10	0.10	30
3	90	0.15	0.15	45
4	90	0.20	0.20	60
5	120	0.05	0.10	45
6	120	0.10	0.05	60
7	120	0.15	0.20	15
8	120	0.20	0.15	30
9	150	0.05	0.15	60
10	150	0.10	0.20	45
11	150	0.15	0.05	30
12	150	0.20	0.10	15
13	180	0.05	0.20	30
14	180	0.10	0.15	15
15	180	0.15	0.10	60
16	180	0.20	0.05	45

4.1.3.2. Các thí nghiệm bổ sung dữ liệu huấn luyện

Sử dụng phương pháp mạng nơ-ron nhân tạo trong hồi qui hàm thực nghiệm thì số thí nghiệm càng nhiều sẽ cho dự đoán càng chính xác nên không có giới hạn nào về số lượng lớn nhất các thí nghiệm. Căn cứ vào số lượng thông số đầu vào và số lượng mức thì bộ chế độ cắt đầy đủ cần phải thực hiện là 256 thí nghiệm. Tuy nhiên, các thí nghiệm về tuổi bền dao không thể thực hiện bộ thí nghiệm đầy đủ vì rất tốn kém về chi phí và thời gian. Trong khuôn khổ của một luận án nghiên cứu hướng ứng dụng của trí tuệ nhân tạo, nên chỉ thực hiện thêm một vài thí nghiệm bổ sung nhằm chứng minh cho sự đúng đắn của mô hình mạng nơ-ron nhân tạo. Sau khi đã khẳng định cách tiếp cận là đúng đắn sẽ có cơ sở thực hiện mở rộng trong tương lai. Chế độ cắt của thí nghiệm bổ sung được chọn trong bộ thí nghiệm đầu đủ, ngoài 16 thí nghiệm ban đầu (bảng 4.6) sẽ bổ sung thêm 12 thí nghiệm và được phân rải ra toàn bộ không gian thiết kế. Giá trị mức được mã hóa cho trong phụ lục 1 (trang 132). Thứ tự của thí nghiệm bổ sung đánh số tiếp tục từ 17 đến 28 như bảng 4.7.

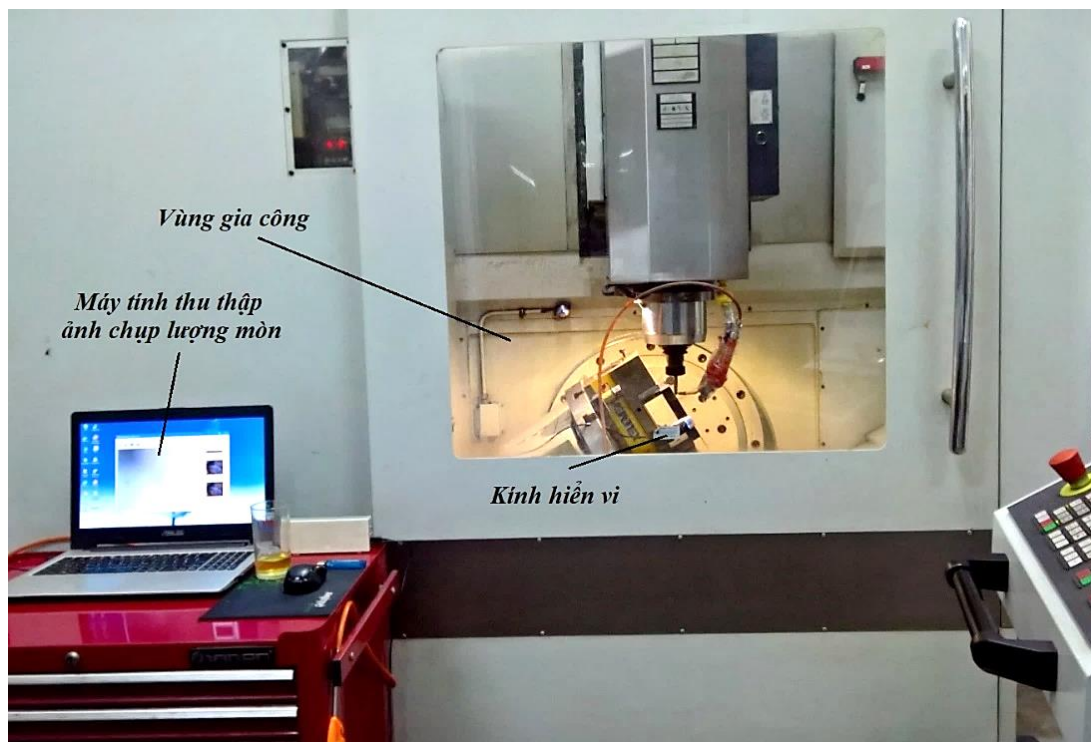
Bảng 4.7 Chế độ cắt của các thí nghiệm bổ sung

Thí nghiệm	Thông số đầu vào điều khiển			
	Vận tốc cắt V_c (m/ph)	Lượng tiến dao f_z (mm)	Chiều sâu cắt a_p (mm)	Góc nghiêng θ (độ)
17	90	0.05	0.05	60
18	90	0.15	0.10	30
19	90	0.20	0.20	15
20	120	0.05	0.05	60
21	120	0.10	0.15	45
22	120	0.20	0.20	15
23	150	0.05	0.05	60
24	150	0.10	0.15	30
25	150	0.20	0.20	15
26	180	0.05	0.05	60
27	180	0.15	0.10	45
28	180	0.20	0.20	15

4.1.4. Tiến hành thí nghiệm và thu thập dữ liệu

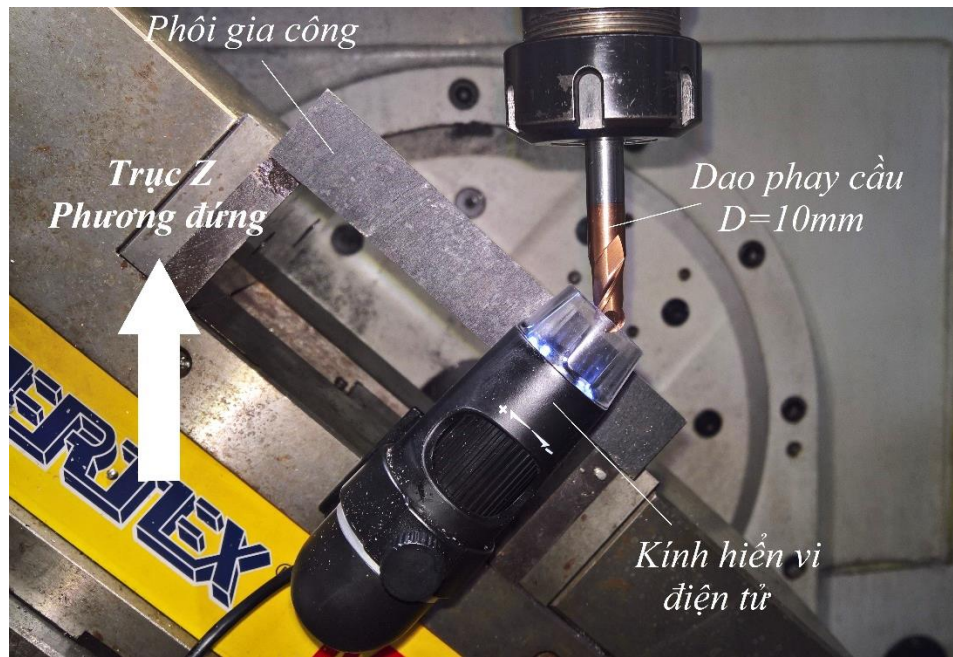
4.1.4.1. Chuẩn bị gia công thí nghiệm

Phôi cắt thử nghiệm được gá trên ê tô thủy lực, cạnh dài của phôi nằm dọc theo trục Y của máy nhằm giám hành trình chạy không, góc nghiêng trục dao được thiết lập qua góc quay của trục B của máy CNC 5 trục. Tất cả các thí nghiệm trên được thực hiện liên tục với điều kiện gia công hoàn toàn như nhau (dao, phôi...) nhằm tránh ảnh hưởng của các yếu tố nhiễu đến kết quả thí nghiệm. Giám sát trạng thái lưỡi dao và đo lượng mòn lưỡi dao phay trên cơ sở chụp ảnh trực tuyến được thiết lập giống mô hình của Chen Zhang [102]. Kính hiển vi chụp ảnh trực tuyến ngay trong quá trình gia công được gá đặt tại một vị trí cố định trên bàn máy và kết nối với máy tính bên ngoài chụp ảnh hiện trạng lưỡi cắt (hình 4.3).



Hình 4.3 Bố trí các thiết bị đo lường trên máy phay CNC 5 trục

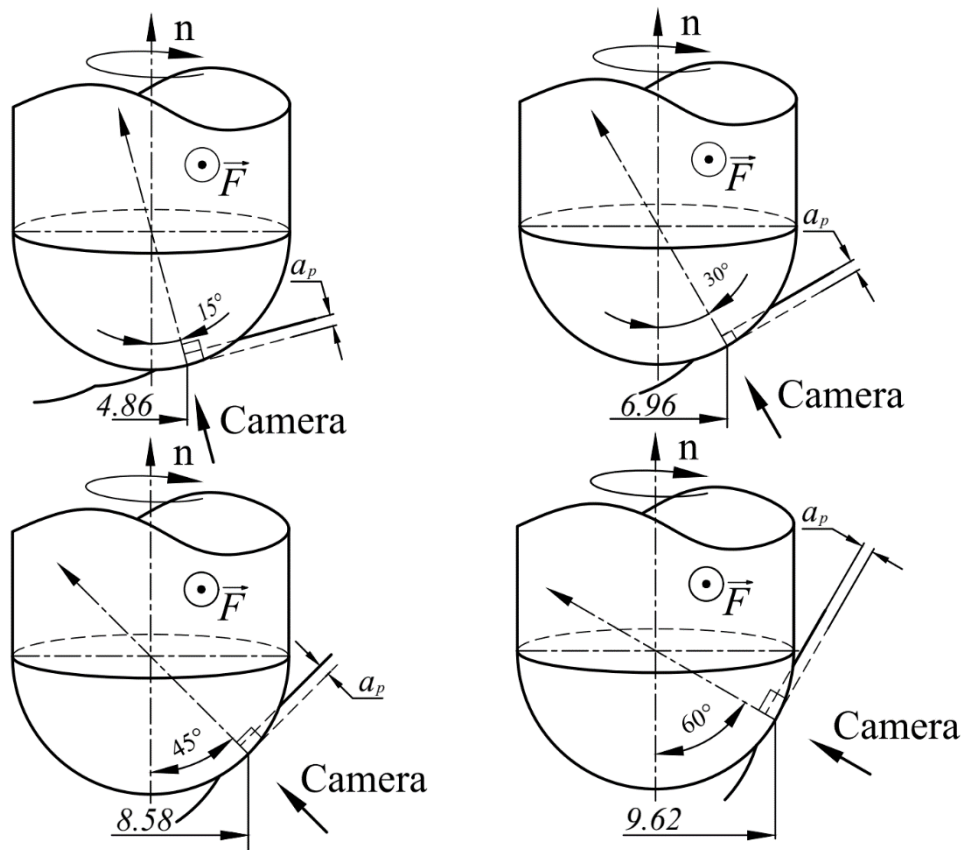
Mỗi mẫu thử được gá trên ê tô từ lúc bắt đầu cho đến khi dao phay hết tuổi bền. Trước khi xây dựng chương trình NC cho quá trình gia công thí nghiệm, sử dụng chức năng điều khiển tay JOG di chuyển dao phay để xác định vị trí đỉnh dao cũng như góc quay dao cho ảnh tốt nhất (hình 4.4). Đoạn mã lệnh để di chuyển trục chính đến kính hiển vi chèn bằng tay vào chương trình NC.



Hình 4.4 Vị trí thực hiện chụp ảnh mòn lưỡi cắt khi cắt thí nghiệm

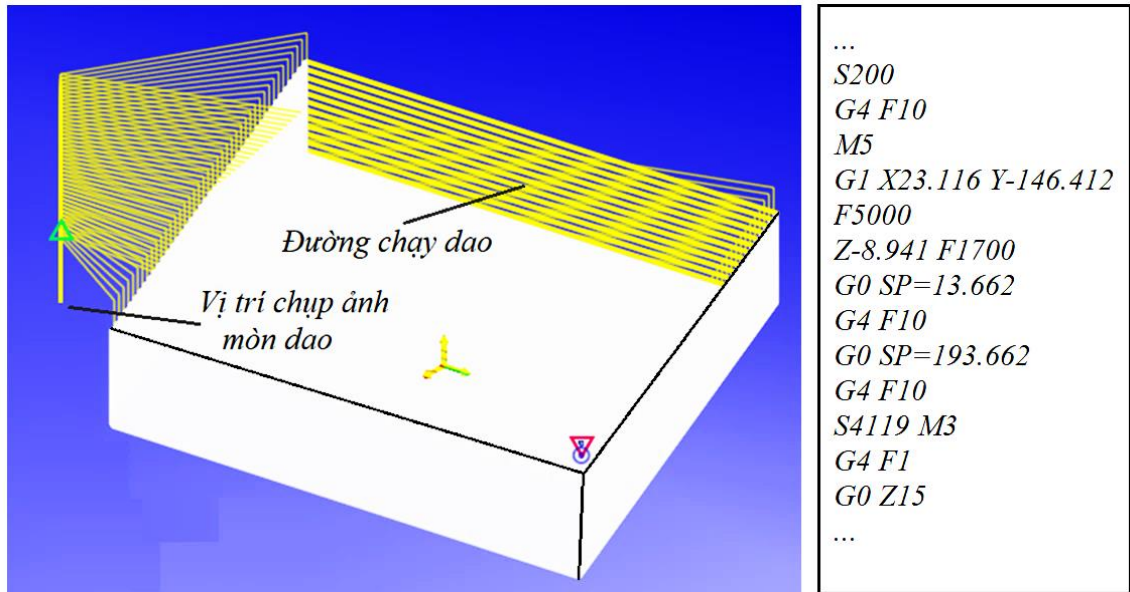
Theo phân tích trong mục 1.2.3.2, chọn định hướng dao *ngghiêng ngang* - *đi lên* trong xây dựng chương trình gia công NC có thể đạt được tuổi bền cao trong khi vẫn đảm bảo chất lượng bề mặt tốt nhất. Đường kính cắt hiệu dụng cần phải được xác định trước để tính toán tốc độ quay trục chính của máy phay CNC, là thông số đầu vào quan trọng cho lập chương trình NC. Trên hình 4.5 thể hiện bốn tư thế định hướng của dao đối với bề mặt phôi gia công trong các thí nghiệm, mỗi tư thế thể hiện giá trị đường kính hiệu dụng d_{eff} khác nhau, từ đó dễ dàng tính toán tốc độ vòng quay trục chính cho chương trình gia công NC (giá trị tính toán tốc độ vòng quay trục chính trong phụ lục 2 trang 133).

Chương trình gia công thí nghiệm được tạo bằng phần mềm Siemens NX (trước đây có tên gọi là Unigraphics NX) của hãng Siemens. Ưu điểm của phần mềm này là có thể tạo và tối ưu hóa chiến lược chạy dao, cho phép cải thiện chất lượng bề mặt và giảm thiểu thời gian gia công. Với giao diện gia công CAM mở, người dùng có thể dễ dàng tùy biến tạo thư viện chế độ công nghệ gia công tối ưu, tạo thư viện dao cụ, thư viện chương trình gia công mẫu (template), hoặc thêm các thanh công cụ do người dùng định nghĩa giúp rút ngắn thời gian lập trình gia công.



Hình 4.5 Đường kính cắt hiệu dụng tại góc nghiêng trục dao khác nhau

Tham khảo các bước tiến hành thí nghiệm của Wojciechowski [95], chọn chiều dài cắt cho mỗi lần chụp ảnh đo lường mòn là 10 đường chạy dao ngang (khoảng 2.2m). Mỗi thí nghiệm có giá trị góc nghiêng trục dao so với phôi khác nhau nên cần xác định vị trí dao so với kính hiển vi khác nhau. Sử dụng chế độ vận hành tay (JOG) để hiệu chỉnh vị trí dao sao cho quan sát lưới cắt trên kính hiển vi là rõ nét nhất, lấy tọa độ điểm chụp, sau đó viết đoạn Macro chu trình dịch chuyển dao cắt đến vị trí chụp ảnh (hình 4.6). Dao phay được đo lường mòn trên cả hai lưỡi cắt, nếu lượng mòn mặt sau của một trong hai lưỡi cắt đạt giá trị $VB \geq 0.3mm$ (khi mòn đồng dạng) hoặc $VB \geq 0.5mm$ (khi mòn bất đồng dạng) thì đó là thời điểm dao đã hết tuổi bền. Đơn vị tuổi bền dụng cụ có thể là đơn vị chiều dài cắt hoặc đơn vị thời gian. Trong mỗi thí nghiệm, giá trị lượng tiến dao f_z không thay đổi nên có thể đếm số đường chạy dao để quy đổi ra chiều dài cắt (đơn vị mét) hoặc thời gian cắt (đơn vị phút) tương ứng.

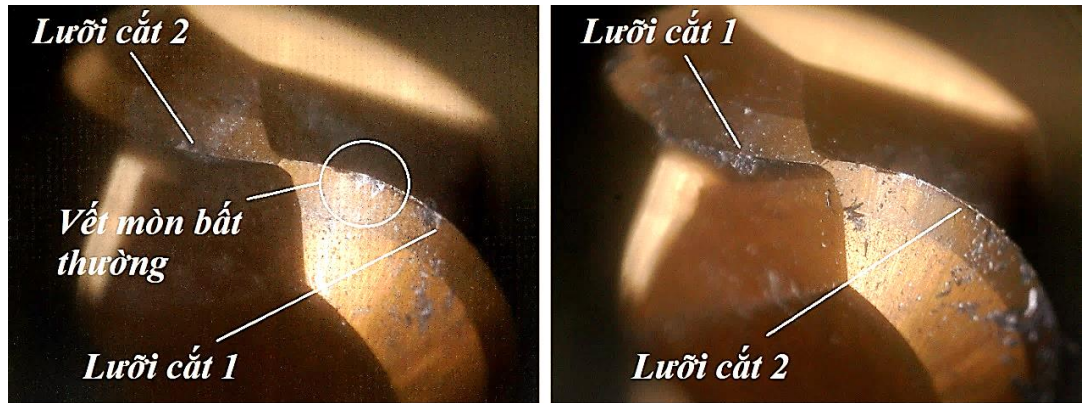


Hình 4.6 Đường chạy dao đến vị trí chụp ảnh mòn lưỡi dao

4.1.4.2. Thực hiện gia công và giám sát lượng mòn lưỡi dao

Định kỳ sau khi cắt được 2.2 m chiều dài sẽ thực hiện di chuyển dao cắt đến vị trí kính hiển vi đo lượng mòn mặt sau, cả hai lưỡi cắt được chụp ảnh bằng cách lập chu trình quay dao 180° theo trục SP (ký hiệu SP là góc quay trục chính trên bộ điều khiển Siemens 840D). Theo lập trình, thời gian mỗi lưỡi cắt dừng tại vị trí chụp ảnh là 10 giây (lệnh “G4 F10”), đủ thời gian làm sạch lưỡi cắt bằng khí nén và chụp ảnh lưỡi cắt. Tất cả các tệp tin ảnh chụp cả hai lưỡi cắt được lưu trữ trong bộ nhớ trên máy tính.

