

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

PHẠM MINH ĐỨC

**TỐI ƯU HÓA CÁC THÔNG SỐ GIA CÔNG TIỆN SỬ
DỤNG MẢNH HỢP KIM TIÊU CHUẨN**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ
NGÀNH: KỸ THUẬT CƠ KHÍ**

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 12/2024

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

PHẠM MINH ĐỨC

**TỐI ƯU HÓA CÁC THÔNG SỐ GIA CÔNG TIỆN SỬ
DỤNG MẢNH HỢP KIM TIÊU CHUẨN
NGÀNH: KỸ THUẬT CƠ KHÍ - 9520103**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS.TS. LÊ HIẾU GIANG

Người hướng dẫn khoa học 2: TS. MAI ĐỨC ĐÃI

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 12/2024

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

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

Số: 2699/QĐ-ĐHSPKT

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 31 tháng 8 năm 2022

QUYẾT ĐỊNH

Về việc thay đổi người hướng dẫn luận án tiến sĩ

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

Căn cứ Luật Giáo dục đại học ngày 18/6/2012 và Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Giáo dục đại học ngày 19/11/2018;

Căn cứ Nghị định 99/2019/NĐ-CP ngày 30/12/2019 của Chính phủ Quy định chi tiết và hướng dẫn thi hành một số điều của Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật giáo dục đại học;

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

Căn cứ Nghị quyết số 11/NQ-HĐT ngày 08/01/2021 của Hội đồng trường ban hành Quy chế tổ chức và hoạt động của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Căn cứ Nghị quyết số 98/NQ-HĐT ngày 15 tháng 6 năm 2022 của Hội đồng trường về công tác cán bộ lãnh đạo trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh;

Căn cứ Thông tư số 10/2009/TT-BGDĐT ngày 07/5/2009 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc Ban hành Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ;

Căn cứ Thông tư số 05/2012/TT-BGDĐT ngày 15/02/2012 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc sửa đổi, bổ sung một số điều của Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ ban hành kèm theo Thông tư số 10/2009/TT-BGDĐT ngày 07/5/2009 của Bộ Giáo dục và Đào tạo;

Theo đề nghị của của nghiên cứu sinh, Khoa quản ngành và Trường phòng Đào tạo.

QUYẾT ĐỊNH:

Điều 1. Đồng ý thay đổi người hướng dẫn thứ nhất cho:

Nghiên cứu sinh : **Phạm Minh Đức**

Ngành : Kỹ thuật cơ khí

Khoá: 2017 – 2020

Tên luận án : **Tối ưu hóa các thông số gia công tiện sử dụng mảnh hợp kim tiêu chuẩn**

Người HD thứ nhất (HD chính): **PGS.TS Lê Hiếu Giang**

Người HD thứ hai : **PGS.TS. Mai Đức Dãi**

Thời gian thực hiện : **17/5/2017 đến 17/5/2020**

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

Điều 3. Trường các đơn vị: phòng Đào tạo, khoa quản ngành, phòng KHTC và các Ông (Bà) có tên ở Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành quyết định này. //

Nơi nhận:

- BGH (để chỉ đạo);
- Như điều 3;
- Lưu: VT, ĐT (3b).



KT. HIỆU TRƯỞNG
PHÓ HIỆU TRƯỞNG

PGS. TS Lê Hiếu Giang

LỜI CAM ĐOAN

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

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

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 25 tháng 12 năm 2024

(Ký tên và ghi rõ họ tên)

Phạm Minh Đức

LỜI CẢM ƠN

Trước hết, tôi muốn gửi lời tri ân sâu sắc đến PGS.TS. Lê Hiếu Giang và TS. Mai Đức Dãi, người đã dành thời gian quý báu để hướng dẫn và cung cấp những gợi ý nghiên cứu mang tính xác thực cho luận án này. Sự chỉ dẫn cụ thể và ý kiến phản biện của các Thầy không chỉ giúp tôi hoàn thành công việc mà còn là nguồn động viên lớn lao. Tôi muốn bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến tất cả các Thầy Cô ở Khoa Cơ Khí Chế Tạo Máy, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh, vì đã chia sẻ những kiến thức quý báu và hỗ trợ tôi trong suốt quá trình nghiên cứu.