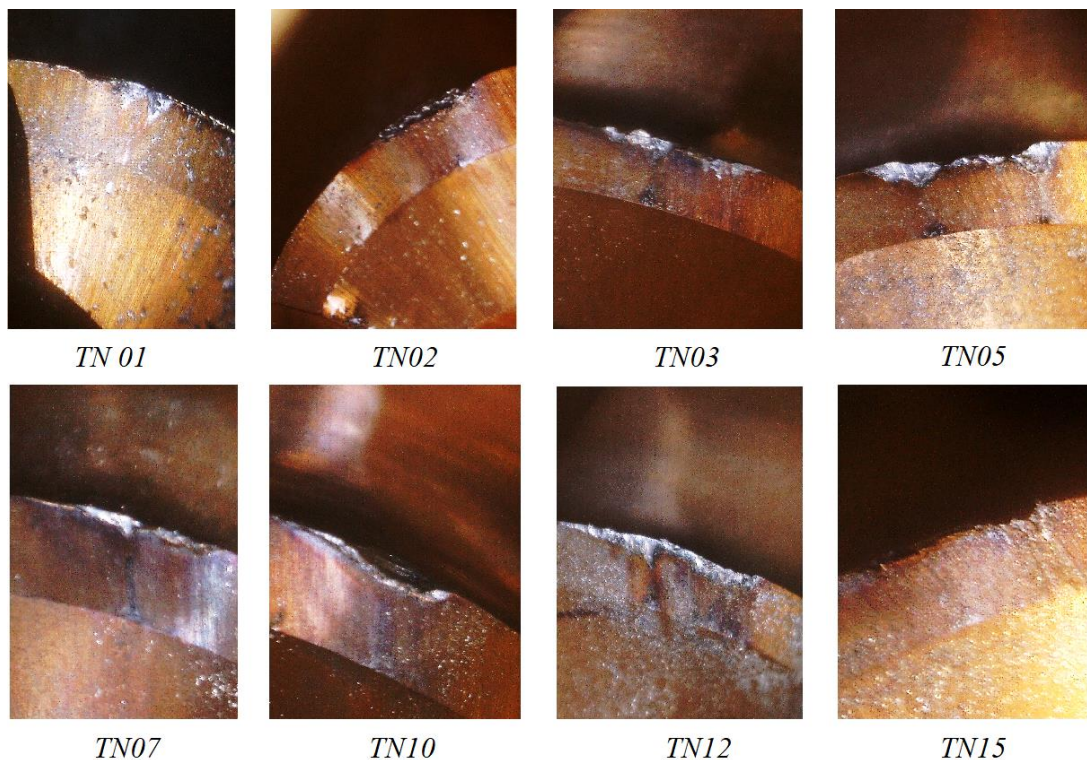
Trong quá trình giám sát tình trạng lưỡi cắt trực tuyến (online), phải dừng gia công ngay khi quan sát thấy xuất hiện lượng mòn bất thường (do yếu tố nhiễu tác động). Ví dụ khi thực hiện thí nghiệm số 1, tại lần chụp ảnh thứ 16 (chiều dài cắt 35.2 m) quan sát được lượng mòn tại lưỡi cắt số 1 xuất hiện lượng mòn bất thường (hình 4.7). Nguyên nhân có thể do phôi gá đặt không đảm bảo góc độ dẫn đến chiều sâu cắt quá lớn trong lát cắt đầu tiên, chất lượng dụng cụ cắt không đồng đều hoặc gá kẹp dao cắt không đảm bảo đồng trục gây nên mẻ lưỡi cắt bất thường. Tất cả các trường hợp xảy ra các vết mòn bất thường như trên được giám sát trực tuyến ngay trong khi gia công và loại bỏ ngay nhằm tránh ảnh hưởng sai số quá lớn đến kết quả thí nghiệm.



Hình 4.7 Ảnh chụp lưỡi cắt xuất hiện vết mòn bất thường

4.1.4.3. Xác định giá trị tuổi bền dụng cụ qua lượng mòn mặt sau

Sau khi tiến hành thí nghiệm cắt và thu thập các ảnh chụp mòn lưỡi dao được lưu thành các tệp tin ảnh trong mỗi thư mục riêng của mỗi bộ thí nghiệm trên máy tính. Sử dụng phần mềm chuyên dụng (kèm theo kính hiển vi số AD7013MT) tiến hành hiệu chuẩn thước đo và thực hiện đo vết mòn trên lưỡi cắt. Dữ liệu ảnh chụp thể hiện chi tiết về vết mòn của tất cả các thí nghiệm được trình bày trong phụ lục 3, trang 134. Hình 4.8 thể hiện vết mòn lưỡi cắt đạt đến giới hạn tuổi bền (0.3 mm) của dao phay cầu trong một số thí nghiệm điển hình.



Hình 4.8 Một số hình ảnh mòn điển hình trong các thí nghiệm

Chiều dài cắt giữa các lần chụp là 2.2 m, mỗi lần thu được hai ảnh của lưỡi cắt nên dựa vào thứ tự ảnh chụp có thể tính ra chiều dài cắt tương ứng. Gọi k là số thứ tự của ảnh chụp có lượng mòn đạt giới hạn tuổi bền, với dao cắt có hai lưỡi cắt ($z = 2$) thì chiều dài cắt được tính như công thức (4.1).

$$L_{\text{cắt}} = \frac{k * 2.2}{z} = 1.1k \quad (m) \quad (4.1)$$

Đơn vị tuổi bền nếu tính theo thời gian gia công bằng phút thì căn cứ vào đại lượng tốc độ tiến dao f (mm/phút), quy đổi theo công thức (4.2):

$$f = 2 \cdot f_z \cdot n = \frac{L_{\text{cắt}} * 1000}{t} \Rightarrow t = \frac{L_{\text{cắt}} * 500}{f_z \cdot n} \quad (4.2)$$

trong đó n : tốc độ trục chính, được tính theo công thức (4.3) sau:

$$n = \frac{V_c * 1000}{\pi \cdot D_{ef}} \quad (\text{vòng/phút}) \quad (4.3)$$

Theo công thức (4.2) có thể tính toán thời gian cắt khi các đại lượng đã biết trước là: lượng chạy dao f_z , tốc độ trục chính n . Từ đó chiều dài cắt $L_{\text{cắt}}$ được tính thông qua công thức (4.1). Toàn bộ kết quả tính toán tuổi bền theo chiều dài cắt và thời gian cắt được trình bày trong bảng 4.8.

Bảng 4.8 Giá trị tuổi bền dụng cụ được xác định từ các thí nghiệm

STT	Vận tốc cắt V_c (m/phút)	Lượng tiến dao răng f_z (mm/răng)	Chiều sâu cắt a_p (mm)	Góc nghiêng θ (độ)	Thứ tự ảnh chụp	Chiều dài cắt (m)	Thời gian cắt (phút)
1	90	0.05	0.05	15	411	452.1	618.6
2	90	0.10	0.1	30	349	383.9	443.5
3	90	0.15	0.15	45	283	311.3	310.8
4	90	0.20	0.2	60	177	194.7	165.0
5	120	0.05	0.1	45	263	289.3	631.6
6	120	0.10	0.05	60	239	262.9	319.3
7	120	0.15	0.2	15	171	188.1	85.2
8	120	0.20	0.15	30	156	171.6	78.2
9	150	0.05	0.15	60	151	166.1	334.6
10	150	0.10	0.2	45	114	125.4	115.2
11	150	0.15	0.05	30	188	206.8	89.1
12	150	0.20	0.1	15	130	143.0	33.4
13	180	0.05	0.2	30	128	140.8	177.4

14	180	0.10	0.15	15	138	151.8	64.4
15	180	0.15	0.1	60	94	103.4	57.0
16	180	0.20	0.05	45	102	112.2	39.2
17	90	0.05	0.05	60	374	411.4	1332.6
18	90	0.15	0.1	30	316	347.6	267.7
19	90	0.20	0.2	15	225	247.5	112.1
20	120	0.05	0.05	60	276	303.6	737.6
21	120	0.10	0.15	45	210	231.0	259.4
22	120	0.20	0.2	15	119	130.9	44.5
23	150	0.05	0.05	60	202	222.2	431.9
24	150	0.10	0.15	30	149	163.9	119.5
25	150	0.20	0.2	15	70	77.0	20.9
26	180	0.05	0.05	60	180	198.0	320.7
27	180	0.15	0.1	45	118	129.8	63.0
28	180	0.20	0.2	15	52	57.2	13.0

Kết quả sau tính toán trên bảng 4.8 cho thấy, nếu xét tuổi bền theo thời gian gia công thì có chênh lệch giá trị thời gian cắt giữa các thí nghiệm là rất đáng kể. Thí nghiệm số 28 có thời gian cắt rất thấp là 13.0 phút, trong khi thí nghiệm số 17 đạt thời gian cắt 1332.6 phút. Lý giải cho điều này là tốc độ tiến dao f khác nhau giữa hai thí nghiệm do sự khác nhau giá trị bán kính cắt hiệu dụng. Thí nghiệm số 17 có giá trị $f = 308.7$ (mm/phút) và thí nghiệm số 28 có giá trị $f = 4416.0$ (mm/phút) theo phụ lục 2 trang 133. Vì vậy, để so sánh đánh giá tuổi bền dụng cụ khi cùng gia công một bề mặt gia công nên sử dụng chiều dài cắt làm thước đo tuổi bền dụng cụ. Lựa chọn này cũng rất hợp lý vì liên quan trực tiếp đến tính toán năng suất cắt của dao phay cầu.

4.1.4.4. Thu thập giá trị nhám bề mặt và năng suất gia công

Đối với hoạt động gia công tinh thì nhám bề mặt là thông số quan trọng, ảnh hưởng lớn đến tính chất làm việc của chi tiết máy: tính chống mòn, chống mỏi, chống ăn mòn hóa học và ổn định mối lắp ghép. Do đó trong thí nghiệm cần phải tiến hành thu thập giá trị nhám bề mặt sau gia công để đánh giá tính hiệu quả của phương pháp tối ưu. Thực ra, thu thập giá trị nhám bề mặt và năng

suất gia công trong mô hình thí nghiệm này không gặp trở ngại, không đòi hỏi bố trí thêm nhiều thiết bị đo và đặc biệt là không ảnh hưởng đến giá trị mục tiêu chính của thí nghiệm là tuổi bền vật liệu. Vì vậy cần thiết thu thập giá trị của hai thông số này nhằm phục vụ cho đánh giá tính hiệu quả thêm chính xác.

Xác định giá trị nhám bề mặt: Quá trình thực hiện gia công thí nghiệm được thực hiện liên tục, phôi gia công phải được kẹp cố định từ ban đầu cho đến lúc hết tuổi bền để đảm bảo chuẩn định vị nên không thể thực hiện đo độ nhám trong khi gia công mà được đo trên mặt cắt cuối cùng khi dao phay hết tuổi bền [28]. Phương đo độ nhám vuông góc đường tiến dao gia công, bởi vì đỉnh nhấp nhô của đường gờ loại 2 có ảnh hưởng nổi trội (theo 1.1.4). Mẫu đo và thiết bị đo được đặt trên đồ gá chuyên dụng đảm bảo gá đặt chắc chắn, mỗi mẫu được đo ba lần và lấy giá trị trung bình như trong bảng 4.9 sau đây:

Bảng 4.9 Giá trị sai lệch trung bình Ra của các thí nghiệm

Thí nghiệm	Sai lệch trung bình Ra (μm)	Thí nghiệm	Sai lệch trung bình Ra (μm)
1	0.71	15	0.71
2	0.94	16	0.68
3	1.35	17	1.01
4	1.58	18	1.00
5	0.81	19	1.39
6	0.74	20	0.83
7	1.16	21	1.02
8	1.14	22	1.13
9	0.88	23	0.58
10	1.11	24	0.68
11	0.63	25	1.13
12	0.71	26	0.54
13	0.94	27	0.71
14	0.55	28	1.13

Giá trị sai lệch trung bình số học Ra thay đổi trong khoảng 0.54 μm đến 1.58 μm tương đương cấp độ nhám 6 đến cấp độ nhám 8 (chất lượng bán tinh và tinh). Giá trị nhám bề mặt phụ thuộc nhiều vào phương đo vuông góc với đường tiến dao nên nó sẽ bị ảnh hưởng nhiều bởi bước dịch dao ngang a_e .

Phương pháp phổ biến và chính xác nhất để xác định năng suất gia công là cân khối lượng phôi trước gia công và khối lượng tại thời điểm xác định, khoảng chênh lệch về khối lượng chính là khối lượng kim loại cắt bỏ. Tuy nhiên khi phôi đã gá đặt cố định trên máy gia công và tránh gây nhiễu các thông số đo lường thì áp dụng phương pháp xác định năng suất bằng công thức (1.13). Tốc độ tiến dao f (mm/phút) có mối liên hệ với lượng tiến dao răng f_z theo công thức (4.2). Từ giá trị thông số đầu vào trong bảng 4.6 kết hợp với công thức (1.12), với dao cầu $R = 5\text{mm}$, khoảng dịch dao ngang cố định $a_e = 0.3\text{mm}$, tính được tốc độ bóc tách vật liệu MRR như trong bảng 4.10.

Bảng 4.10 Giá trị tốc độ bóc tách vật liệu của các thí nghiệm

Thí nghiệm	MRR (mm ³ /phút)	Thí nghiệm	MRR (mm ³ /phút)
1	11.30	15	48.25
2	23.58	16	42.33
3	47.82	17	4.50
4	69.22	18	40.88
5	15.00	19	147.66
6	11.56	20	6.36
7	136.60	21	42.71
8	108.98	22	196.87
9	19.89	23	7.74
10	57.20	24	60.21
11	31.64	25	242.79
12	137.23	26	8.78
13	48.09	27	67.35
14	94.75	28	284.75

Theo công thức (1.12), tốc độ bóc tách vật liệu MRR chỉ phụ thuộc vào tốc độ tiến dao f , chiều sâu cắt a_p và lượng dịch dao ngang a_e (cố định). Trong bảng 4.10, thí nghiệm số 17 có giá trị MRR thấp nhất do chiều sâu cắt và tốc độ tiến dao nhỏ nhất. Ngược lại thí nghiệm số 28 có giá trị MRR lớn nhất do có sự kết hợp chiều sâu cắt và tốc độ tiến dao lớn nhất.

4.2. Phân tích ảnh hưởng của chế độ cắt đến các thông số công nghệ

4.2.1. Ảnh hưởng của chế độ cắt đến tuổi bền

Phương pháp phân tích Taguchi đã được chọn từ bước xây dựng quy hoạch thực nghiệm (mục 4.1.3) dùng để phân tích ảnh hưởng của các chế độ cắt đến các mục tiêu đầu ra. Phương pháp Taguchi có thể tính toán bằng cách tự viết phần mềm có sử dụng các công thức tính trong mục 2.1.1. Tuy nhiên để đảm bảo độ tin cậy thì cần đối chứng với các phần mềm thương mại như Minitab® hoặc SPSS® rất phổ biến trong sử dụng thực tế [4].

Phương pháp Taguchi cho phép đánh giá mức độ tác động độc lập hoặc tác động lẫn nhau giữa các yếu tố chính, yếu tố không điều khiển được (yếu tố nhiễu). Tỷ số tín hiệu trên nhiễu S/N (Signal to Noise) được sử dụng để phân tích, nhằm đánh giá kết quả quá trình đảm bảo chính xác hơn. Tín hiệu (signal) thể hiện cho giá trị mong muốn và nhiễu (noise) thể hiện giá trị không mong muốn. Những thông số quá trình với tỷ số tín hiệu trên nhiễu S/N cao nhất luôn cho chất lượng tốt nhất với phương sai tối thiểu. Tỷ số S/N của mỗi mức thông số được tính toán bằng cách tìm giá trị trung bình trong mỗi mức tương ứng. Dữ liệu tính toán theo phương pháp Taguchi trên phần mềm Minitab® là 16 thí nghiệm theo bảng trực giao L16 từ bảng 4.8 (thí nghiệm số 1 đến số 16). Kết quả tính toán tỷ số S/N của tuổi bền (đơn vị chiều dài cắt) theo đánh giá “lớn hơn thì tốt hơn” thu được từ những mức của thông số thể hiện trên hình 4.9.

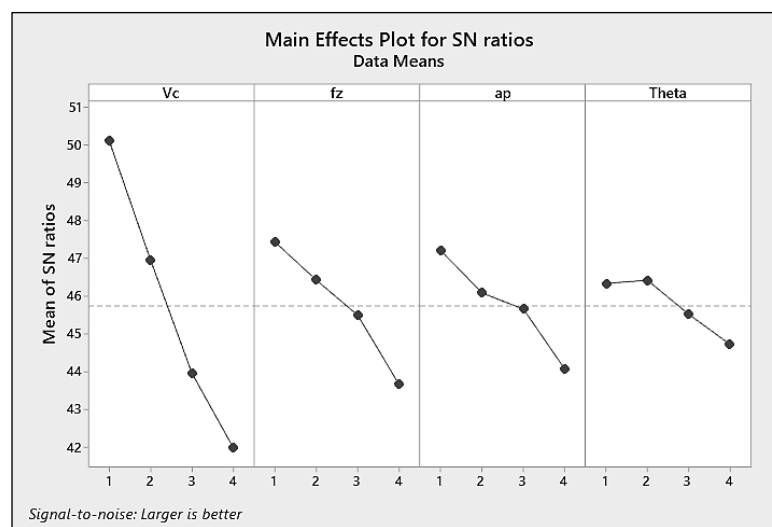
Response Table for Signal to Noise Ratios

Larger is better

Level	Vc	fz	ap	Theta
1	50.11	47.43	47.20	46.33
2	46.95	46.42	46.08	46.41
3	43.95	45.49	45.65	45.51
4	41.97	43.65	44.05	44.72
Delta	8.14	3.78	3.15	1.69
Rank	1	2	3	4

Hình 4.9 Bảng đáp ứng tỷ số S/N của tuổi bền dụng cụ trên Minitab®

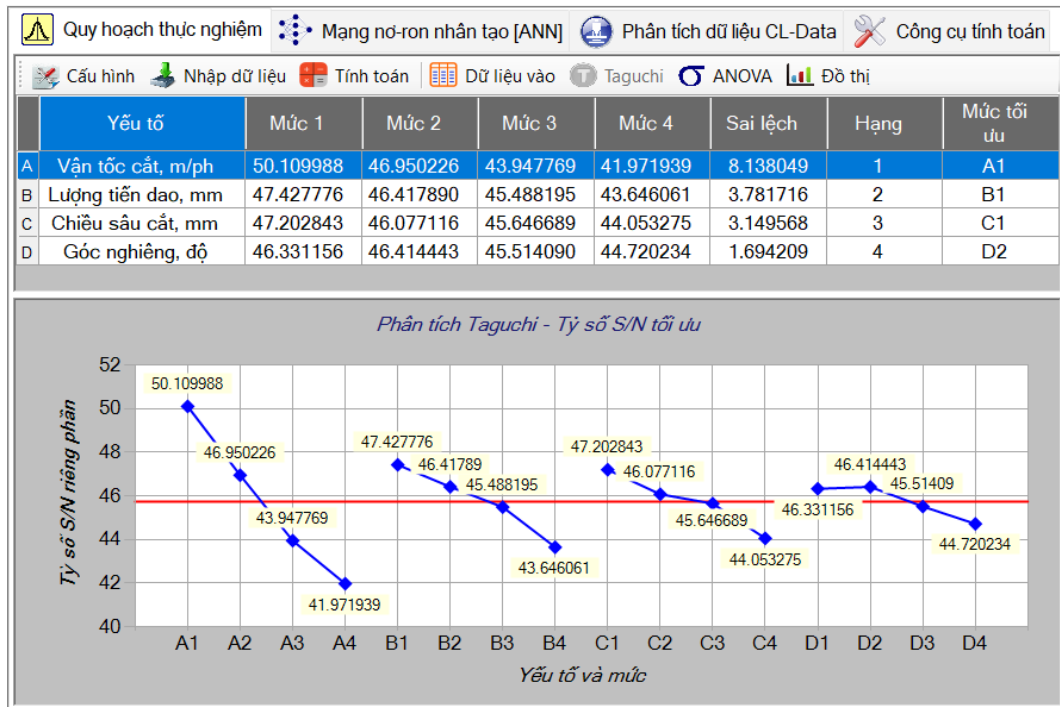
Sự phân hạng (Rank) căn cứ vào giá trị thống kê Delta (hình 4.9) dùng thể hiện độ lớn sự ảnh hưởng của yếu tố đó. Trị số thống kê Delta bằng giá trị tỷ số S/N lớn nhất trừ đi giá trị tỷ số S/N nhỏ nhất của các mức giá trị, giá trị chênh lệch càng lớn thì ảnh hưởng nhiều hơn trong góp phần ảnh hưởng của tham số. Hạng 1 biểu thị yếu tố đó có mức độ ảnh hưởng lớn nhất và hạng 4 biểu thị mức độ ảnh hưởng nhỏ nhất. Kết quả thực nghiệm trên hình 4.9 cho thấy vận tốc cắt có mức ảnh hưởng lớn nhất V_c , tiếp theo là lượng tiến dao f_z , chiều sâu cắt a_p và ít ảnh hưởng nhất là góc nghiêng trục dao θ .



Hình 4.10 Đồ thị ảnh hưởng chính cho tỷ số S/N của tuổi bền trên Minitab®

Mục tiêu mong muốn là đạt được tuổi bền lớn nhất tương ứng với mức của yếu tố có tỷ số S/N là lớn nhất. Quan sát trên hình 4.10 cho thấy giá trị lớn nhất của tỷ số S/N đạt được khi: vận tốc cắt V_c với mức 1 (90 m/phút); lượng tiến dao răng f_z với mức 1 (0.05 mm/răng); chiều sâu cắt a_p với mức 1 (0.05mm) và góc nghiêng trục dao θ với mức 1 (15°). Độ dốc của đường đồ thị thể hiện mức độ ảnh hưởng thông số là khác nhau, độ dốc càng lớn thì sự thay đổi mức sẽ ảnh hưởng lớn đến giá trị đầu ra. Vận tốc cắt ảnh hưởng lớn nhất đến tuổi bền, tiếp theo là lượng tiến dao, chiều sâu cắt và góc nghiêng trục dao ảnh hưởng nhỏ nhất đến tuổi bền dụng cụ.

Phân tích Taguchi cũng được thực hiện trên phần mềm CTMSOFT với mục đích đối chứng, kết quả tính toán cũng tương tự so với phần mềm Minitab® về giá trị tỷ số S/N, sự phân hạng và mức tối ưu của từng yếu tố (hình 4.11).



Hình 4.11 Phân tích Taguchi với tuổi bền bằng phần mềm CTMSoft

Bước tiếp theo là đánh giá mức độ ảnh hưởng của các yếu tố cần phải tính giá trị phương sai hay gọi là phân tích phương sai. Phân tích phương sai là phương pháp thống kê để phân tích tổng quy mô biến thiên của biến số phụ thuộc thành nhiều phần và mỗi phần được quy cho sự biến thiên của một biến giải thích cá biệt hay một nhóm các biến giải thích. Phần còn lại không thể quy cho biến nào được gọi là sự biến thiên không giải thích được hay phần dư. Phương pháp này được dùng để kiểm định giả thuyết nhằm xác định xem các mẫu thu được có được rút ra từ cùng một tổng thể không. Kết quả kiểm định cho biết các mẫu thu được có tương quan với nhau hay không và sử dụng phương pháp này để đánh giá lượng ảnh hưởng (theo %) của từng yếu tố đầu vào đến đầu ra của các thí nghiệm đã tiến hành.

Sử dụng mô hình tuyến tính tổng quát (General Linear Model - GLM), một mô đun phân tích phương sai ANOVA trong phần mềm Minitab®, trong đó các phép tính được thực hiện bằng cách sử dụng phương pháp hồi quy bình phương nhỏ nhất để mô tả mối quan hệ thống kê giữa một hoặc nhiều yếu tố dự đoán và một biến phản hồi liên tục. Mô hình này hữu dụng vì có thể xử lý thang đo quãng và định danh trong mô hình.

Kết quả sau khi thực hiện phân tích phương sai trên phần mềm Minitab® thể hiện trên hình 4.12. Ký hiệu trên bảng kết quả bao gồm: DF là số bậc tự do, Adj_SS là tổng bình phương hiệu chỉnh, Adj_MS là trung bình bình phương hiệu chỉnh, $F\text{-value}$ là kiểm định F và $P\text{-value}$ là sai số cho phép. Kiểm định F là tỷ lệ biến thiên giữa các số trung bình mẫu và sự biến thiên trong nội bộ các mẫu. $P\text{-value}$ là viết tắt của từ probability value, là một con số xác suất và được gọi là trị số P . Trị số P càng nhỏ thì độ tin cậy của kết luận càng cao và giá trị ảnh hưởng của nó càng lớn.

Analysis of Variance						
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	
Vc	3	101569	33856.3	3324.41	0.000	
fz	3	24660	8220.0	807.14	0.000	
ap	3	20380	6793.2	667.04	0.000	
Theta	3	6321	2107.1	206.90	0.001	
Error	3	31	10.2			
Total	15	152961				

Hình 4.12 Phân tích phương sai ANOVA bằng phần mềm Minitab®

Số bậc tự do của các yếu tố: $f_{V_c} = f_{f_z} = f_{a_p} = f_{\theta} = 3$ (bằng số mức trừ 1) và số bậc tự do tổng là $f_T = 15$ (bằng số thí nghiệm trừ 1). Như vậy bậc tự do của nhiễu sẽ là $f_E = f_T - (f_{V_c} + f_{f_z} + f_{a_p} + f_{\theta}) = 3$.

Tổng bình phương chung: $SS_T = 152961$

Tổng bình phương các yếu tố thành phần như sau:

$$SS_{V_c} = 101569; \quad SS_{f_z} = 24660;$$

$$SS_{a_p} = 20380; \quad SS_{\theta} = 6321$$

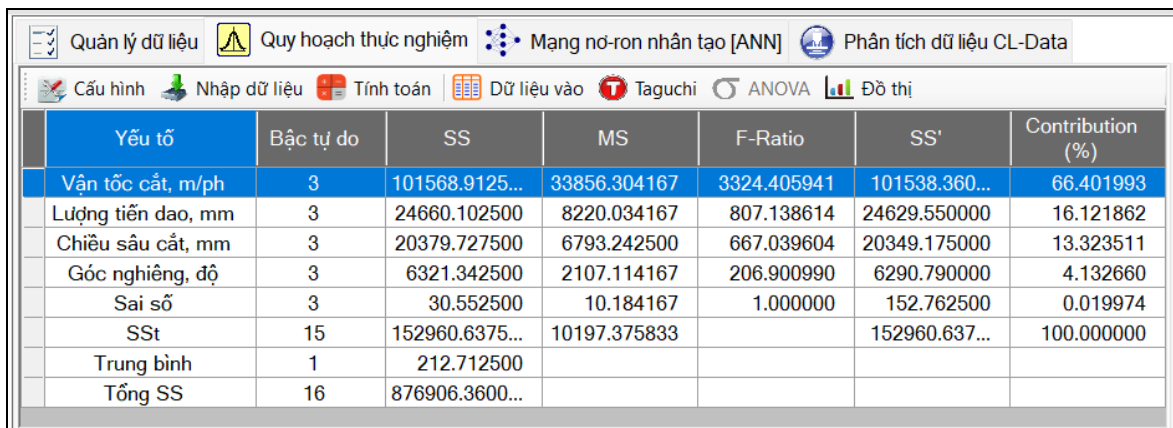
$$SS_E = SS_T - (SS_{V_c} + SS_{f_z} + SS_{a_p} + SS_{\theta}) = 31$$

Đánh giá mức độ ảnh hưởng (theo %) của các yếu tố chính và nhiễu:

$$P_{V_c} = \frac{SS_{V_c}}{SS_T} = 66.40\%; \quad P_{f_z} = \frac{SS_{f_z}}{SS_T} = 16.12\%; \quad P_{a_p} = \frac{SS_{a_p}}{SS_T} = 13.33\%;$$

$$P_{\theta} = \frac{SS_{\theta}}{SS_T} = 4.13\%, \text{ phần còn lại của nhiễu là } P_E = 0.02\%$$

Từ những kết quả tính toán như trên, nếu không kể đến tác động lẫn nhau của các yếu tố điều khiển thì ảnh hưởng của vận tốc cắt là lớn nhất, đến 66.40%, tiếp theo là chiều sâu cắt 16.12%, lượng tiến dao răng 13.33% và cuối cùng là góc nghiêng trục dao 4.13%, trong khi nhiễu là 0.02%. Kết quả phân tích phương sai trên phần mềm CTMSoft hoàn toàn trùng khớp với kết quả tính trên phần mềm Minitab®, chi tiết như trên hình 4.13:



Yếu tố	Bậc tự do	SS	MS	F-Ratio	SS'	Contribution (%)
Vận tốc cắt, m/ph	3	101568.9125...	33856.304167	3324.405941	101538.360...	66.401993
Lượng tiến dao, mm	3	24660.102500	8220.034167	807.138614	24629.550000	16.121862
Chiều sâu cắt, mm	3	20379.727500	6793.242500	667.039604	20349.175000	13.323511
Góc nghiêng, độ	3	6321.342500	2107.114167	206.900990	6290.790000	4.132660
Sai số	3	30.552500	10.184167	1.000000	152.762500	0.019974
SSt	15	152960.6375...	10197.375833		152960.637...	100.000000
Trung bình	1	212.712500				
Tổng SS	16	876906.3600...				

Hình 4.13 Phân tích phương sai ANOVA bằng phần mềm CTMSoft

Như vậy ảnh hưởng của vận tốc cắt là lớn nhất và nổi trội nhất với mức độ ảnh hưởng gần như gấp 4 lần mức ảnh hưởng của yếu tố thứ hai là lượng tiến dao, điều này rất phù hợp với công thức Taylor đã phân tích ở mục 1.2.2.3. Với mức độ ảnh hưởng lớn của tốc độ cắt, trong thực tế gia công cần tập trung điều khiển yếu tố vận tốc cắt trong giải cắt đã lập sẽ đem lại hiệu quả rất cao. Trong kết quả tính toán còn xuất hiện yếu tố nhiễu, đó là những tác động bên ngoài, rung động, biến dạng đàn hồi của hệ thống công nghệ, sai số đo lường mòn dao. Mức độ ảnh hưởng của yếu tố nhiễu là nhỏ 0.02%, tuy nhiên trong thực tế gia công cũng cần phải được quan tâm. Trong thực nghiệm này do số lượng các thí nghiệm không nhiều, đồng thời trong quá trình thí nghiệm đã loại bỏ những kết quả bất thường (mục 4.1.4.2) do đó mức độ ảnh hưởng của yếu tố nhiễu đến kết quả đầu ra là không cao.

Ngoài ra, thông số P-value (Probability value) cho biết xác suất của dữ liệu, hoặc có thể gọi là sai số cho phép. Trị số P càng nhỏ thì độ tin cậy của kết

lượn càng cao và giá trị ảnh hưởng của nó càng lớn. Khi P-value nhỏ hơn mức ý nghĩa (thường là 0.05) thì nên tập trung đánh giá vào các thông số đó. Trong kết quả trên hình 4.12, thấy rằng tất cả các thông số đầu vào đều có giá trị độ tin cậy ($p < 5\%$) cần được ưu tiên xem xét đánh giá.

Các phương pháp tối ưu tuổi bền dụng cụ truyền thống bằng cách điều chỉnh các thông số chế độ cắt đã được rất nhiều nghiên cứu trong quá khứ khai thác đến giới hạn của sự tối ưu, nên sẽ rất khó khăn để tiếp tục hướng phát triển theo cách tiếp cận này. Tuy nhiên, qua phân tích những nội dung của chương 3, liên quan đến góc nghiêng trục dao đã gợi mở một giải pháp nâng cao tuổi bền khả thi nhất phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc. Vấn đề này sẽ được tiếp tục nghiên cứu và chứng minh bằng thí nghiệm kiểm chứng sẽ đề cập ở phần sau của luận án. Ngoài tuổi bền dụng cụ thì cần phải đánh giá thêm ảnh hưởng các thông số chế độ cắt đến chất lượng bề mặt thông qua giá trị nhám bề mặt, là một chỉ tiêu quan trọng đối với sản phẩm khi gia công tinh. Năng suất gia công cũng là một yếu tố đáng quan tâm, liên quan đến vấn đề lợi ích kinh tế, thời gian chạy máy, tính cạnh tranh trong hoạt động sản xuất.

4.2.2. Ảnh hưởng chế độ cắt đến chất lượng bề mặt và năng suất gia công

Các bước phân tích được thực hiện tương tự như trình bày tại mục 4.2.1 “Ảnh hưởng của chế độ cắt đến tuổi bền”, nên sẽ không diễn giải chi tiết các bước tính trung gian mà chỉ nêu kết quả phân tích cuối cùng.

Giá trị nhám bề mặt nhỏ thì tốt hơn nên chọn đánh giá “càng nhỏ càng tốt” cho phân tích Taguchi. Trên hình 4.14 thể hiện bảng đáp ứng tỷ số S/N của giá trị nhám bề mặt, xếp hạng cho thấy yếu tố chiều sâu cắt a_p có mức ảnh hưởng lớn nhất, tiếp theo là vận tốc cắt V_c , góc nghiêng trục dao θ và cuối cùng là lượng tiến dao f_z ít ảnh hưởng nhất. Từ giá trị tỷ số S/N riêng từng yếu tố cũng thể hiện mức độ ảnh hưởng có lợi nhất đến giá trị nhám bề mặt là: vận tốc cắt V_c tại mức 4 (180 m/phút); lượng tiến dao răng f_z tại mức 2 (0.1 mm/răng); chiều sâu cắt a_p tại mức 1 (0.05mm) và góc nghiêng trục dao θ tại mức 1 (15°).

Response Table for Signal to Noise Ratios				
Smaller is better				
Level	Vc	fz	ap	Theta
1	-0.7669	1.6132	3.2383	2.4633
2	0.5046	1.8598	2.0794	0.9875
3	1.7980	0.7730	0.6396	0.4167
4	3.0137	0.3034	-1.4078	0.6819
Delta	3.7806	1.5564	4.6461	2.0466
Rank	2	4	1	3

Hình 4.14 Bảng đáp ứng tỷ số S/N của giá trị nhám bề mặt

Góc nghiêng trục dao, cũng như lượng tiến dao và chiều sâu cắt là các thông số ảnh hưởng ngược chiều đến chất lượng bề mặt gia công. Góc nghiêng trong khoảng tối ưu là $15^0 \div 25^0$ để tránh cắt tại đỉnh mà vẫn đảm bảo độ cứng vững của dụng cụ, giá trị góc nghiêng lớn thì ảnh hưởng của lực hướng kính lớn làm dụng cụ mất ổn định và dễ biến dạng [13]. Vận tốc cắt thì có ảnh hưởng ngược lại là cùng chiều: vận tốc cắt lớn thì càng cải thiện chất lượng bề mặt vì làm giảm giá trị sai lệch trung bình (đỉnh nhấp nhô) của bề mặt sau gia công.

Phương pháp phân tích phương sai ANOVA sẽ phân tích mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến giá trị nhám bề mặt chi tiết sau gia công như sau:

Tổng bình phương chung: $SS_T = 1.22$

Tổng bình phương các thành phần:

$$SS_{V_c} = 0.3999; \quad SS_{f_z} = 0.1109;$$

$$SS_{a_p} = 0.5987; \quad SS_{\theta} = 0.1069$$

$$SS_E = SS_T - (SS_{V_c} + SS_{f_z} + SS_{a_p} + SS_{\theta}) = 0.0036$$

Đánh giá mức độ ảnh hưởng (theo %) của các yếu tố chính và nhiễu:

$$P_{V_c} = \frac{SS_{V_c}}{SS_T} = 32.77\%; \quad P_{f_z} = \frac{SS_{f_z}}{SS_T} = 9.09\%; \quad P_{a_p} = \frac{SS_{a_p}}{SS_T} = 49.07\%;$$

$$P_{\theta} = \frac{SS_{\theta}}{SS_T} = 8.80\%, \text{ còn lại là } P_E = 0.27\%$$

Mức độ ảnh hưởng của chiều sâu cắt lại nổi trội nhất (khoảng 49.07%) và tiếp theo là vận tốc cắt (khoảng 32.77%). Các yếu tố còn lại cũng có ảnh hưởng

đến nhám bề mặt nhưng không đáng kể, rõ ràng kết quả phân tích cũng rất đúng với công bố trong nghiên cứu của Quintana [70].

Năng suất được đánh giá qua đại lượng tốc độ bóc tách vật liệu MRR, vì vậy lựa chọn đánh giá “càng lớn càng tốt” cho phân tích Taguchi. Phần mềm Minitab® tính toán tỷ số S/N và xếp hạng mức độ ảnh hưởng của các thông số được thể hiện trong hình 4.15. Lượng tiến dao răng f_z là đại lượng có ảnh hưởng lớn nhất, sau đó là chiều sâu cắt a_p , góc nghiêng dao θ và vận tốc cắt V_c là những yếu tố ảnh hưởng ít nhất đến tốc độ bóc tách vật liệu [66].

Response Table for Signal to Noise Ratios					
Larger is better					
Level	Vc	fz	ap	Theta	
1	29.73	26.05	26.21	36.51	
2	32.06	30.85	31.85	32.96	
3	33.47	34.99	34.96	31.20	
4	34.84	38.21	37.08	29.43	
Delta	5.12	12.16	10.86	7.09	
Rank	4	1	2	3	

Hình 4.15 Bảng đáp ứng tỷ số S/N của tốc độ bóc tách vật liệu

Quy luật chung của ba thông số V_c , f_z và a_p là: giá trị của ba thông số càng lớn thì càng có lợi cho tốc độ bóc tách vật liệu MRR. Điều này cũng rất phù hợp với công thức (1.12) xác định tốc độ bóc tách vật liệu MRR theo lý thuyết. Công thức (1.12) cho thấy tốc độ bóc tách vật liệu MRR phụ thuộc vào đại lượng chiều sâu cắt a_p và tốc độ tiến dao f , trong khi f lại phụ thuộc vào vận tốc cắt V_c và lượng tiến dao răng f_z (theo (4.2)). Góc nghiêng trục dao θ không xuất hiện trong công thức (1.12) nên có thể nói sự ảnh hưởng của góc nghiêng đối với tốc độ bóc tách vật liệu MRR là không đáng kể.

Phương pháp ANOVA phân tích mức độ ảnh hưởng của các yếu tố đến tốc độ bóc tách vật liệu như sau:

Tổng bình phương chung: $SS_T = 26554.7$

Tổng bình phương các thành phần:

$$SS_{V_c} = 2017.5; \quad SS_{f_z} = 9423.1;$$

$$SS_{a_p} = 6499.3; \quad SS_{\theta} = 8464.9;$$

$$SS_E = SS_T - (SS_{V_c} + SS_{f_z} + SS_{a_p} + SS_{\theta}) = 149.9$$

Đánh giá mức độ ảnh hưởng (theo %) của các yếu tố chính và nhiễu:

$$P_{V_c} = \frac{SS_{V_c}}{SS_T} = 7.60\%; \quad P_{f_z} = \frac{SS_{f_z}}{SS_T} = 35.48\%; \quad P_{a_p} = \frac{SS_{a_p}}{SS_T} = 24.47\%;$$

$$P_{\theta} = \frac{SS_{\theta}}{SS_T} = 31.88\%, \text{ còn lại là } P_E = 0.57\%$$

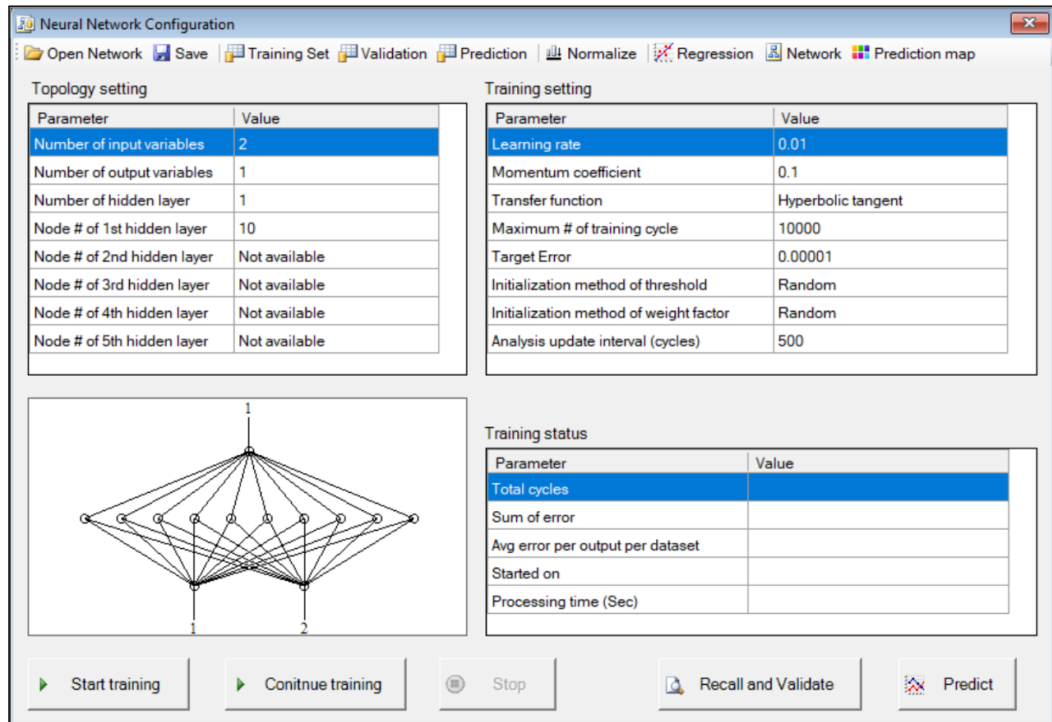
Kết quả phân tích phương sai làm sáng tỏ hơn về mức độ ảnh hưởng của lượng tiến dao răng f_z đến tốc độ bóc tách vật liệu MRR là lớn nhất 35.48%. Kết quả phân tích trên rất phù hợp với hoạt động gia công tinh trên máy CNC, giá trị chiều sâu cắt a_p thường luôn duy trì ổn định, khi tăng lượng tiến dao thì thời gian đi hết các đường chạy dao gia công được rút ngắn. Điều khiển các chế độ cắt nhằm đạt năng suất cao nhất là cần thiết, nhưng phải xem xét sự ảnh hưởng đến các yếu tố đầu ra khác như nhám bề mặt, tuổi bền dụng cụ... để đảm bảo yêu cầu kỹ thuật.

4.2.3. Dự đoán tuổi bền dụng cụ sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo

Hiện nay, ứng dụng trí tuệ nhân tạo đang là vấn đề rất được quan tâm đặc biệt trong cuộc cách mạng công nghiệp 4.0. Trí tuệ nhân tạo được sử dụng trong nhiều lĩnh vực như: kinh doanh, y học, vận tải, sản xuất, dịch vụ, giáo dục... và trong lĩnh vực kỹ thuật phổ biến nhất là bài toán về dự đoán.

Thực tế đã có các bộ thư viện mã nguồn mở cung cấp các thuật toán, thư viện lập trình API, các bộ công cụ phát triển và tài liệu hướng dẫn cho những người không chuyên có thể sử dụng được dễ dàng. Tuy nhiên để đảm bảo tính khách quan và tin cậy cho kết quả dự đoán, cần sử dụng các phần mềm chuyên dụng được thương mại hóa như Matlab® [11], Visual Gene Developer, WinNN32... Phần mềm Visual Gene Developer (gọi tắt là Visual Gene) được giáo sư Hofacker tại University of Vienna khởi đầu và sau này Sang Kyu Jung [44] phát triển và cung cấp miễn phí cho cộng đồng làm nghiên cứu khoa học. Phần mềm không chỉ chuyên về lĩnh vực thiết kế di truyền, phân tích và tối ưu

hóa mà còn thêm công cụ dự đoán mRNA và dự đoán mạng nơ-ron nhân tạo với giao diện thân thiện và dễ tiếp cận sử dụng (hình 4.16).