Tôi cũng muốn gửi lời cảm ơn đến các Thầy Cô trong các Hội đồng đánh giá các chuyên đề Tiến sĩ, những ý kiến phản biện và góp ý của các Thầy đã giúp tôi cải thiện và hoàn thiện luận án của mình.

Cuối cùng, tôi muốn bày tỏ lòng biết ơn đến gia đình và người thân, những người đã luôn ở bên cạnh và chia sẻ mọi khó khăn trong suốt quá trình học tập và nghiên cứu.

Phạm Minh Đức

TÓM TẮT

Tiện cứng là một kỹ thuật đang phát triển để gia công tinh các chi tiết có độ cứng từ 45 HRC trở lên, nhằm thay thế cho quá trình mài. So với phương pháp mài truyền thống, tiện cứng có một số ưu điểm như linh hoạt hơn, năng suất cao hơn, chi phí thấp hơn và thân thiện với môi trường hơn. Tuy nhiên, thách thức lớn nhất của tiện cứng là đảm bảo chất lượng bề mặt chi tiết gia công (độ nhám bề mặt) và giảm thiểu sự mài mòn của dụng cụ cắt. Vì tiện cứng khác biệt đáng kể so với tiện truyền thống nên nhiều kiến thức và lý thuyết của tiện truyền thống không thể áp dụng trực tiếp cho phương pháp này.

Để tối ưu hóa quá trình tiện cứng, việc lựa chọn dụng cụ cắt (thông số hình học và vật liệu dụng cụ cắt) và chế độ cắt (tốc độ cắt, bước tiến dao và chiều sâu cắt) phải phù hợp. Mục tiêu chính của nghiên cứu này là phân tích ảnh hưởng đồng thời của các thông số hình học góc dao (góc nghiêng, góc trước và góc nâng dao) đến độ nhám bề mặt, độ mòn dao, lực cắt và tối ưu hóa các thông số này trong quá trình tiện cứng sử dụng mảnh dao tiêu chuẩn.

Quá trình thực nghiệm tiện cứng được thực hiện trên thép AISI 1055 (52HRC) bằng dao hợp kim gốm phủ TiN. Kết quả cho thấy góc nâng dao là yếu tố chính ảnh hưởng đến độ mòn dao, độ nhám bề mặt và lực cắt trong tiện cứng. Khi tăng góc nâng dao và góc trước theo hướng âm, độ mòn của dụng cụ cắt giảm nhưng độ nhám bề mặt tăng lên. Tuy nhiên, độ nhám bề mặt sẽ giảm khi góc nâng dao tiếp tục tăng qua một giới hạn nhất định. Đây là phát hiện mới và có ý nghĩa quan trọng trong nghiên cứu tiện cứng.

Dựa trên kết quả nghiên cứu, nên áp dụng góc nâng dao âm lớn ($\lambda_s = -10^\circ$) để đồng thời giảm độ nhám bề mặt và độ mòn dao. Với các góc dao cắt tối ưu được xác định, quá trình tiện cứng được cải thiện đáng kể, với mức giảm độ nhám bề mặt và độ mòn dao lần lượt là 8.3% và 41.3% so với các góc dao tiêu chuẩn.

Phương pháp thiết kế hệ thống đồ gá được đề xuất cung cấp một giải pháp hiệu quả để thay đổi thông số hình học góc dao khi sử dụng các mảnh dao tiêu chuẩn, nhằm cải thiện quá trình tiện các vật liệu cứng hoặc khó gia công khác.

Các mô hình toán học về độ nhám bề mặt, độ mòn dao và lực cắt đã được xây dựng. Mô hình toán hình học quá trình tiện cứng mới được đề xuất có thể được áp dụng cùng với các công thức và mô hình toán học khác để tính toán lực cắt, nhiệt cắt và độ mòn dao cục bộ cho từng phần tử cạnh cắt và cho toàn bộ quá trình. Mô hình toán học này cũng có thể được sử dụng cho các nghiên cứu tiện các vật liệu khó gia công khác.