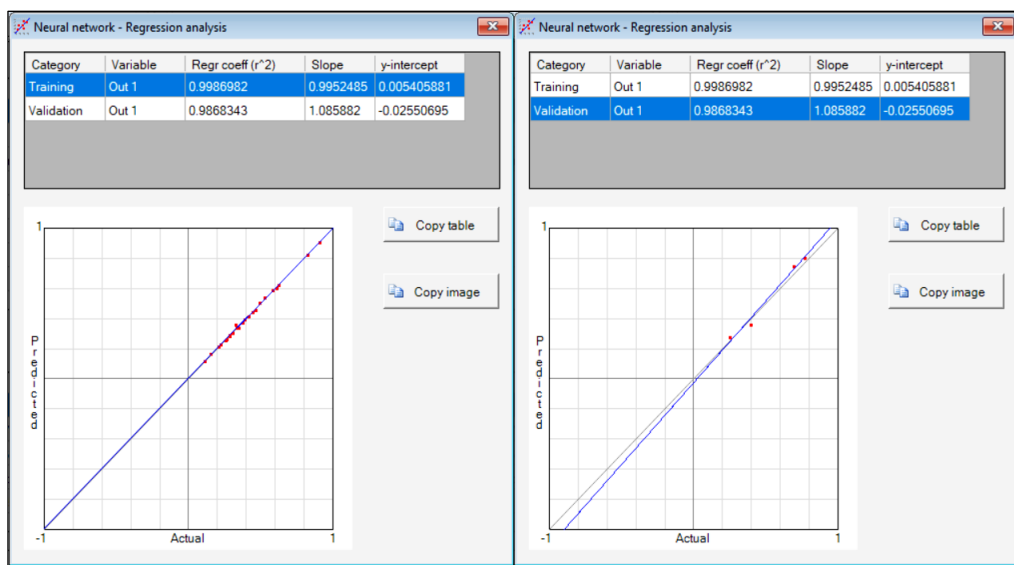
Hình 4.16 Giao diện mạng nơ-ron của phần mềm Visual Gene Developer

Các thông số điều khiển trong các thí nghiệm (tốc độ cắt, lượng tiến dao, chiều sâu cắt và góc nghiêng trục dao) làm các yếu tố đầu vào, tuổi bền dụng cụ là đầu ra của mạng nơ-ron. Số lượng dữ liệu cho việc huấn luyện mạng nơ-ron nhân tạo không giới hạn số lượng, càng nhiều bộ dữ liệu huấn luyện thì khả năng dự đoán của mạng càng sát với hàm truyền thực tế. Tuy nhiên không thể thực hiện nhiều thí nghiệm xác định tuổi bền dụng cụ vì rất tốn kém kinh phí và thời gian. Mặt khác, mục tiêu nghiên cứu là muốn chứng minh một cách tiếp cận mới sử dụng phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc trên dao phay cầu, nên sau khi khẳng định được hướng tiếp cận là đúng đắn thì có thể bổ sung dữ liệu huấn luyện trong tương lai.

Phân chia các tập dữ liệu cho huấn luyện (training), thẩm định (validation) và kiểm tra (test) bằng nhiều phương pháp: Hold-out, Train-Validation-Test Split hoặc Cross Validation [24] [29] [39]. Nếu lượng dữ liệu lớn, có thể chọn cách phân chia dữ liệu: 60% dùng huấn luyện (training), 20% sử dụng xác nhận

(validation) và 20% còn lại dùng kiểm tra (test) [76]. Nếu số lượng dữ liệu ít thì sử dụng phương pháp Hold-out phân chia dữ liệu thành hai tập độc lập: tập huấn luyện và tập kiểm tra. Hiện tại, với 28 thí nghiệm đã được thực hiện có thể phân chia: 85% (24 thí nghiệm) dùng huấn luyện (training) và 15% còn lại (4 thí nghiệm) dùng thẩm định (validation) [7]. Việc phân chia như trên đảm bảo “quá trình huấn luyện và đánh giá hoàn toàn độc lập với nhau và dữ liệu được dùng để kiểm thử mô hình phải không được nhìn thấy lúc huấn luyện”, điều này bảo chứng công bằng cho quá trình đánh giá một cách khách quan.

Huấn luyện mạng về bản chất chính là quá trình hiệu chỉnh trọng số liên kết giữa các nơon, sao cho giá trị hàm lỗi là nhỏ nhất. Bước đầu tiên cần phải xác định cấu trúc mạng gồm: số lớp ẩn, số nơon trong lớp ẩn, loại hàm truyền và các chỉ số của hàm truyền. Việc chọn cấu trúc mạng tối ưu không đơn giản mà phải thực hiện chọn thử nhiều lần để có cấu trúc mạng tốt nhất. Đánh giá thông qua giá trị cao nhất của hệ số hồi quy R^2 hoặc sai số phần trăm tuyệt đối trung bình (MAPE) nhỏ nhất.

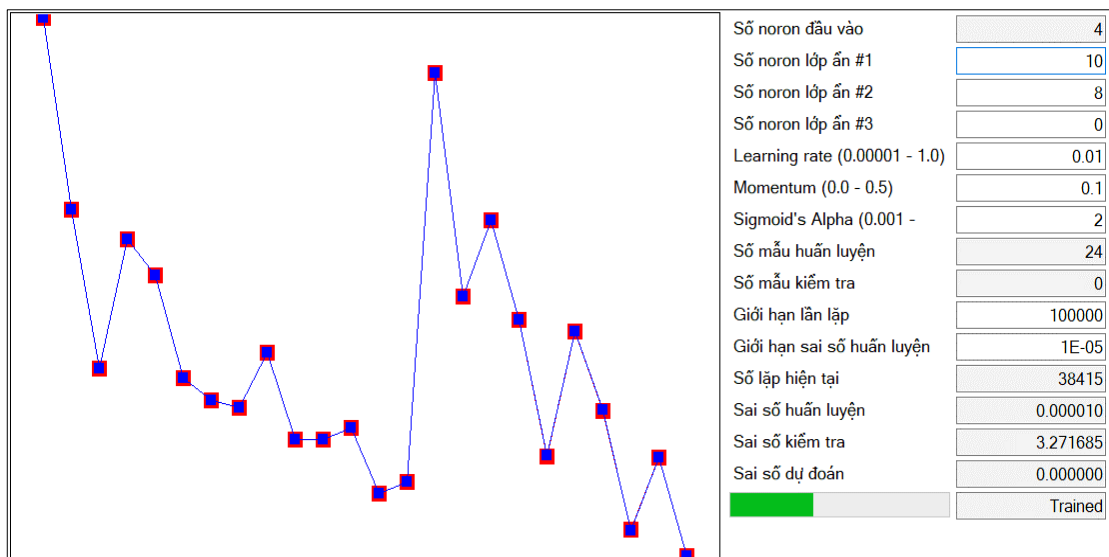


Hình 4.17 Cửa sổ giám sát tiến trình huấn luyện phần mềm Visual Gene

Hình 4.17 thể hiện cửa sổ kiểm tra hệ số hồi quy R^2 sau khoảng 150,000 lần lặp huấn luyện mạng trên phần mềm Visual Gene. Trên cửa sổ thể hiện hai giá trị hệ số hồi quy R^2 cho tập dữ liệu huấn luyện là 0.9986982 và cho tập dữ

liệu kiểm tra là 0.9868343. Đồ thị thể hiện những điểm phân bố càng gần đường chéo $y = x$ thì giá trị dự đoán rất gần với giá trị thực tế. Trong khi huấn luyện, cần phải giám sát hai giá trị R^2 này sao cho luôn đồng biến và tiệm cận đến 1. Lý tưởng nhất là khi $R^2=1$, tức đầu ra dự đoán đúng bằng đầu ra thực tế.

Tương tự, trên phần mềm CTMSoft cũng thực hiện quá trình huấn luyện mạng nơ-ron nhân tạo với bộ thông số huấn luyện và kiểm tra cũng giống như trên phần mềm Visual Gene, hình 4.18 thể hiện cửa sổ tiến trình huấn luyện mạng trên phần mềm CTMSoft. Do sử dụng thuật toán huấn luyện khác nhau nên giao diện cửa sổ cũng khác so với phần mềm Visual Gene. Điều kiện dừng huấn luyện là giới hạn số lần lặp hoặc giới hạn sai số huấn luyện tùy điều kiện nào đến trước. Sau hơn 38.000 lần lặp trong huấn luyện đã đạt được sai số huấn luyện $\leq 10^{-5}$ đã thỏa mãn điều kiện giới hạn. Trên cửa sổ giám sát tiến trình, có thể quan sát được các giá trị tổng sai số huấn luyện, sai số tuyệt đối trung bình và sai số bình phương trung bình, dùng để đánh giá chất lượng huấn luyện.



Hình 4.18 Cửa sổ giám sát tiến trình huấn luyện phần mềm CTMSoft

Sau khi huấn luyện kết thúc, giá trị sai lệch của bộ dữ liệu huấn luyện (training) và kiểm tra (test) của phần mềm Visual Gene trình bày trong phụ lục 5 trang 138, của phần mềm CTMSoft trình bày trong phụ lục 6 trang 139. Theo

[63], ba tiêu chí đánh giá tính của chính xác công cụ dự đoán là: sai số tuyệt đối trung bình – MAE, sai số toàn phương trung bình – MSE và sai số phần trăm tuyệt đối trung bình - MAPE. Cả ba tiêu chí MAE, MSE và MAPE có đặc tính và công năng như nhau và thường cho cùng kết quả khi đánh giá. Tuy nhiên khi các giá trị sai số gần đều nhau thì nên chọn tiêu chí MSE để đánh giá. Ngược lại nếu giá trị sai số quá khác biệt thì nên chọn tiêu chí MAE. Tiêu chí MAPE giúp đánh giá sai số một cách tương đối, nên khi đánh giá sai số dự báo với những bộ số liệu khác nhau thì nên sử dụng tiêu chí MAPE.

Bảng 4.11 Đánh giá sai số dự đoán của phần mềm Visual Gene và CTMSoft

Tiêu chí đánh giá sai số dự đoán	Phần mềm Visual Gene	Phần mềm CTMSoft
Sai số tuyệt đối trung bình - MAE	4.9538	5.1425
Sai số toàn phương trung bình - MSE	64.0491	193.8924
Sai số phần trăm tuyệt đối trung bình - MAPE	0.0260	0.0266

Từ bảng 4.11, theo tiêu chí MAE thì sai số tuyệt đối trung bình dự đoán của phần mềm Visual Gene là 4.9538 gần với giá trị 5.1425 của phần mềm CTMSoft. Khi tính sai số tuyệt đối trung bình không tính trọng số của các quan sát và cho các quan sát một trọng số như nhau. Còn theo tiêu chí MSE các sai số lớn thì có trọng số lớn (trọng số chính là giá trị sai số), sai số nhỏ thì có trọng số nhỏ vì thế có sự khác nhau của hai giá trị MSE giữa hai phần mềm. Visual Gene cho kết quả dự đoán có sai lệch nhỏ và phân bố đều, trong khi phần mềm CTMSoft có sai lệch giá trị trong bộ huấn luyện rất nhỏ, nhưng bộ kiểm tra thì lại có sai lệch lớn. Nguyên nhân do có sự khác nhau trong cấu trúc mạng, loại hàm truyền cũng như thuật toán huấn luyện.

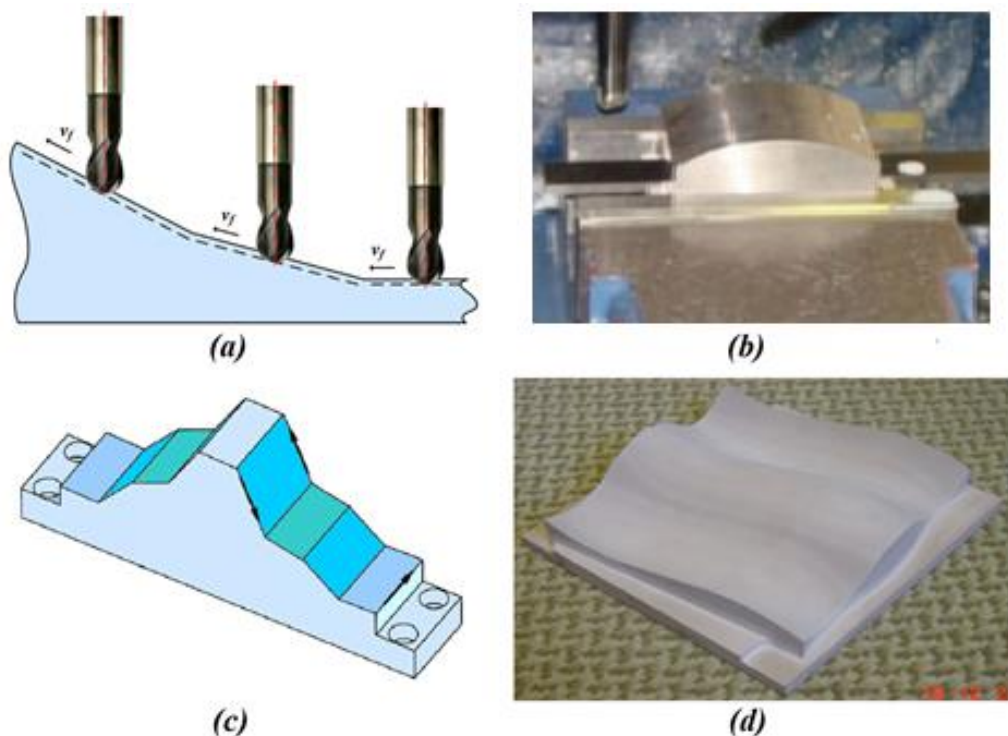
Mạng nơ-ron nhân tạo sau huấn luyện có thể lưu trữ và có khả năng phục hồi tính toán về sau. Thông tin lưu trữ gồm cấu trúc mạng và giá trị trọng số của từng nơ-ron, có thể sử dụng cho các lần dự đoán tiếp theo. Trong tương lai, người sử dụng có thể tiếp tục bổ sung dữ liệu để huấn luyện tiếp tục cho mạng mà không cần phải thực hiện huấn luyện lại từ đầu.

4.3. Kiểm chứng giải pháp nâng cao tuổi bền dao phay cầu

4.3.1. Dịch đoạn lưỡi cắt làm việc khi gia công các mặt phẳng nghiêng

4.3.1.1. Lựa chọn mô hình gia công kiểm chứng

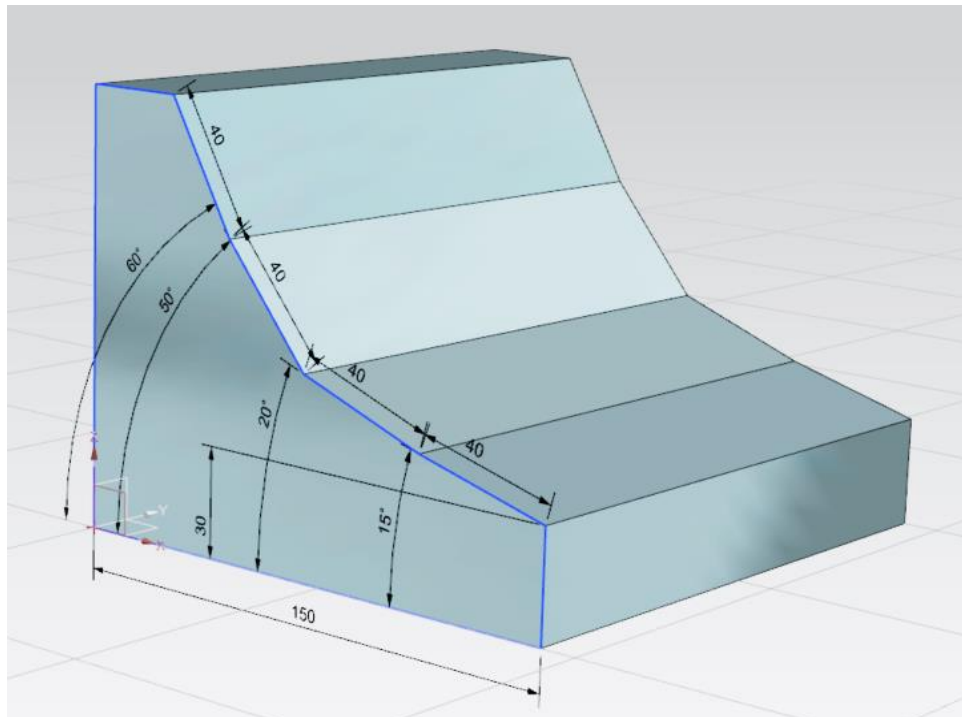
Sau khi thực hiện một loạt thí nghiệm nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến tuổi bền dao phay cầu, sử dụng phương pháp phân tích Taguchi kết hợp phân tích phương sai để xác định mức tối ưu và mức độ ảnh hưởng của mỗi tham số đến tuổi bền. Xây dựng công cụ dựa trên nền tảng trí tuệ nhân tạo là mạng nơ-ron nhân tạo nhằm dự đoán giá trị tuổi bền ứng với bộ chế độ cắt bất kỳ. Tuy nhiên mục tiêu cuối cùng là ứng dụng phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc (tại mục 3.2) để khai thác triệt để hiệu quả làm việc của toàn bộ lưỡi cắt dao phay cầu. Chứng minh tính đúng đắn lý thuyết thì cần phải thực hiện thí nghiệm gia công trên mẫu thật để kết luận một cách khách quan.



Hình 4.19 Các mô hình gia công trên mặt nghiêng khác nhau

Đặc điểm của dao phay cầu là có thể gia công các bề mặt có độ nghiêng khác nhau (có thể từ 0^0 đến 90^0) nên có rất nhiều mô hình gia công phù hợp cho kiểm chứng. Tác giả Wojciechowski [95] đưa ra mô hình gia công với ba

mức góc nghiêng dao khác nhau trên máy CNC 3 trục, nhưng vì hạn chế số bậc tự do máy gia công nên phôi được thiết kế với 3 mức độ góc nghiêng trục dao khác nhau (hình 4.19-a). Tác giả Shajari Shaghayegh [78] đã thiết kế và phân tích các thí nghiệm bằng phương pháp Taguchi và phân tích phương sai để khảo sát ảnh hưởng của đường chạy dao đối với lực cắt, độ nhám bề mặt và năng suất gia công nhằm tìm ra khoảng giá trị tối ưu. Biên dạng mẫu gia công có bề mặt cong lồi, vật liệu bằng thép không gỉ 1.4903 (hình 4.19-b). Tác giả Azeem [19] đề xuất chi tiết gia công bao gồm 4 bậc nghiêng khác nhau ($\pm 10^\circ$ và $\pm 40^\circ$) theo hai kiểu tiến dao đi lên (upward) và đi xuống (downward) (hình 4.19-c). Mức độ góc nghiêng thay đổi trong mô hình rất rộng từ 0° đến 70° với nhiều kiểu định hướng nghiêng trục dao. Tác giả Fan [36] thực hiện thí nghiệm gia công bằng dao cầu trên bề mặt tự do để khảo sát ảnh hưởng vận tốc cắt đối với chất lượng bề mặt trên trung tâm gia công CNC ba trục Hermle C600U (hình 4.19-d). Bề mặt thiết kế là bề mặt sóng tạo bởi các mảnh Bezier, được hình thành trên phép trượt của đường cong Bezier. Bề mặt này có tính tổng quát nhất bởi vì bề mặt đầy đủ mặt lồi, mặt lõm và các vị trí chuyển tiếp đường cong.



Hình 4.20 Hình dạng chi tiết dùng cho gia công kiểm chứng

Mô hình cắt trong hình 4.19-a được tham khảo để lên phương án gia công kiểm chứng vì: đơn giản trong chuẩn bị thí nghiệm, chi tiết gia công có độ cứng vững cao tránh ảnh hưởng các yếu tố nhiễu đến kết quả thí nghiệm và dễ dàng lập góc nghiêng thay đổi trên máy trên máy CNC 5 trục. Các thí nghiệm đã thực hiện tại mục 4.1 chỉ mới khảo sát các đoạn lưỡi cắt làm việc riêng biệt, nhưng thực tế trong gia công thì các đoạn lưỡi cắt làm việc có thể chồng lấn nhau do biên dạng phức tạp của bề mặt gia công (thường là mặt tự do) và số bậc tự do hạn chế trên máy CNC ba trục. Vì vậy trong thí nghiệm kiểm chứng này cần lựa chọn chi tiết có hình dạng gần giống thực tế với các mặt nghiêng có góc không cách đều nhau.

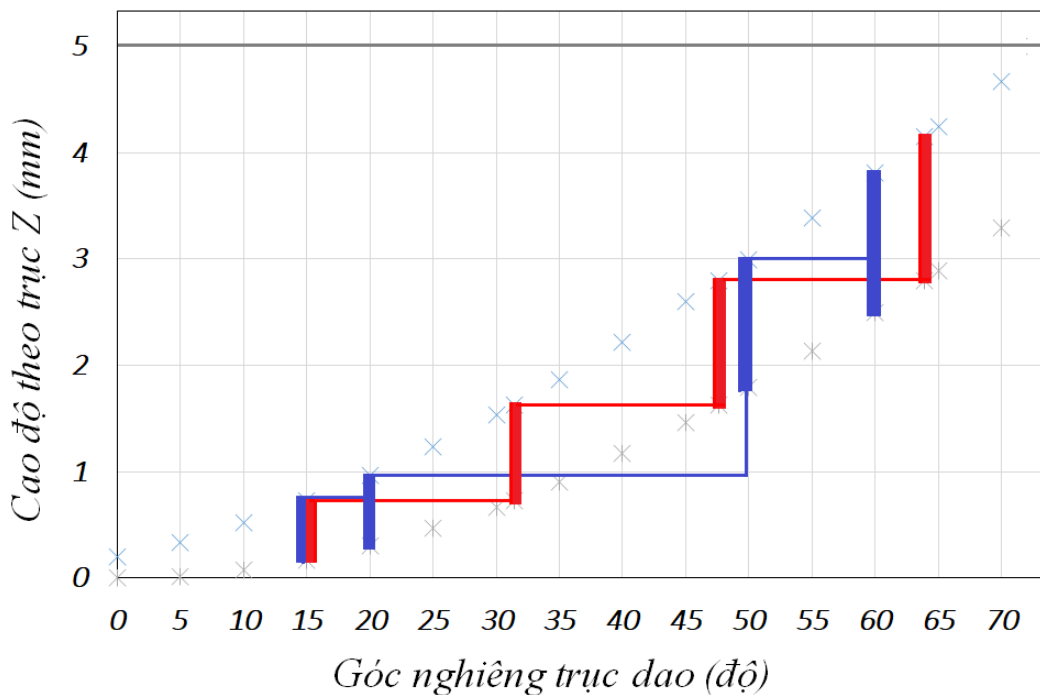
Chi tiết gia công kiểm chứng được đề xuất như hình 4.20, với 4 góc nghiêng không cách đều, tạo với mặt phẳng ngang góc nghiêng 15.0^0 , 20.0^0 , 50.0^0 và 60.0^0 . Phạm vi góc nghiêng thay đổi từ 15^0 đến 60^0 với chế độ cắt cũng trong mức giới hạn như các thí nghiệm đã tiến hành trong mục 4.1. Lý do các giá trị các thông số thí nghiệm không quá mức giới hạn dữ liệu huấn luyện của mạng nơ-ron nhân tạo, sẽ không đảm bảo chắc chắn độ chính xác dự đoán của mạng. Với mục tiêu đạt tuổi bền lớn nhất, theo 4.2.1 thì giá trị của thông số chế độ cắt càng nhỏ sẽ đạt tuổi bền dụng cụ càng lớn. Do đó, chế độ cắt đề xuất cho gia công thí nghiệm kiểm chứng được lựa chọn như sau:

- Vận tốc cắt: $V_c = 90$ m/phút,
- Lượng tiến dao răng: $f_z = 0.05$ mm/răng,
- Chiều sâu cắt: $a_p = 0.2$ mm.
- Góc nghiêng: 15.0^0 , 20.0^0 , 50.0^0 và 60.0^0

4.3.1.2. Xây dựng chương trình gia công kiểm chứng

Nhiệm vụ của thí nghiệm kiểm chứng sẽ so sánh giá trị tuổi bền giữa hai phương pháp gia công: Gia công theo phương pháp truyền thống trên máy CNC 3 trục và áp dụng phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc trên máy CNC 5 trục. Từ công thức tính (3.1), hình chiếu các đai cắt làm việc trên trục Z của

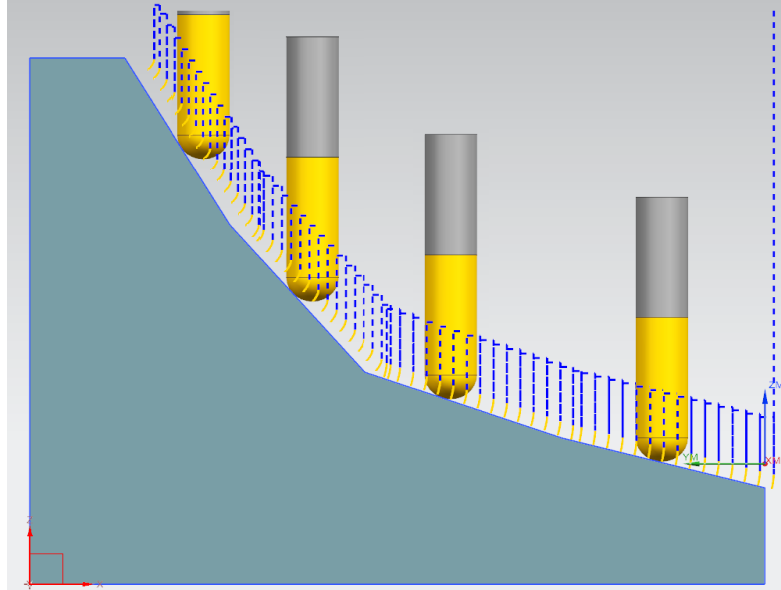
dao được tính và biểu diễn trên đồ thị như hình 4.21. Khi gia công theo phương pháp truyền thống trên máy CNC ba trục, dao phay cầu không thay đổi được góc nghiêng nên các đoạn lưỡi cắt làm việc (màu xanh) có sự chồng lấn nhau (hai mặt nghiêng liên kế 15.0^0 và 20.0^0 , 50.0^0 và 60.0^0), hoặc có đoạn lưỡi cắt không tham gia cắt. Ngược lại, khi tính toán và phân bố lại các đoạn lưỡi cắt làm việc tại góc nghiêng lần lượt là 15.0^0 , 31.3^0 , 47.5^0 và 64^0 thì gần như toàn bộ lưỡi cắt trên phần chỏm cầu của dao phay cầu tham gia cắt.



Hình 4.21 Phân bố đai cắt làm việc ACB trong thí nghiệm kiểm chứng

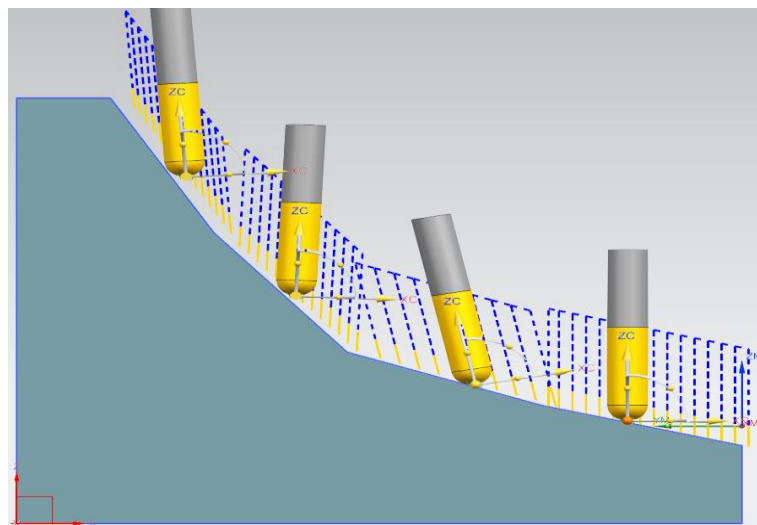
Dựa trên biểu đồ phân bố đai cắt làm việc ACB chiếu trên trục dao phay (hình 4.21) xây dựng hai chương trình gia công NC cho thí nghiệm kiểm chứng:

Mô hình gia công 1: Các thông số chế độ cắt như đã chọn (mục 4.3.1.1) và hướng trục dao luôn hướng lên trên (song song với trục Z). Đây là phương pháp gia công phổ biến vì rất thuận tiện trong lập trình chương trình NC và phù hợp với các máy CNC 3 trục phổ biến. Chương trình gia công NC được tạo bằng phần mềm NX hoặc bất kỳ phần mềm CAM khác bởi vì không cần sử dụng chức năng đặc biệt. Hình 4.22 thể hiện đường quỹ đạo chạy dao, với định hướng nghiêng ngang – đi lên giống thí nghiệm đã tiến hành ở mục 4.1.4.



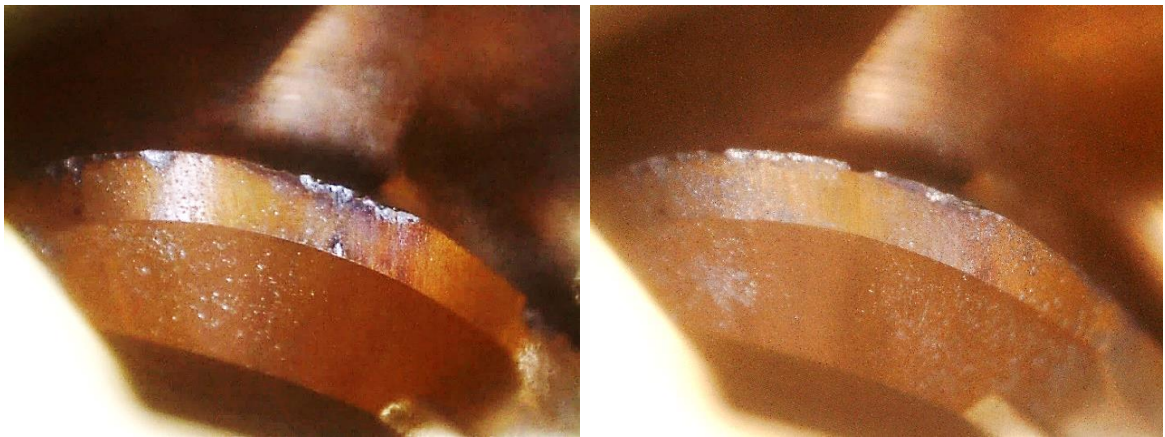
Hình 4.22 Đường chạy dao gia công khi góc nghiêng dao không đổi

Mô hình gia công 2: Để đảm bảo các đoạn lưỡi cắt làm việc không chồng lấn thì giá trị các góc nghiêng lần lượt là 15.0° , 31.3° , 47.5° và 64° . Sử dụng chức năng “Tilt Tool Axis” trên phần mềm NX, có thể chủ động đặt góc trục dao so với bề mặt gia công với giá trị góc dẫn (lead angle) và góc lật (tilt angle) bất kỳ so với một véc tơ chuẩn. Chức năng này rất hữu ích trong việc điều chỉnh góc trục dao để tránh va chạm bầu kẹp (tool holder) khi gia công những chi tiết có nhiều bề mặt thẳng đứng thường gặp trong khuôn mẫu. Bằng cách chủ động đặt góc nghiêng trục dao theo các mức đã chọn, đường chạy dao của mô hình gia công số 2 được thể hiện như trên hình 4.23.



Hình 4.23 Đường chạy dao dùng phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc

Hai thí nghiệm gia công kiểm chứng được thực hiện với cùng điều kiện thí nghiệm như đã tiến hành trong mục 4.1.4. Chụp ảnh lượng mòn mặt sau được thực hiện sau mỗi 10 đường chạy dao ngang (tương ứng 1.6m). Điều kiện dừng gia công khi kiểm tra ảnh chụp vết mòn có lượng mòn mặt sau lớn hơn giới hạn 0.3mm. Hình 4.24 thể hiện ảnh chụp vết mòn lưỡi cắt trong hai thí nghiệm kiểm chứng. Hình ảnh vết mòn lưỡi cắt trong hai mô hình gia công có sự phân bố mòn giống sự phân bố của đai cắt làm việc như trên hình 4.21.



Hình 4.24 Vết mòn trên lưỡi cắt trong hai mô hình thí nghiệm kiểm chứng

Đối với mô hình gia công số 1: đúng theo quy luật, khi các lưỡi cắt làm việc có sự chong lún sẽ gây mòn cục bộ tại vị trí đó dẫn đến tuổi bền của dao thí nghiệm chỉ đạt chiều dài cắt 920.8m. Mòn khốc liệt nhất tại vị trí ứng với góc nghiêng 60^0 bởi vì giá trị vận tốc cắt tại đây lớn nhất (đường kính cắt hiệu dụng lớn nhất). Đối với mô hình gia công số 2: sự phân bố vết mòn tương đối đồng đều trên lưỡi cắt, tuổi bền của dao thí nghiệm đã được cải thiện đáng kể và đạt chiều dài cắt 1356.8m, vết mòn phân bố đồng đều hơn trên lưỡi cắt.

Từ lượng dịch dao ngang $a_e = 0.3\text{mm}$ và chiều rộng phôi gia công là 160mm, để gia công hết một lớp mặt phôi là 85.3m. Vậy số lớp mặt phôi được gia công trong mô hình gia công 1 là:

$$N_{(1)} = \frac{920.8}{85.3} \approx 10.8 \quad (4.4)$$

Số lớp mặt phôi được gia công trong mô hình gia công 2 là:

$$N_{(2)} = \frac{1356.8}{85.3} \approx 15.9 \quad (4.5)$$

Kết quả tính toán số lớp mặt phôi được gia công từ công thức (4.4) và (4.5), bằng cách áp dụng phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc cho thấy tuổi bền của mô hình gia công 2 cải thiện một cách rõ ràng, chiều dài cắt của dao phay cầu tăng $1356.8/920.8 \approx 1.5$ lần so với mô hình gia công 1.

Giá trị sai lệch trung bình R_a của bề mặt sau gia công ứng với mặt nghiêng khác nhau được cho trong bảng 4.12 dưới đây:

Bảng 4.12 Giá trị sai lệch trung bình tại mặt phẳng nghiêng khác nhau

STT	Mặt nghiêng (độ)	Sai lệch trung bình R_a (μm)	
		Mô hình gia công 1	Mô hình gia công 2
1	15^0	1.45	1.41
2	20^0	1.49	1.43
3	50^0	1.57	1.52
4	60^0	1.66	1.63

Trong hai thí nghiệm trên chỉ thông số góc nghiêng trục dao thay đổi nên là thông số ảnh hưởng duy nhất đến nhám bề mặt. Lượng thay đổi sai lệch trung bình R_a trong mỗi thí nghiệm chỉ khoảng $0.2 \mu\text{m}$, cho thấy sự ảnh hưởng của góc nghiêng đến nhám bề mặt là không lớn, điều này khá phù hợp với phân tích trên cơ sở lý thuyết như trình bày tại mục 4.2.2 (trang 98).

Như vậy, bằng cách áp dụng phương pháp dịch chuyển lưỡi cắt làm việc có thể tăng tuổi bền dụng cụ nhưng vẫn duy trì chất lượng bề mặt gia công đảm bảo theo yêu cầu. Việc áp dụng phương pháp mới này không cần thay đổi trang bị công nghệ mà chỉ cần thay đổi chương trình gia công NC, cho thấy hướng tiếp cận này hoàn toàn có tương lai áp dụng trong thực tế sản xuất.

4.3.1.3. Dự đoán chiều dài cắt lớn nhất bằng mạng nơ-ron nhân tạo

Công cụ dự đoán bằng mạng nơ-ron nhân tạo đã tạo ở mục 4.2.3 cho phép dự đoán giá trị tuổi bền ứng với chế độ cắt bất kỳ, không nhất thiết phải trùng với chế độ cắt đã thí nghiệm và phải nằm trong không gian giá trị thí nghiệm. Sai số dự đoán đánh giá bởi 3 tiêu chí được thể hiện trong bảng 4.11 (trang 105) cho thấy bộ công cụ dự đoán vẫn có sai số đáng kể. Nguyên nhân là do dữ liệu huấn luyện hiện tại có số lượng còn ít, nhưng có thể cải thiện khả năng dự đoán bằng cách bổ sung thêm dữ liệu huấn luyện với cấu trúc mạng được lưu trữ.

Trong mô hình gia công 2, mặc dù đã áp dụng phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc để nâng cao tuổi bền, nhưng khi lượng mòn mặt sau đạt giá trị giới hạn $VB = 0.3\text{mm}$ thì còn đai cắt làm việc khác vẫn chưa đạt chiều dài cắt cho phép lớn nhất (MACL), tức là vị trí lưỡi cắt đó chưa hết tuổi bền. Tuy nhiên, không thể xác định chiều dài cắt cho phép lớn nhất của tất cả các đai cắt làm việc trên lưỡi dao. Do đó, sử dụng công cụ dự đoán đã tạo ở mục 4.2.3 có thể dự đoán chiều dài cắt cho phép lớn nhất với bất kỳ chế độ cắt nào (kết quả dự đoán trình bày trong phụ lục 7, trang 140). Bảng 4.13 thể hiện các giá trị dự đoán chiều dài cắt cho phép lớn nhất ứng với thông số chế độ cắt của thí nghiệm kiểm chứng của mô hình gia công 2.

Bảng 4.13 Chiều dài cắt cho phép lớn nhất MACL được dự đoán bằng ANN

Đoạn lưỡi cắt làm việc ACS	Góc θ (độ)	MACL (m)
1	15.0^0	386.1
2	31.3^0	373.2
3	47.5^0	352.9
4	64.0^0	327.9
Tổng chiều dài cắt cho phép lớn nhất (m)		1440.1

Theo bảng 4.13, tổng giá trị chiều dài cắt cho phép lớn nhất MACL của bốn giá trị góc nghiêng được dự đoán bằng mạng nơ-ron nhân tạo là 1440.1 m, tức đã sử dụng triệt để khả năng cắt của bốn đoạn lưỡi cắt làm việc cho đến hết tuổi bền, trong khi giá trị tuổi bền thực tế từ thí nghiệm là 1356.8 m. Bởi vì gia công thí nghiệm sẽ cắt lần lượt các góc nghiêng và dừng gia công khi lượng mòn mặt sau lưỡi cắt đạt giới hạn tại vị trí nào đó, trong các đoạn lưỡi cắt còn lại vẫn chưa hết tuổi bền. Như vậy nếu sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo dự đoán chiều dài cắt cho phép lớn nhất nhằm sử dụng lưỡi cắt làm việc đến giới hạn mòn cho phép thì chiều dài cắt tăng thêm 83.3m.

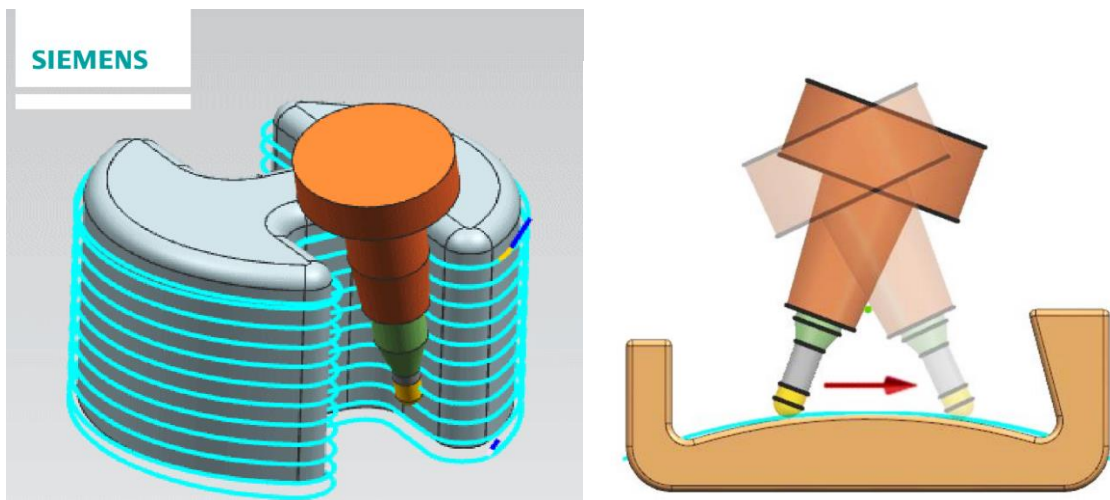
Bằng cách phân bố đai cắt làm việc đều trên toàn bộ lưỡi cắt của dao phay cầu thì tuổi bền sẽ được nâng cao một cách triệt để. Nhưng thực tế không đơn giản áp dụng cách thức trên, bởi vì bề mặt gia công luôn là dạng tự do không phải dạng phẳng lý tưởng như trong thí nghiệm kiểm chứng. Điều đó làm cho

việc áp dụng phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc trở nên khó khăn. Tuy nhiên, ngày nay nhờ các phần mềm CAD-CAM mạnh mẽ và linh hoạt trong tạo các chương trình gia công NC, những khó khăn trên có thể dễ dàng được xử lý.