ABSTRACT

Hard turning is an emerging technology for machining parts with high hardness (45 HRC and above). It offers several advantages over conventional grinding for finishing hard materials, including greater flexibility, higher productivity, lower cost, and more environmentally friendly production. However, significant challenges in hard turning involve achieving high-quality machined surfaces (low surface roughness) and minimizing cutting tool wear. Hard turning differs significantly from conventional turning, and much of the theoretical knowledge for conventional turning cannot be directly applied to hard turning. Therefore, to optimize the hard turning process, it is critical to appropriately select cutting tools (tool material and geometry) and cutting conditions (cutting speed, feed rate, depth of cut).

The primary objective of this study is to investigate the influence of the cutting tool geometric parameters (cutting edge angle, rake angle, and inclination angle) on surface roughness, tool wear, and cutting forces, as well as to optimize tool geometry for the hard turning process. Experimental hard turning tests were conducted on AISI 1055 steel (52 HRC) using TiN-coated ceramic cutting tools. The results indicate that the inclination angle is the major factor affecting tool wear, surface roughness, and cutting forces in hard turning. Making the rake and inclination angles more negative decreases tool wear but increases surface roughness. However, beyond a certain negative inclination angle, surface roughness begins to decrease. This finding is novel and significant in hard turning research.

Based on the research findings, a large negative inclination angle ($\lambda_s = -10^\circ$) is recommended to simultaneously reduce surface roughness and tool wear. Using the optimal cutting tool angles identified in this research, the hard turning process was markedly improved, with reductions in surface roughness and tool wear of 8.3% and 41.3%, respectively, compared to using standard tool angles. Mathematical models for surface roughness, tool wear, and cutting forces were also developed. Additionally, a new tool-post fixture design approach is proposed, providing an

effective method to adjust tool angles (using standard inserts) to improve the hard turning process. The new geometrical model for hard turning can be combined with other formulas to calculate local cutting forces, cutting temperatures, and tool wear for each cutting-edge element and for the overall process. It can also be applied to study the turning of other difficult-to-machine materials.

MỤC LỤC

Lời cam đoan	iii
Mục lục	vi
Danh sách các chữ viết tắt và ký hiệu	viii
Danh sách các hình	ix
Danh sách các bảng	x
CHƯƠNG 1: GIỚI THIỆU CHUNG	1
1.1 Lý do chọn đề tài	1
1.2 Mục tiêu nghiên cứu	2
1.3 Nhiệm vụ nghiên cứu	2
1.4 Phạm vi nghiên cứu	3
1.5 Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu	3
1.6 Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài	3
1.7 Cấu trúc luận án	4
CHƯƠNG 2: TỔNG QUAN CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU VỀ TIỆN CỨNG	6
2.1 Giới thiệu chung	6
2.2 Ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt khi tiện cứng	7
2.3 Ảnh hưởng của thông số hình học dao cắt khi tiện cứng	11
2.4 Độ nhám bề mặt khi tiện cứng	16
2.5 Mài mòn dao cắt khi tiện cứng	17
2.6 Mô hình toán và tối ưu quá trình tiện cứng	18
2.7 Kết luận	21
CHƯƠNG 3: CƠ SỞ LÝ THUYẾT QUÁ TRÌNH TIỆN CỨNG	25
3.1 Khái niệm về tiện cứng	25
3.2 Ưu điểm và nhược điểm của tiện cứng	27
3.2.1 Ưu điểm của tiện cứng	27
3.2.2 Nhược điểm của tiện cứng	28
3.3 Vật liệu chi tiết và ứng dụng trong tiện cứng	28