4.3.2. Dịch đoạn lưỡi cắt làm việc khi gia công bề mặt tự do

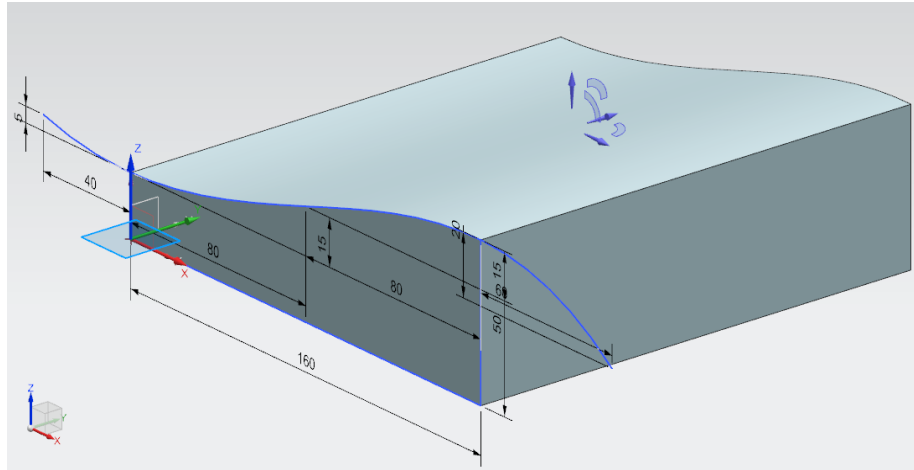
4.3.2.1. Xây dựng mô hình bề mặt gia công thử nghiệm

Trong một nghiên cứu của tác giả Diciuc [32] thực hiện thí nghiệm gia công sử dụng dao phay cầu luôn duy trì một góc nghiêng trục dao cố định, đã đạt sự cải thiện đáng kể về chất lượng bề mặt gia công, tiết diện (profile) cũng như nhám bề mặt được nâng cao. Đối với những bề mặt tự do, hãng SIEMENS bổ sung chức năng mới trong phần mềm NX 11 đã có thể khả năng kiểm soát trục dao phay đối với bề mặt gia công, tùy chọn duy trì góc nghiêng cố định hoặc góc nghiêng thay đổi theo một quy luật biến thiên nào đó (hình 4.25).



Hình 4.25 Chức năng điều chỉnh trục dao phay trên phần mềm NX

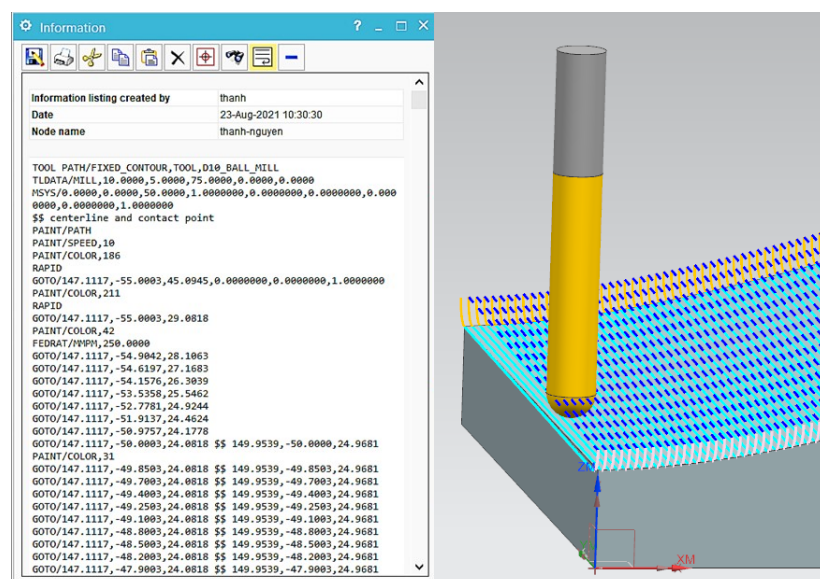
Chỉ với mục đích xây dựng mô hình chi tiết gia công có dạng bề mặt tự do cho thí nghiệm kiểm chứng thì có rất nhiều mô hình điển hình có thể tham khảo từ các thư viện chia sẻ trực tuyến. Với sự hỗ trợ của phần mềm NX, mô hình bề mặt tự do đã được xây dựng cùng với các thông số kích thước như hình 4.26. Chỉ với mục đích kiểm chứng và không làm phức tạp vấn đề, mặt cong được hình thành trên cơ sở đường cong Bézier bậc ba có độ cong vừa phải, khoảng cách đỉnh-đỉnh là 30mm, nhằm tránh va chạm (collision) dao hoặc bầu kẹp với phôi gia công khi góc nghiêng trục dao lớn.



Hình 4.26 Mô hình bề mặt tự do tạo bằng phần mềm NX

4.3.2.2. Chương trình gia công NC cho bề mặt tự do

Thông số dao phay cầu trong lập chương trình gia công vẫn sử dụng loại đã dùng trong thí nghiệm trước: là dao phay cầu liền thân, đường kính đầu cầu $D=10\text{mm}$. Thông số gia công liên quan đến hình học của dao là chiều sâu cắt và lượng dịch dao ngang được giữ nguyên như trong thí nghiệm ở mục 4.3.1.1. Trên phần mềm NX, sau khi tạo chương trình phay “Variable contour” trong nhóm “Mill_multi_axis” với các thông số gia công đã chọn, phần mềm tạo đường chạy dao cùng với thông tin trong tệp tin CLS của phần mềm NX chứa dữ liệu về: hệ tọa độ, dụng cụ cắt, tọa độ vị trí dao CL-Data và tọa độ điểm tiếp xúc dao CC-Data (hình 4.27).

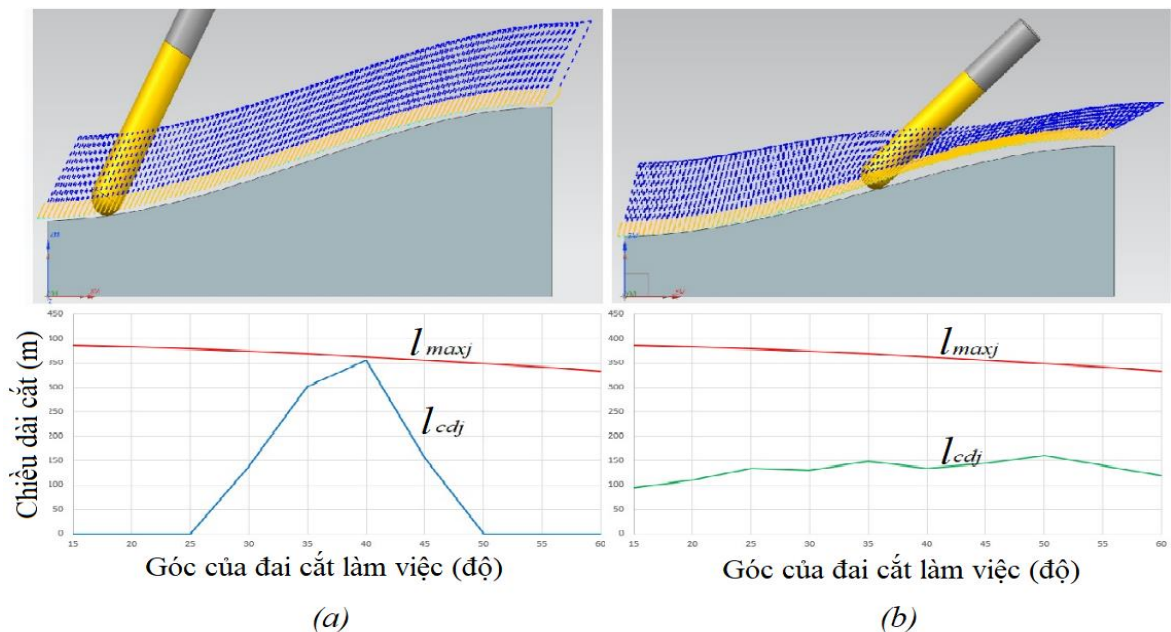


Hình 4.27 Các đường chạy dao và dữ liệu vị trí dao CL-Data

Dữ liệu từ tệp tin CLS là cơ sở để phần mềm CTMSoft phân tích sự phân bố đai cắt làm việc và chiều dài cắt của đường chạy dao tương ứng với đai cắt làm việc. Dữ liệu về tọa độ vị trí đỉnh dao phay cầu trong câu lệnh “GOTO/” lần lượt là giá trị trục X, Y và Z phân cách với nhau bởi dấu “,”; thông tin về tọa độ điểm tiếp xúc sẽ có dấu hiệu “\$\$” trong câu lệnh để nhận diện (hình 4.27). Như vậy từ ba điểm: điểm vị trí đỉnh dao, điểm tiếp xúc dao và điểm tâm bán cầu của dao phay cầu, hoàn toàn có thể xác định được đai cắt làm việc thông qua góc β (mô hình tính như hình 3.9) bằng phân tích hình học.

4.3.2.3. Lựa chọn giải pháp tối ưu tuổi bền dụng cụ

Sử dụng tính năng “Tilt tool axis” dùng điều khiển góc nghiêng trục dao theo hướng tiến dao để tránh cắt tại đỉnh của dao phay cầu. Thiết lập hai mô hình gia công với giá trị góc nghiêng khác nhau, một là: góc nghiêng không đổi $\theta_n = 30^\circ$ và hai là thay đổi tuyến tính $\theta_n = 15^\circ \rightarrow 60^\circ$. Tệp tin dữ liệu CLS xuất từ phần mềm NX CAM sẽ được tính toán chiều dài chạy dao L_{cdj} cùng với chiều dài cắt cho phép lớn nhất L_{maxj} ứng với từng đai cắt làm việc j sử dụng phần mềm CTMSoft.



Hình 4.28 Thí nghiệm gia công bề mặt tự do, (a) góc nghiêng cố định, (b) góc nghiêng thay đổi tuyến tính

Trên hình 4.28 biểu diễn đồ thị chiều dài chạy dao L_{cdj} được tích toán từ chương trình NC tại đai cắt làm việc j khác nhau. Đồng thời chiều dài cắt cho phép lớn nhất MACL ứng với từng đai cắt làm việc cũng được tính toán dựa

vào mạng nơ-ron nhân tạo cho giá trị L_{maxj} tương ứng. Hình 4.28 thể hiện đồ thị trực quan đối với chương trình gia công cũng như giá trị tính toán, từ đó dễ dàng nhận biết được vị trí nào của lưỡi cắt tham gia gia công theo chương trình và có nằm trong giới hạn làm việc hay không. Đồ thị bên trái cho thấy rõ ràng phân bố đai cắt làm việc chỉ tập trung tại một khoảng ($30^0 \div 45^0$), dao phay có thể gia công hết chương trình NC mà chưa hết tuổi bền, nhưng không thể tiếp tục gia công chi tiết tiếp theo vì tại vị trí lưỡi cắt $\beta = 40^0$ đã gần hết tuổi bền. Với phương pháp dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc (bên phải - hình 4.28) thì sự phân bố đoạn lưỡi cắt làm việc đồng đều hơn ($15^0 \div 60^0$), dao phay có thể tiếp tục gia công thêm một chi tiết tiếp theo mới hết tuổi bền.

Như vậy với mô hình gia công những chi tiết có bề mặt tự do bằng việc sử dụng phần mềm CAM hiện đại thì có thể kiểm soát góc nghiêng trục dao tốt như gia công trên mặt phẳng. Điều đó chứng tỏ giải pháp nâng cao tuổi bền bằng phương pháp dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc có thể khả thi trong thực tế sản xuất. Với sự hỗ trợ của công cụ dự đoán bằng mạng nơ-ron nhân tạo ta hoàn toàn có thể xác định được chiều dài cắt cho phép của từng đoạn lưỡi cắt, từ đó có kế hoạch điều khiển góc nghiêng trục dao sao cho khai thác nhiều nhất khả năng cắt của lưỡi cắt dao phay cầu.

Những thí nghiệm trên chỉ mới áp dụng cho dạng bề mặt đơn giản (mặt phẳng gãy khúc như hình 4.20 và bề mặt đường cong Bézier bậc ba như hình 4.26), đây chưa phải đặc trưng cho các dạng bề mặt thường được gia công trên máy phay CNC 5 trục. Khi gia công các bề mặt tự do sẽ khó khăn xác định chiều dài chạy dao hoặc giới hạn góc để tránh va chạm dao nên thực hiện dịch chuyển đoạn lưỡi cắt làm việc khi gia công các bề mặt này sẽ khó khăn hơn. Lúc này cần có giải pháp phân chia bề mặt chi tiết gia công thành các vùng khác nhau, áp dụng dịch chuyển đoạn lưỡi cắt cho những vùng bề mặt khả dụng. Còn lại những bề mặt phức tạp không khả dụng thì phải gia công theo cách thông thường, nhưng chiều dài cắt đã sử dụng của các đai cắt làm việc được lưu trữ lại nhằm phục vụ cho lần gia công tiếp theo. Như vậy, kết quả nghiên cứu của luận án này chưa đủ khả năng nâng cao tuổi bền dao phay cầu một cách toàn diện vì lý do: chưa tự viết phần mềm hậu xử lý để thiết kế đường chạy dao, các

bề mặt cong trong gia công kiểm chứng (hình 4.26) chỉ là bề mặt cong đơn điệu. Nhưng với tính toán hợp lý và kết hợp với phát triển phần mềm hỗ trợ thì giải pháp này vẫn có thể áp dụng với nhiều loại bề mặt cong không đơn điệu. Tương lai phát triển ngành gia công chế tạo sẽ ra đời các phần mềm CAM có nhiều tính năng hiện đại cùng các trung tâm gia công CNC nhiều trục có thể khắc phục được những hạn chế nêu trên và giúp hoàn thiện hơn giải pháp nâng cao tuổi bền dao phay cầu đã được đề xuất.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 4

- Thực hiện các thí nghiệm đánh giá mức độ ảnh hưởng của các chế độ cắt đến các thông số công nghệ, cho thấy mức độ ảnh hưởng của vận tốc cắt đến tuổi bền lớn nhất, làm căn cứ lựa chọn thông số chế độ cắt để tối ưu tuổi bền.
- Góc nghiêng có mức độ ảnh hưởng nhỏ nhất đến các thông số đầu ra nên áp dụng dịch đoạn lưỡi cắt làm việc để cải thiện tuổi bền mà không ảnh hưởng nhiều đến các thông số khác.
- Mạng nơ-ron nhân tạo trên phần mềm CTMSoft có chức năng tương đương phần mềm Visual Gene Developer sẽ làm công cụ dự đoán hỗ trợ cho giải pháp nâng cao tuổi bền dụng cụ đang nghiên cứu.
- Bằng các thí nghiệm kiểm chứng đã chứng minh cho tính đúng đắn của phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc. Đối với bề mặt chi tiết có góc nghiêng gây khúc và bề mặt cong đơn điệu thì dễ dàng ứng dụng phương pháp, những bề mặt phức tạp hơn vẫn có khả năng ứng dụng nếu có phần mềm hỗ trợ tính toán hợp lý.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN

KẾT LUẬN

Luận án đã hoàn thành các mục tiêu đề ra và giải quyết được các vấn đề cần nghiên cứu về giải pháp nâng cao tuổi bền của dao phay cầu. Các kết quả của luận án này có thể là tài liệu bổ sung lý thuyết xử lý số liệu thực nghiệm, tạo công cụ hỗ trợ giải quyết các bài toán tối ưu trong lĩnh vực gia công cơ khí. Sau đây là một số kết luận chủ yếu như sau:

1. Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến tuổi bền dao phay cầu: ngoài chế độ cắt còn có định hướng dao và góc nghiêng dao. Xác định tuổi bền thông qua đo lượng mòn mặt sau được sử dụng phổ biến, dễ thực hiện và chính xác.
2. Phương pháp Taguchi và phân tích phương sai ANOVA dùng để tối ưu quy hoạch thực nghiệm và xác định được mức độ ảnh hưởng chế độ cắt đến mục tiêu đầu ra.
3. Mạng nơ-ron nhân tạo dễ sử dụng, có khả năng dự đoán chính xác, mở ra hướng ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong lĩnh vực sản xuất cơ khí tiên tiến.
4. Đưa ra giải pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc nhằm nâng cao tuổi bền dao phay cầu, một giải pháp có ý nghĩa thực tiễn khi các phương pháp tối ưu thông số công nghệ đã được thực hiện.
5. Xây dựng phần mềm CTMSoft với các chức năng: quy hoạch thực nghiệm, dự đoán bằng mạng nơ-ron nhân tạo và phân tích dữ liệu vị trí dao hỗ trợ cho giải pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc.
6. Bảng thực nghiệm đã thiết lập được mối quan hệ thực nghiệm chế độ cắt và tuổi bền làm cơ sở chọn lựa chế độ cắt tối ưu, đồng thời khẳng định tính khả thi ứng dụng phương pháp dịch đoạn lưỡi cắt làm việc với những bề mặt gia công thực tế.

HƯỚNG PHÁT TRIỂN

Đề tài “Nghiên cứu giải pháp nâng cao tuổi bền dao phay cầu khi gia công trên máy CNC 5 trục” có tính khả thi cao khi được chứng minh bằng lý thuyết và thực nghiệm. Những kết quả đạt được của đề tài làm nền tảng để phát triển những nghiên cứu tiếp theo:

1. Tiếp tục nghiên cứu phát triển thêm tính năng phần mềm CTMSoft, bổ sung dữ liệu huấn luyện mạng nơ-ron nhân tạo với: kích thước dao phay cầu, vật liệu gia công, kết cấu động học máy phay CNC... Nhằm tạo một phần mềm hoàn thiện phục vụ cho mục đích nghiên cứu và ứng dụng vào sản xuất thực tế. Nghiên cứu giải pháp phân vùng bề mặt gia công phức tạp một cách tối ưu hơn để thực hiện hiệu quả dịch đoạn lưỡi làm việc.
2. Phương pháp tiếp cận và các kết quả nghiên cứu trong luận án có thể phát triển hệ thống giám sát tình trạng dụng cụ (Tool Condition Monitoring - TCM) ngay trong-quá trình (in-processing) gia công có chi phí thấp, dễ dàng trang bị trong thực tế sản xuất tại Việt Nam.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH CỦA TÁC GIẢ

1. Lê Văn Văn và Nguyễn Tài Hoài Thanh (2015), "Ảnh hưởng của góc nghiêng trục dao phay cầu tới độ nhám bề mặt khi gia công tinh trên máy phay CNC 5 trục", *Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật - Học viện KTQS*. 169, tr. 9.
2. Nguyễn Tài Hoài Thanh và Dương Văn Ngụy (2016), "Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ công nghệ tới tuổi bền dao phay cầu khi gia công thép 40x sau nhiệt luyện, " *Tạp chí hội nghị Khoa học và Công nghệ Toàn quốc về cơ khí - động lực*. 1(1), tr. 4.
3. Nguyễn Tài Hoài Thanh và Dương Văn Ngụy (2017), "Nghiên cứu ảnh hưởng của lực cắt đến tuổi bền dao phay cầu khi gia công thép hợp kim cứng sau nhiệt luyện", *Tạp chí hội nghị Khoa học và Công nghệ Toàn quốc về cơ khí - động lực*. 3(1), tr. 5.
4. Nguyễn Văn Toàn, Nguyễn Tuấn Hiếu và Nguyễn Tài Hoài Thanh (2017), "Dự đoán nhám bề mặt khi phay cnc theo phương pháp hồi quy đa biến và phương pháp trí tuệ nhân tạo", *Tạp chí nghiên cứu khoa học và công nghệ quân sự*. 47, tr. 8.
5. Vũ Văn Tịnh, Dương Quốc Dũng và Nguyễn Tài Hoài Thanh (2018), "Nghiên cứu cơ chế mòn mảnh dao khi tiện cứng thép 40X", *Tạp chí Giao thông Vận tải*. 5, tr. 4.
6. Nguyễn Văn Đức, Nguyễn Tài Hoài Thanh và Nguyễn Tuấn Hiếu (2018), "Nghiên cứu ảnh hưởng chiến lược chạy dao và các thông số công nghệ tới chất lượng bề mặt gia công khi phay hợp kim Inconel 625 bằng dao phay cầu", *Tạp chí Giao thông Vận tải*. 5, tr. 4.
7. Nguyễn Tài Hoài Thanh và Hồ Việt Hải (2021), "Dự đoán tuổi bền dao phay đầu cầu khi gia công tinh thép hợp kim 40x sử dụng phương pháp mạng nơ-ron nhân tạo", *Tạp chí Cơ khí*. 12-2021, tr. 7.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

1. Ban kỹ thuật tiêu chuẩn quốc gia TCVN/TC 29 (2015), "TCVN11258:2015 Thử nghiệm tuổi bền dao tiện một lưỡi cắt", TCVN11258:2015.
2. Hoàng Tiến Dũng, Hoàng Long và Nguyễn Tuấn Linh (2018), "Tối ưu hóa đa mục tiêu khi phay cao tốc bằng dao phay ngón liền khối sử dụng thuật toán PSO", *Kỷ yếu Hội nghị khoa học và công nghệ toàn quốc về Cơ khí lần thứ V - VCME 2018*. 5, tr. 11.
3. Trần Văn Địch (2003), *Công nghệ chế tạo máy*, Vol. 1, Nhà xuất bản khoa học và kỹ thuật, 837.
4. Nguyễn Văn Đức, Nguyễn Tài Hoài Thanh và Nguyễn Tuấn Hiếu (2018), "Nghiên cứu ảnh hưởng chiến lược chạy dao và các thông số công nghệ tới chất lượng bề mặt gia công khi phay hợp kim Inconel 625 bằng dao phay cầu", *Tạp chí Giao thông Vận tải*. 5, tr. 4.
5. Đào Văn Hiệp (2018), "Bàn thêm về bài toán tối ưu hoá chế độ cắt", *Kỷ yếu Hội nghị khoa học và công nghệ toàn quốc về Cơ khí lần thứ V - VCME 2018*. 5, tr. 14.
6. Nguyễn Hữu Lộc (2021), *Giáo trình Quy hoạch và phân tích thực nghiệm*, NXB Đại học Quốc gia TP Hồ Chí Minh, 490.
7. Nguyễn Tài Hoài Thanh và Hồ Việt Hải (2021), "Dự đoán tuổi bền dao phay đầu cầu khi gia công tinh thép hợp kim 40x sử dụng phương pháp mạng nơ ron nhân tạo", *Tạp chí Cơ khí*. 12-2021, tr. 7.
8. Nguyễn Tài Hoài Thanh và Dương Văn Ngụy (2016), "Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ công nghệ tới tuổi bền dao phay cầu khi gia công thép 40x sau nhiệt luyện", *Tạp chí hội nghị Khoa học và Công nghệ Toàn quốc về cơ khí - động lực*. 1(1), tr. 4.
9. Nguyễn Tài Hoài Thanh và Dương Văn Ngụy (2017), "Nghiên cứu ảnh hưởng của lực cắt đến tuổi bền dao phay cầu khi gia công thép hợp kim cứng sau nhiệt luyện", *Tạp chí hội nghị Khoa học và Công nghệ Toàn quốc về cơ khí - động lực*. 3(1), tr. 5.
10. Vũ Văn Tịnh, Dương Quốc Dũng và Nguyễn Tài Hoài Thanh (2018), "Nghiên cứu cơ chế mòn mảnh dao khi tiện cứng thép 40X", *Tạp chí Giao thông Vận tải*. 5, tr. 4.
11. Nguyễn Văn Toàn, Nguyễn Tuấn Hiếu và Nguyễn Tài Hoài Thanh (2017), "Dự đoán nhám bề mặt khi phay cnc theo phương pháp hồi quy

- đa biến và phương pháp trí tuệ nhân tạo", *Tạp chí nghiên cứu khoa học và công nghệ quân sự*. 47, tr. 8.
12. Nguyễn Quốc Tuấn (2009), "Mối quan hệ chế độ cắt và tuổi bền dao phay cầu phủ TiAlN khi gia công thép Cr12MoV qua tôi", *Tạp chí khoa học & công nghệ các trường đại học kỹ thuật*. 71, tr.5.
 13. Lê Văn Văn và Nguyễn Tài Hoài Thanh (2015), "Ảnh hưởng của góc nghiêng trục dao phay cầu tới độ nhám bề mặt khi gia công tinh trên máy phay CNC 5 trục", *Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật - Học viện KTQS*. 169, tr. 9.
 14. Bùi Long Vịnh, Nguyễn Ngọc Kiên và Trần Văn Địch (2017), "Tối ưu hóa chế độ cắt và góc nghiêng dao khi phay trên trung tâm gia công bằng dao phay cầu", *Tạp chí Cơ khí Việt Nam*. 5, tr. 5.

Tiếng Anh

15. Arsecularatne, J. A., et al. (1996), "Prediction of tool life in oblique machining with nose radius tools", *Wear*. 198(1), pp. 220-228.
16. Astakhov, Viktor (2007), "Effects of the cutting feed, depth of cut, and workpiece (bore) diameter on the tool wear rate", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 34(7), pp. 631-640.
17. Astakhov, Viktor and Davim, J. (2008), "Tools (Geometry and Material) and Tool Wear", pp. 29-57.
18. Athreya, Srinivas and Y.D.Venkatesh (2012), "Application Of Taguchi Method For Optimization Of Process Parameters In Improving The Surface Roughness Of Lathe Facing Operation", *International Refereed Journal of Engineering and Science*. 1, p. 7.
19. Azeem, Abdullahil and Feng, Hsi-Yung (2013), "Cutting force prediction for ball-end mills with non-horizontal and rotational cutting motions", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 67(5), pp. 1833-1845.
20. Benardos, P.G. and Vosniakos*, G.C. (2002), "Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. 18, p. 12.
21. Bhuiyan, Md Sayem and Choudhury, Imtiaz (2015), "Investigation of Tool Wear and Surface Finish by Analyzing Vibration Signals in

- Turning Assab-705 Steel", *Machining Science and Technology*. 19, pp. 236-261.
22. Briceno, Jorge F., El-Mounayri, Hazim, and Mukhopadhyay, Snehasis (2002), "Selecting an artificial neural network for efficient modeling and accurate simulation of the milling process", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 42(6), pp. 663-674.
 23. Chao, Ping Ji and Hwang, Yeong Dong (1997), "An improved neural network model for the prediction of cutting tool life", *Journal of Intelligent Manufacturing*. 8(2), pp. 107-115.
 24. Chen, C. Jacob and Chen, C. Joseph (2005), "An artificial-neural-networks-based in-process tool wear prediction system in milling operations", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 25(5), pp. 427-434.
 25. Chen, Xiaoxiao, Zhao, Jun, and Zhang, Wenwu (2014), "Influence of milling modes and tool postures on the milled surface for multi-axis finish ball-end milling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 77(9-12), pp. 2035-2050.
 26. Childs, Thomas, et al. (2000), *Metal Machining: Theory and Applications*, Vol. 1, Butterworth-Heinemann, 408.
 27. Choi, B. K., Park, J. W., and Jun, C. S. (1993), "Cutter-location data optimization in 5-axis surface machining", *Computer-Aided Design*. 25(6), pp. 377-386.
 28. Costa Castanhera, Isabela and Diniz, Anselmo Eduardo (2017), "Cutting forces, surface roughness and tool life in high-speed milling of hardened steel convex surface", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 39(9), pp. 3555-3570.
 29. Dave, Anderson and George, McNeill (1992), *Artificial neural networks technology*, Kaman Sciences Corporation, 97.
 30. Davim, J. Paulo (2011), *Machining of Hard Materials*, Springer, 225.
 31. De Oliveira, Adilson José and Diniz, Anselmo Eduardo (2009), "Tool life and tool wear in the semi-finish milling of inclined surfaces", *Journal of Materials Processing Technology*. 209(14), p. 8.
 32. Diciuc, Vlad and Lobontiu, Mircea (2015), "Comparative study of the ball nose end mill machined surface quality". 10, p. 6.
 33. El-Mounayri, Hazim, Briceno, Jorge F., and Gadallah, Mohamed (2010), "A new artificial neural network approach to modeling ball-end milling",

- The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 47(5), pp. 527-534.
34. Erdim, Huseyin and Sullivan, Alan (2013), "Cutter Workpiece Engagement Calculations for Five-axis Milling Using Composite Adaptively Sampled Distance Fields", *Procedia CIRP*. 8, pp. 438-443.
 35. Erzurumlu, Tuncay and Oktem, Hasan (2007), "Comparison of response surface model with neural network in determining the surface quality of moulded parts", *Materials & Design*. 28(2), pp. 459-465.
 36. Fan, Jianhua (2014), "Cutting speed modelling in ball nose milling applications", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 73(1), pp. 161-171.
 37. Ferry, W. and Yip-Hoi, Derek (2008), "Cutter-Workpiece Engagement Calculations by Parallel Slicing for Five-Axis Flank Milling of Jet Engine Impellers", *Journal of Manufacturing Science and Engineering-transactions of The Asme - J MANUF SCI ENG*. 130.
 38. Giusti, F., Santochi, M., and Tantussi, G. (1987), "On-Line Sensing of Flank and Crater Wear of Cutting Tools", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 36(1), pp. 41-44.
 39. Graupe, Daniel (2007), *Principles of Artificial Neural Network*, Vol. 6, World Scientific Publishing, 320.
 40. Haber, Rodolfo E. and Alique, A. (2003), "Intelligent process supervision for predicting tool wear in machining processes", *Mechatronics*. 13(8–9), pp. 825-849.
 41. Huang, Bernie P., Chen, Joseph C., and Li, Ye (2008), "Artificial-neural-networks-based surface roughness Pokayoke system for end-milling operations", *Neurocomputing*. 71(4–6), pp. 544-549.
 42. Iwabe, Hiroyasu and Enta, Kazufumi (2008), "Tool life of small diameter ball end mill for high speed milling of hardened steel".
 43. J, Caldeirani and Diniz, Anselmo (2002), "Influence of Cutting Conditions on Tool Life, Tool Wear and Surface Finish in the Face Milling Process", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*. 24.
 44. Jung, S. K. and McDonald, K. (2011), "Visual gene developer: a fully programmable bioinformatics software for synthetic gene optimization", *BMC Bioinformatics*. 12, p. 340.
 45. Kadam, S.V. and Rathi, M.G. (2014), "Review of Different Approaches to Improve Tool Life". 3, p. 8.

46. Kale, Sandip A. and Chaudhari, Nitasha B. (2016), "Effect of Cutting Parameters on Tool Life", *International Journal of Current Engineering and Technology*. 6(6), p. 5.
47. Kang, C. M., et al. (2001), "Characteristics of Inclined Planes According to the Variations of Cutting Direction in High-Speed Ball-End Milling", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 17(5), pp. 323-329.
48. Khripunov, N. and Vaskin, K. (2020), "Tool life estimation using acoustic emission signal", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 709, p. 033088.
49. Kompan Chomsamutr, Somkiat Jongprasithporn (2012), "Optimization Parameters of tool life Model Using the Taguchi Approach and Response Surface Methodology", *International Journal of Computer Science*. 9(1), p. 6.
50. Kowalczyk, Małgorzata (2014), "Application of Taguchi and ANOVA methods in selection of process parameters for surface roughness in precision turning of Titanium". 38, p. 15.
51. Layegh, Ehsan, Lazoglu, Ismail, and Yigit, Ismail (2014), *The effect of tool orientation on five axis ball end milling of Ti6Al4V*.
52. Lee, P. and Altıntaş, Y. (1996), "Prediction of ball-end milling forces from orthogonal cutting data", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 36(9), pp. 1059-1072.
53. Li, Bin (2012), "A review of tool wear estimation using theoretical analysis and numerical simulation technologies", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 35, pp. 143-151.
54. Lind, Ingela (2006), *Regressor and Structure Selection Uses of ANOVA in System Identification*, Vol. 1, Linköping Studies in Science and Technology, 206.
55. Lindman, Harold R. (1992), *Analysis of variance in experimental design*, Analysis of variance in experimental design., Springer-Verlag Publishing, New York, NY, US, viii, 531-viii, 531.
56. Luo, Ming, et al. (2018), "Improving tool life in multi-axis milling of Ni-based superalloy with ball-end cutter based on the active cutting edge shift strategy", *Journal of Materials Processing Technology*. 252, pp. 105-115.

57. Naidu, Anurag and Asati, Sanjay (2014), "Cutting Tool Life Determination Using Vibration Based Signals and Innovative Approach - A Review". 3, p. 9.
58. Nasri, A., Slaimi, J., and Sai, W. Bouzid (2016), "3D Parametric Modelling of Milling Cutter Geometry from Analytical Analysis", *International Journal of Science, Technology and Society*. 4(2), p. 5.
59. Ng, E. G., et al. (2000), "Experimental Evaluation of Cutter Orientation When Ball Nose End Milling Inconel 718™", *Journal of Manufacturing Processes*. 2(2), pp. 108-115.
60. Öktem, H. (2009), "An integrated study of surface roughness for modelling and optimization of cutting parameters during end milling operation", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 43(9), pp. 852-861.
61. Olufayo, O. and Abou-El-Hossein, K. (2015), "Tool life estimation based on acoustic emission monitoring in end-milling of H13 mould-steel", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 81(1), pp. 39-51.
62. Ozturk, Erdem, Tunc, L. Taner, and Budak, Erhan (2009), "Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 49(14), pp. 1053-1062.
63. P, Lakshmi and S, Visalakshmi (2016), "Exploring the usage of econometric techniques in nonlinear machine learning and data mining", *International Journal of Mathematics in Operational Research*. 9, p. 349.
64. Palanisamy, P., Rajendran, I., and Shanmugasundaram, S. (2008), "Prediction of tool wear using regression and ANN models in end-milling operation", *International Journal of Advanced Science and Technology*, p. 13.
65. Panagopoulos, G., Panagopoulou, M., and Nikolakopoulos, Pantelis (2021), "Friction - wear modeling in drilling process of H-13 tool steel", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1037, p. 012013.
66. Patel, Mihir (2015), "Experimental Investigation of Material Removal Rate in CNC TC Using Taguchi Approach", *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2, pp. 203-210.

67. Peng, Chong, Du, Hanheng, and Warren Liao, T. (2017), "A research on the cutting database system based on machining features and TOPSIS", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 43, pp. 96-104.
68. Pfeifer, T. and Wieggers, L. (2000), "Reliable tool wear monitoring by optimized image and illumination control in machine vision", *Measurement*. 28(3), pp. 209-218.
69. Polli, Milton and Silva, Fábio (2019), "Analysis of the Dynamic Stability of Ball-End Milling of AISI D6 Hardened Steel", *Materials Research*. 22.
70. Quintana, G., Ciurana, J. de, and Ribatallada, J. (2010), "Surface Roughness Generation and Material Removal Rate in Ball End Milling Operations", *Materials and Manufacturing Processes*. 25(6), pp. 386-398.
71. Rashid, Ab. and Lani, Abdul (2010), "Surface Roughness Prediction for CNC Milling Process using Artificial Neural Network". 3(London, U.K), p. 6.
72. Ronald, A. Walsh (2006), *McGraw-Hill Machining and Metalworking Handbook, Third Edition*, 3rd ed. ed, McGraw-Hill Education, New York.
73. Roy, Ranjit k. (1990), *A primer on the taguchi method*, Van Nostrand Reinhold.
74. Roy, Ranjit k. (2001), *Design of Experiments using the Taguchi Approach: 16 Steps to Product and Process Improvement*, Vol. 1, Wiley-Interscience, 568.
75. Schulz, H. and Hock, St (1995), "High-Speed Milling of Dies and Moulds — Cutting Conditions and Technology", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 44(1), pp. 35-38.
76. Shafiq, Amir, et al. (2014), "Prediction of Tool Wear for Ball End Nose in Milling Inconel 718 Using a Feed Forward Back Propagation Neural Network", *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 8, pp. 383-390.
77. Shah, Ishan B and Gawande, Kishore. R. (2012), "Optimization of Cutting Tool Life on CNC Milling Machine through Design of Experiments-A Suitable Approach – An overview", *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 1(4), p. 7.
78. Shajari, Shaghayegh, Sadeghi, Mohammad Hossein, and Hassanpour, Hamed (2014), "The Influence of Tool Path Strategies on Cutting Force

- and Surface Texture during Ball End Milling of Low Curvature Convex Surfaces", *The Scientific World Journal*. 2014, p. 374526.
79. Souza, Adriano, et al. (2014), "Investigating the cutting phenomena in free-form milling using a ball-end cutting tool for die and mold manufacturing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 71.
 80. Standardization, International Organization for (1989), "ISO 8688-2:1989 Tool life testing in milling — Part 2: End milling"(<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8688:-2:ed-1:v1:en>), p. 26.
 81. Sun, Yujing, et al. (2013), "Modeling of cutting force under the tool flank wear effect in end milling Ti6Al4V with solid carbide tool", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 69(9), pp. 2545-2553.
 82. Sunday, Joshua, et al. (2014), "A Study of Effects of Machining Parameters on Tool Life", *International Journal of Applied Materials Science*. 319, pp. 183-199.
 83. Taguchi, G. and Jugulum, R. (2002), *The Mahalanobis-Taguchi Strategy: A Pattern Technology System*, Vol. 1, John Wiley & Sons, 234.
 84. Tan, Liang, et al. (2016), "Effect of cutter path orientations on cutting forces, tool wear, and surface integrity when ball end milling TC17", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1-14.
 85. Tandon, V. and El-Mounayri, H. (2001), "A Novel Artificial Neural Networks Force Model for End Milling", *International Journal Advanced Manufacture Technology*. 2001, p. 8.
 86. Tandon, V., El-Mounayri, H., and Kishawy, H. (2002), "NC end milling optimization using evolutionary computation", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 42(5), pp. 595-605.
 87. Taylor, F. W. (1906), *On the Art of Cutting Metals*, American society of Mechanical Engineers, American Society of Mechanical Engineers, 248.
 88. Tsai, Yu-Hsuan, Chenb, Joseph C., and Louc, Shi-Jer (1999), "An in-process surface recognition system based on neural networks in end milling cutting operations", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 39, p. 23.
 89. Vavruska, Petr (2012), "Machine Tool Control Systems and Interpolations of Spline Type", *Mechanical Engineering*. 19, p. 219.

90. Venkatesh, V. C. and Satchithanandam, M. (1980), "A Discussion on Tool Life Criteria and Total Failure Causes", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 29(1), pp. 19-22.
91. Vopát, Tomáš, Peterka, Jozef, and Kováč, Martin (2014), "The tool life of ball nose end mill depending on the different types of ramping", *Faculty of materials science and technology in TRNAVA*. 22.
92. Wang, W. H., Hong, G. S., and Wong, Y. S. (2006), "Flank wear measurement by a threshold independent method with sub-pixel accuracy", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 46(2), pp. 199-207.
93. Wang, W. H., Wong, Y. S., and Hong, G. S. (2005), "Flank wear measurement by successive image analysis", *Computers in Industry*. 56(8–9), pp. 816-830.
94. Wojciechowski, S., et al. (2015), "Modeling of cutter displacements during ball end milling of inclined surfaces", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 15(4), pp. 798-805.
95. Wojciechowski, Szymon and Twardowski, Paweł (2012), "Tool Life and Process Dynamics in High Speed Ball End Milling of Hardened Steel", *Procedia CIRP*. 1, pp. 289–294.
96. Wojciechowski, Szymon, Twardowski, Paweł, and Wieczorowski, Michał (2014), "Surface texture analysis after ball end milling with various surface inclination of hardened steel". 21.
97. Xun, Gong and Feng, Hsi-Yung (2016), "Cutter-workpiece engagement determination for general milling using triangle mesh modeling", *Journal of Computational Design and Engineering*. 3(2), pp. 151-160.
98. Yang, Pan, et al. (2016), "Effect of Tool Orientation on Surface Integrity During Ball End Milling of Titanium Alloy TC17", *Procedia CIRP*. 56, pp. 143-148.
99. Yin, Qingan, et al. (2020), "Recent progress of machinability and surface integrity for mechanical machining Inconel 718: a review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 109(1), pp. 215-245.
100. Zain, A. M., Haron, H., and Sharif, S. (2009), Application of Regression and ANN Techniques for Modeling of the Surface Roughness in End Milling Machining Process, *2009 Third Asia International Conference on Modelling & Simulation*, pp. 188-193.

101. Zain, Azlan Mohd, et al. (2012), "Regression and ANN models for estimating minimum value of machining performance", *Applied Mathematical Modelling*. 36(4), pp. 1477-1492.
102. Zhang, Chen and Zhang, Jilin (2013), "On-line tool wear measurement for ball-end milling cutter based on machine vision", *Computers in Industry*. 64(6), pp. 708-719.
103. Zhang, Song and Li, Jian-feng (2010), "Tool wear criterion, tool life, and surface roughness during high-speed end milling Ti-6Al-4V alloy", *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*. 11(8), pp. 587-595.
104. Zhang, Zheng, Li, Liang, and Zhao, Wei (2016), "Tool Life Prediction Model Based on GA-BP Neural Network", *Materials Science Forum*. 836-837, pp. 256-262.
105. Živković, Srdjan (2016), "NX CAM post processing errors: Machine data file generator vs. Post Builder", *FME Transaction*. 44, pp. 159-164.
106. Zuperl, U., Kiker, E., and Cus, F. (2003), Optimization in ball-end milling by using adaptive neural controller, *IEEE International Conference on Industrial Technology, 2003*, pp. 393-398 Vol.1.