3.4	Dụng cụ cắt khi tiện cứng	29
3.4.1	Các loại vật liệu dụng cụ cắt cho tiện cứng	29
3.4.2	Hình học dao cắt cho tiện cứng	32
3.5	Các thông số công nghệ (chế độ cắt) trong tiện cứng	34
3.6	Các chỉ tiêu kinh tế-kỹ thuật trong tiện cứng	34
3.6.1	Năng suất gia công (Material Removal Rate-MRR)	34
3.6.2	Chi phí sản xuất trong tiện cứng	35
3.6.3	Độ nhám bề mặt (Ra)	35
3.7	Cơ chế hình thành phoi khi tiện cứng	37
3.8	Lực cắt trong tiện cứng	39
3.9	Nhiệt cắt khi tiện cứng	42
3.10	Mài mòn dao và cơ chế mài mòn trong tiện cứng	44
3.11	Tuổi thọ dao trong tiện cứng	49
3.12	Kết luận	51
	CHƯƠNG 4: MÔ HÌNH TOÁN HÌNH HỌC QUÁ TRÌNH TIỆN CỨNG	52
4.1	Giới thiệu chung	52
4.2	Mô hình toán hình học quá trình tiện cứng	53
4.2.1	Mô hình toán hình học dao	54
4.2.2	Mô hình toán diện tích cắt	56
4.3	So sánh mô hình toán và quá trình cắt thực	62
4.4	Kết luận	64
	CHƯƠNG 5: QUÁ TRÌNH THỰC NGHIỆM TIỆN CỨNG	65
5.1	Giới thiệu chung	65
5.2	Thiết bị - dụng cụ - thông số thí nghiệm	65
5.2.1	Thiết bị thí nghiệm	65
5.2.2	Dụng cụ cắt	66
5.2.3	Mẫu thí nghiệm	68
5.2.4	Thông số thí nghiệm	69
5.2.5	Thông số chế độ cắt	69

5.3	Thiết kế - chế tạo hệ thống đồ gá thay đổi góc dao	70
5.4	Phân tích lựa chọn phương pháp quy hoạch thực nghiệm	72
5.5	Quá trình thực nghiệm	74
5.5.1	Đo lực cắt	75
5.5.2	Đo độ nhám bề mặt (Ra)	78
5.5.3	Đo độ mòn dao (VB)	80
5.6	Kết luận	83
CHƯƠNG 6: PHÂN TÍCH KẾT QUẢ VÀ TỐI ƯU QUÁ TRÌNH TIỆN CỨNG		84
6.1	Phân tích mô hình toán hình học quá trình tiện cứng	84
6.2	Phân tích kết quả thực nghiệm quá trình tiện cứng	88
6.2.1	Phân tích và mô hình toán độ nhám bề mặt	88
6.2.2	Phân tích và mô hình toán độ mòn dao	92
6.2.3	Phân tích và mô hình toán lực cắt	94
6.3	So sánh kết quả thực nghiệm và phương trình hồi qui.	97
6.4	Tối ưu hóa quá trình tiện cứng	98
6.4.1	Giới thiệu phương pháp tối ưu	98
6.4.2	Phát biểu bài toán tối ưu	99
6.4.3	So sánh góc dao tối ưu và góc dao tiêu chuẩn	104
6.5	Kết luận	104
CHƯƠNG 7: KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ		105
7.1	Kết luận	105
7.2	Hướng phát triển	106
DANH MỤC CÁC BÀI BÁO ĐÃ CÔNG BỐ		107
TÀI LIỆU THAM KHẢO		108
PHỤ LỤC		1222