PHỤ LỤC

Phụ lục 1. Bảng thí nghiệm trực giao $L_{16}(4^4)$ và các thí nghiệm bổ sung

STT	Vận tốc cắt V_c	Lượng tiến dao răng f_z	Chiều sâu cắt a_p	Góc nghiêng dao θ	Ghi chú
1	1	1	1	1	Trực giao
2	1	2	2	2	Trực giao
3	1	3	3	3	Trực giao
4	1	4	4	4	Trực giao
5	2	1	2	3	Trực giao
6	2	2	1	4	Trực giao
7	2	3	4	1	Trực giao
8	2	4	3	2	Trực giao
9	3	1	3	4	Trực giao
10	3	2	4	3	Trực giao
11	3	3	1	2	Trực giao
12	3	4	2	1	Trực giao
13	4	1	4	2	Trực giao
14	4	2	3	1	Trực giao
15	4	3	2	4	Trực giao
16	4	4	1	3	Trực giao
17	1	1	1	4	Bổ sung
18	1	3	2	2	Bổ sung
19	1	4	4	1	Bổ sung
20	2	1	1	4	Bổ sung
21	2	2	3	3	Bổ sung
22	2	4	4	1	Bổ sung
23	3	1	1	4	Bổ sung
24	3	2	3	2	Bổ sung
25	3	4	4	1	Bổ sung
26	4	1	1	4	Bổ sung
27	4	3	2	3	Bổ sung
28	4	4	4	1	Bổ sung

Phụ lục 2. Giá trị tính toán đường kính cắt hiệu dụng, tốc độ trục chính và tốc độ tiến dao

(Tính toán tốc độ quay trục chính n và tốc độ tiến dao f là các thông số điều khiển nhập vào phần mềm CAM khi lập trình chương trình NC)

STT	V_c (m/ph)	f_z (mm/răng)	a_p (mm)	D_{ef} (mm)	Tốc độ trục chính n (vòng/phút)	Tốc độ tiến dao f (mm/phút)
1	90	0.05	0.05	3.92	7,308	730.8
2	90	0.1	0.1	6.62	4,328	865.5
3	90	0.15	0.15	8.58	3,339	1001.7
4	90	0.2	0.2	9.71	2,950	1180.2
5	120	0.05	0.10	8.34	4,580	458.0
6	120	0.10	0.05	9.28	4,116	823.2
7	120	0.15	0.20	5.19	7,360	2,208.0
8	120	0.20	0.15	6.96	5,488	2,195.3
9	150	0.05	0.15	9.62	4,963	496.3
10	150	0.10	0.20	8.77	5,444	1,088.9
11	150	0.15	0.05	6.17	7,739	2,321.6
12	150	0.20	0.10	4.46	10,706	4,282.3
13	180	0.05	0.20	7.22	7,936	793.6
14	180	0.10	0.15	4.86	11,790	2,357.9
15	180	0.15	0.10	9.48	6,044	1,813.2
16	180	0.20	0.05	8.00	7,162	2,864.9
17	90	0.05	0.05	9.28	3,087	308.7
18	90	0.15	0.10	6.62	4,328	1,298.3
19	90	0.20	0.20	5.19	5,520	2,208.0
20	120	0.05	0.05	9.28	4,116	411.6
21	120	0.10	0.15	8.58	4,452	890.4
22	120	0.20	0.20	5.19	7,360	2,944.0
23	150	0.05	0.05	9.28	5,145	514.5
24	150	0.10	0.15	6.96	6,860	1,372.1
25	150	0.20	0.20	5.19	9,200	3,680.0
26	180	0.05	0.05	9.28	6,174	617.4
27	180	0.15	0.10	8.34	6,870	2,061.1
28	180	0.20	0.20	5.19	11,040	4,416.0

Phụ lục 3. Hình ảnh phát triển vết mòn trên lưỡi cắt ở các thí nghiệm



Thí nghiệm 1 - 15°
l_{cắt}: 2.2m



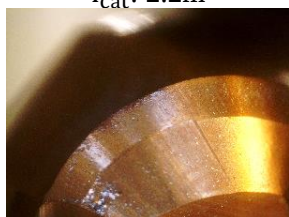
Thí nghiệm 1 - 15°
l_{cắt}: 165.0m



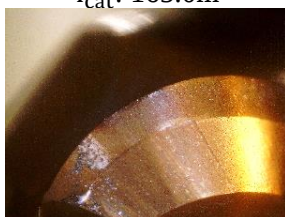
Thí nghiệm 1 - 15°
l_{cắt}: 331.1m



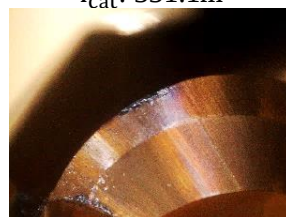
Thí nghiệm 1 - 15°
l_{cắt}: 452.1m



Thí nghiệm 2 - 30°
l_{cắt}: 2.2m



Thí nghiệm 2 - 30°
l_{cắt}: 136.4m



Thí nghiệm 2 - 30°
l_{cắt}: 271.7m



Thí nghiệm 2 - 30°
l_{cắt}: 383.9m



Thí nghiệm 3 - 45°
l_{cắt}: 2.2m



Thí nghiệm 3 - 45°
l_{cắt}: 113.3



Thí nghiệm 3 - 45°
l_{cắt}: 237.6m



Thí nghiệm 3 - 45°
l_{cắt}: 311.3m



Thí nghiệm 4 - 60°
l_{cắt}: 2.2m



Thí nghiệm 4 - 60°
l_{cắt}: 74.8m



Thí nghiệm 4 - 60°
l_{cắt}: 158.4m



Thí nghiệm 4 - 60°
l_{cắt}: 194.7m



Thí nghiệm 5 - 30°
l_{cắt}: 2.2m



Thí nghiệm 5 - 30°
l_{cắt}: 136.4m



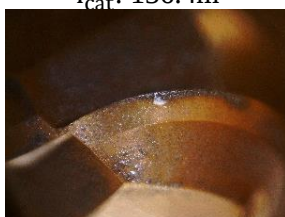
Thí nghiệm 5 - 30°
l_{cắt}: 202.4m



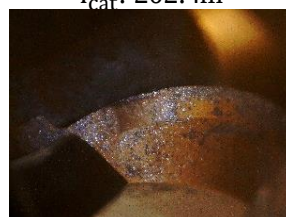
Thí nghiệm 5 - 30°
l_{cắt}: 289.3m



Thí nghiệm 6 - 15°
l_{cắt}: 2.2m



Thí nghiệm 6 - 15°
l_{cắt}: 138.6m



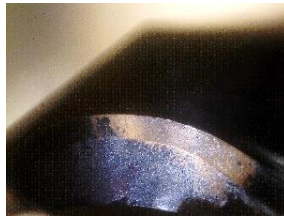
Thí nghiệm 6 - 15°
l_{cắt}: 182.6m



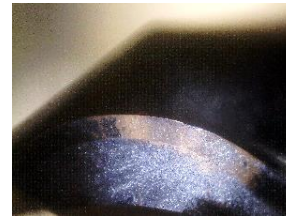
Thí nghiệm 6 - 15°
l_{cắt}: 262.9m



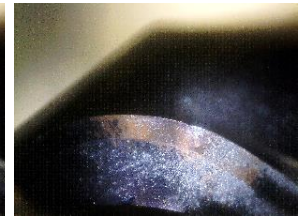
Thí nghiệm 7 - 60°
l_{cắt}: 2.2m



Thí nghiệm 7 - 60°
l_{cắt}: 61.6m



Thí nghiệm 7 - 60°
l_{cắt}: 124.3m



Thí nghiệm 7 - 60°
l_{cắt}: 188.1m



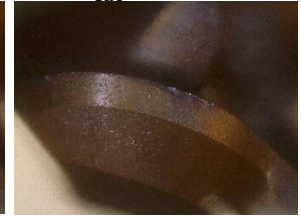
Thí nghiệm 8 - 45°
l_{cắt}: 2.2 m



Thí nghiệm 8 - 45°
l_{cắt}: 56.1 m



Thí nghiệm 8 - 45°
l_{cắt}: 113.3 m



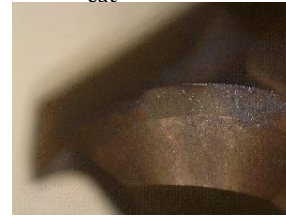
Thí nghiệm 8 - 45°
l_{cắt}: 171.6 m



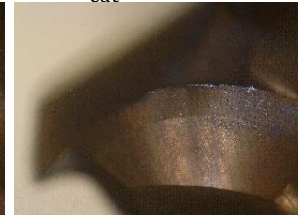
Thí nghiệm 9 - 45°
l_{cắt}: 2.2 m



Thí nghiệm 9 - 45°
l_{cắt}: 55.0 m



Thí nghiệm 9 - 45°
l_{cắt}: 116.6 m



Thí nghiệm 9 - 45°
l_{cắt}: 166.1 m



Thí nghiệm 10 - 60°
l_{cắt}: 2.2 m



Thí nghiệm 10 - 60°
l_{cắt}: 41.8 m



Thí nghiệm 10 - 60°
l_{cắt}: 82.5 m



Thí nghiệm 10 - 60°
l_{cắt}: 125.4 m



Thí nghiệm 11 - 15°
l_{cắt}: 2.2 m



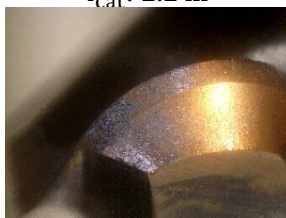
Thí nghiệm 11 - 15°
l_{cắt}: 68.2 m



Thí nghiệm 11 - 15°
l_{cắt}: 136.4 m



Thí nghiệm 11 - 15°
l_{cắt}: 206.8 m



Thí nghiệm 12 - 30°
l_{cắt}: 2.2 m



Thí nghiệm 12 - 30°
l_{cắt}: 47.3 m



Thí nghiệm 12 - 30°
l_{cắt}: 94.6 m



Thí nghiệm 12 - 30°
l_{cắt}: 143.0 m



Thí nghiệm 13 - 60°
 $l_{\text{cắt}}: 2.2 \text{ m}$



Thí nghiệm 13 - 60°
 $l_{\text{cắt}}: 46.2 \text{ m}$



Thí nghiệm 13 - 60°
 $l_{\text{cắt}}: 92.4 \text{ m}$



Thí nghiệm 13 - 60°
 $l_{\text{cắt}}: 140.8 \text{ m}$



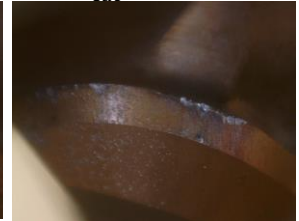
Thí nghiệm 14 - 45°
 $l_{\text{cắt}}: 2.2 \text{ m}$



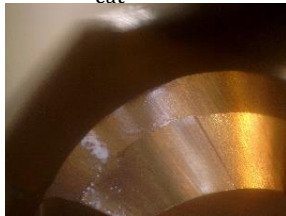
Thí nghiệm 14 - 45°
 $l_{\text{cắt}}: 50.6 \text{ m}$



Thí nghiệm 14 - 45°
 $l_{\text{cắt}}: 100.1 \text{ m}$



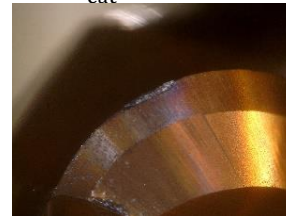
Thí nghiệm 14 - 45°
 $l_{\text{cắt}}: 151.8 \text{ m}$



Thí nghiệm 15 - 30°
 $l_{\text{cắt}}: 2.2 \text{ m}$



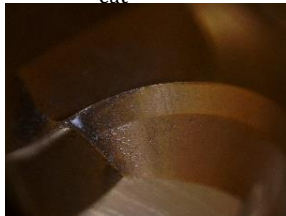
Thí nghiệm 15 - 30°
 $l_{\text{cắt}}: 34.1 \text{ m}$



Thí nghiệm 15 - 30°
 $l_{\text{cắt}}: 68.2 \text{ m}$



Thí nghiệm 15 - 30°
 $l_{\text{cắt}}: 103.4 \text{ m}$



Thí nghiệm 16 - 15°
 $l_{\text{cắt}}: 2.2 \text{ m}$



Thí nghiệm 16 - 15°
 $l_{\text{cắt}}: 37.4 \text{ m}$



Thí nghiệm 16 - 15°
 $l_{\text{cắt}}: 73.7 \text{ m}$



Thí nghiệm 16 - 15°
 $l_{\text{cắt}}: 112.2 \text{ m}$

Phụ lục 4. Giá trị các yếu tố đầu ra trong các thí nghiệm

S T T	V_c (m/ph)	f_z (mm)	a_p (mm)	θ (độ)	Chiều dài cắt (m)	Thời gian cắt (phút)	MRR (mm ³ /ph)	Sai lệch TB (μ m)
1	90	0.05	0.05	15	452.1	618.6	11.30	0.71
2	90	0.1	0.1	30	383.9	443.5	23.58	0.94
3	90	0.15	0.15	45	311.3	310.8	47.82	1.35
4	90	0.2	0.2	60	194.7	165.0	69.22	1.58
5	120	0.05	0.1	45	289.3	631.6	15.00	0.81
6	120	0.1	0.05	60	262.9	319.3	11.56	0.74
7	120	0.15	0.2	15	188.1	85.2	136.60	1.16
8	120	0.2	0.15	30	171.6	78.2	108.98	1.14
9	150	0.05	0.15	60	166.1	334.6	19.89	0.88
10	150	0.1	0.2	45	125.4	115.2	57.20	1.11
11	150	0.15	0.05	30	206.8	89.1	31.64	0.63
12	150	0.2	0.1	15	143.0	33.4	137.23	0.71
13	180	0.05	0.2	30	140.8	177.4	48.09	0.94
14	180	0.1	0.15	15	151.8	64.4	94.75	0.55
15	180	0.15	0.1	60	103.4	57.0	48.25	0.71
16	180	0.2	0.05	45	112.2	39.2	42.33	0.68
17	90	0.05	0.05	60	411.4	1332.6	4.50	1.01
18	90	0.15	0.1	30	347.6	267.7	40.88	1.00
19	90	0.2	0.2	15	247.5	112.1	147.66	1.39
20	120	0.05	0.05	60	303.6	737.6	6.36	0.83
21	120	0.1	0.15	45	231.0	259.4	42.71	1.02
22	120	0.2	0.2	15	130.9	44.5	196.87	1.13
23	150	0.05	0.05	60	222.2	431.9	7.74	0.58
24	150	0.1	0.15	30	163.9	119.5	60.21	0.68
25	150	0.2	0.2	15	77.0	20.9	242.79	1.13
26	180	0.05	0.05	60	198.0	320.7	8.78	0.54
27	180	0.15	0.1	45	129.8	63.0	67.35	0.71
28	180	0.2	0.2	15	57.2	13.0	284.75	1.13

Phụ lục 5. Bảng kết quả dự đoán tuổi bền bằng phần mềm Visual Gene

Thí nghiệm	Tuổi bền thực tế	Tuổi bền dự đoán	$ Y_t - \hat{Y}_t $	$(Y_t - \hat{Y}_t)^2$	$\frac{ Y_t - \hat{Y}_t }{Y_t}$
1	452.1	452.0	0.1	0.0	0.0003
2	383.9	402.5	18.6	344.3	0.0483
3	311.3	312.4	1.1	1.2	0.0035
4	194.7	198.2	3.5	12.6	0.0182
5	289.3	293.6	4.3	18.7	0.0149
6	262.9	268.1	5.2	26.9	0.0197
7	188.1	186.9	1.2	1.5	0.0066
8	171.6	168.5	3.1	9.9	0.0183
9	166.1	167.9	1.8	3.4	0.0111
10	125.4	137.2	11.8	139.6	0.0942
11	206.8	208.6	1.8	3.2	0.0087
12	143.0	145.9	2.9	8.2	0.0200
13	140.8	141.3	0.5	0.3	0.0036
14	151.8	150.5	1.3	1.8	0.0088
15	103.4	107.1	3.7	13.4	0.0353
16	112.2	114.3	2.1	4.4	0.0187
17	411.4	412.3	0.9	0.8	0.0022
18	347.6	373.5	25.9	668.8	0.0744
19	247.5	251.5	4.0	15.8	0.0161
20	303.6	302.0	1.6	2.5	0.0052
21	231.0	229.1	1.9	3.6	0.0083
22	130.9	132.9	2.0	3.8	0.0149
23	222.2	222.0	0.2	0.0	0.0008
24	163.9	178.1	14.2	202.7	0.0869
25	77.0	81.7	4.7	22.1	0.0610
26	198.0	181.4	16.6	277.2	0.0841
27	129.8	127.8	2.0	4.1	0.0156
28	57.2	58.8	1.6	2.5	0.0279
Tổng			138.7	1793.4	0.7000

(Số liệu in đậm là dữ liệu dùng thử định trong huấn luyện mạng nơ-ron nhân tạo)

Sai số tuyệt đối trung bình: $MAE = \frac{\sum_1^n |Y_t - \hat{Y}_t|}{n} = 4.950$

Sai số bình phương trung bình: $MSE = \frac{\sum_1^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2}{n} = 64.05$

Sai số phần trăm tuyệt đối trung bình: $MAPE = \frac{\sum_1^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t}}{n} = 0.026$

Phụ lục 6. Bảng kết quả dự đoán tuổi bền bằng phần mềm CTMSoft

Thí nghiệm	Tuổi bền thực tế	Tuổi bền dự đoán	$ Y_t - \hat{Y}_t $	$(Y_t - \hat{Y}_t)^2$	$\frac{ Y_t - \hat{Y}_t }{Y_t}$
1	452.1	452.2	0.1	0.0	0.0002
2	383.9	401.5	17.6	311.4	0.0460
3	311.3	311.3	0.0	0.0	0.0001
4	194.7	194.7	0.0	0.0	0.0001
5	289.3	289.2	0.1	0.0	0.0002
6	262.9	262.9	0.0	0.0	0.0000
7	188.1	188.1	0.0	0.0	0.0002
8	171.6	171.6	0.0	0.0	0.0000
9	166.1	165.9	0.2	0.1	0.0015
10	125.4	172.6	47.2	2223.5	0.3760
11	206.8	206.8	0.0	0.0	0.0001
12	143.0	143.0	0.0	0.0	0.0002
13	140.8	140.9	0.1	0.0	0.0004
14	151.8	151.6	0.2	0.0	0.0013
15	103.4	103.4	0.0	0.0	0.0001
16	112.2	112.2	0.0	0.0	0.0003
17	411.4	411.3	0.1	0.0	0.0003
18	347.6	387.9	40.3	1625.7	0.1160
19	247.5	247.4	0.1	0.0	0.0003
20	303.6	303.7	0.1	0.0	0.0005
21	231.0	231.0	0.0	0.0	0.0001
22	130.9	131.2	0.3	0.1	0.0020
23	222.2	222.0	0.2	0.0	0.0008
24	163.9	164.5	0.6	0.3	0.0034
25	77.0	76.5	0.5	0.3	0.0068
26	198.0	162.4	35.6	1267.4	0.1798

Thí nghiệm	Tuổi bền thực tế	Tuổi bền dự đoán	$ Y_t - \hat{Y}_t $	$(Y_t - \hat{Y}_t)^2$	$\frac{ Y_t - \hat{Y}_t }{Y_t}$
27	129.8	129.7	0.1	0.0	0.0009
28	57.2	57.6	0.4	0.2	0.0074
Tổng số			144.0	5429.0	0.7000

(Số liệu in đậm là dữ liệu dùng thẩm định trong huấn luyện mạng nơ-ron nhân tạo)

Sai số tuyệt đối trung bình: $MAE = \frac{\sum_1^n |Y_t - \hat{Y}_t|}{n} = 5.1425$

Sai số bình phương trung bình: $MSE = \frac{\sum_1^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2}{n} = 193.8924$

Sai số phần trăm tuyệt đối trung bình: $MAPE = \frac{\sum_1^n \frac{|Y_t - \hat{Y}_t|}{Y_t}}{n} = 0.0266$

Phụ lục 7. Dự đoán đầu ra cho thông số thí nghiệm kiểm chứng

- Vận tốc cắt: $V_c = 90$ m/phút,
- Lượng tiến dao răng: $f_z = 0.05$ mm/răng,
- Chiều sâu cắt: $a_p = 0.2$ mm,
- Góc nghiêng: $\theta = 15^\circ \div 60^\circ$.

Góc nghiêng (độ)	Phần mềm Visual Gene		Phần mềm CTMSoft	
	Tuổi bền (m)	Ra (μm)	Tuổi bền (m)	Ra (μm)
15	386.1	1.403	378.1	1.433
16	385.6	1.410	394.6	1.320
17	385.0	1.416	393.0	1.336
18	384.4	1.422	378.4	1.332
19	383.8	1.428	383.8	1.408
20	383.1	1.434	390.1	1.514
21	382.4	1.440	380.4	1.510
22	381.6	1.446	380.6	1.356
23	380.8	1.452	382.8	1.432
24	380.0	1.457	370.0	1.527
25	379.1	1.463	369.1	1.523
26	378.2	1.468	387.2	1.468
27	377.3	1.473	368.3	1.393
28	376.3	1.478	371.3	1.578
29	375.3	1.484	379.3	1.414

Góc nghiêng (độ)	Phần mềm Visual Gene		Phần mềm CTMSOft	
	Tuổi bên (m)	Ra (μm)	Tuổi bên (m)	Ra (μm)
30	374.3	1.489	380.3	1.549
31	373.2	1.493	376.2	1.533
32	372.1	1.498	381.1	1.548
33	371.0	1.503	374.0	1.523
34	369.9	1.507	365.9	1.437
35	368.7	1.512	372.7	1.552
36	367.5	1.516	361.5	1.596
37	366.3	1.521	369.3	1.461
38	365.0	1.525	359.0	1.465
39	363.7	1.529	356.7	1.529
40	362.5	1.533	367.5	1.623
41	361.1	1.537	364.1	1.517
42	359.8	1.541	357.8	1.601
43	358.5	1.544	351.5	1.594
44	357.1	1.548	360.1	1.468
45	355.7	1.552	352.7	1.532
46	354.3	1.555	346.3	1.505
47	352.9	1.559	357.9	1.489
48	351.5	1.562	352.5	1.492
49	350.1	1.565	340.1	1.525
50	348.6	1.568	358.6	1.568
51	347.2	1.571	349.2	1.481
52	345.7	1.574	346.7	1.494
53	344.2	1.577	336.2	1.647
54	342.8	1.580	345.8	1.680
55	341.3	1.583	351.3	1.683
56	339.8	1.586	344.8	1.566
57	338.3	1.588	347.3	1.668
58	336.8	1.591	342.8	1.591
59	335.3	1.593	334.3	1.533
60	333.8	1.596	324.8	1.566