DANH SÁCH CHỮ VIẾT TẮT VÀ KÝ HIỆU

Kí hiệu	Mô tả	
	Tiếng Việt	Tiếng Anh
P_r	Mặt phẳng đáy	Reference plane
P_o	Mặt phẳng trục giao	Orthogonal plane
P_c	Mặt trước dao	Rake plane
P_s	Mặt phẳng cạnh cắt	Cutting-edge plane
j	Phần tử cạnh cắt (j)	Cutting-edge element (j)
θ^j	Góc xác định vị trí phần tử cạnh cắt (j)	
P_o^j	Mặt phẳng trục giao của phần tử cạnh cắt (j)	Orthogonal planes of cutting-edge element (j)
P_s^j	Mặt phẳng cạnh cắt của phần tử (j)	Cutting-edge plane of cutting-edge element (j)
P_{s1}^j	Mặt phẳng song song P_s^j	
P_{s-s}^j	Mặt phẳng song song P_s	
P_{o-o}^j	Mặt phẳng song song P_o	
$t(\theta^j)$	Chiều dày lớp cắt của phần tử (j)	
dA^j	Diện tích lớp cắt của phần tử (j)	
r	Bán kính mũi dao	Tool-nose radius
Ra	Độ nhám bề mặt (Ra)	Surface roughness (Ra)
Rz	Độ nhám bề mặt (Rz)	Surface roughness (Rz)
VB	Chiều rộng mòn dao mặt sau trung bình	Average flank wear land
f	Lượng chạy dao	Feed
d_w	Chiều sâu cắt	Depth of cut
$v; v_c$	Vận tốc cắt	Cutting speed
γ_o	Góc trước dao	Rake angle
λ_s	Góc nâng dao	Inclination angle
α_o	Góc sau dao	Clearance angle

K_r	Góc nghiêng dao	Cutting- edge angle
F_x	Lực phương x	Direction x cutting force
F_y	Lực phương y	Direction y cutting force
F_z	Lực phương z	Direction z cutting force
F	Lực cắt tổng	Total cutting force
F_t	Lực tiếp tuyến	Tangential force
F_f	Lực tiến dao	Feed force
F_r	Lực hướng kính	Thrust force
dF_t	Lực tiếp tuyến của phần tử cạnh cắt (j)	Tangential force of element (j)
dF_f	Lực tiến dao của phần tử cạnh cắt (j)	Feed force of element (j)
dF_r	Lực hướng kính của phần tử cạnh cắt (j)	Thrust force of element (j)
τ_s	Ứng suất cắt tiếp tuyến	Shear stress in the shear plane
σ	Ứng suất cắt pháp tuyến	Normal shear stress
η	Góc thoát phoi	Chip flow angle
β_n	Góc ma sát pháp tuyến	Normal friction angle
γ_n	Góc trước pháp tuyến	Normal rake angle
ϕ_n	Góc cắt pháp tuyến	Normal shear angle
Φ	Góc cắt	Shear angle
$K_{tc},$	Hệ số lực cắt tiếp tuyến	Tangential cutting force coefficients
$K_{fc},$	Hệ số lực cắt tiến dao	Feed cutting force coefficients
K_{rc}	Hệ số lực cắt hướng kính	Thrust cutting force coefficients
$K_{te},$	Hệ số lực cắt cạnh tiếp tuyến	Tangential edge force coefficients
$K_{fe},$	Hệ số lực cắt cạnh tiến dao	Feed edge force coefficients
K_{re}	Hệ số lực cạnh hướng kính	Thrust edge force coefficients
$K_{abrasion}$	Hệ số mòn cơ học	Abrasive wear coefficient
$K_{adhesion}$	Hệ số mòn bám dính	Adhesive wear coefficient
K_{diff}	Hệ số mòn khuếch tán	Diffusive wear coefficient

h_f	Chiều rộng mòn dao mặt sau	Flank wear land
K	Hằng số phụ thuộc vào tỷ lệ độ cứng của dụng cụ cắt và hạt mài	Constant that depends on the ratio of the tool and abrasive hardness
K_2	Hằng số	Constant
K_3	Hằng số mòn bám dính	Adhesive wear constant
K_4	Hằng số mòn khuếch tán	Diffusion wear constant
P_a	Độ cứng hạt mài	Hardness of the abrasive particle
P_t	Độ cứng dao	Tool hardness
n	Hằng số không thứ nguyên	Dimensionless constant
N	Lực pháp tuyến	Normal load
m_1	Hằng số phụ thuộc vào hình dạng hạt mài	Constant depending upon particle shape
T	Nhiệt độ trung bình	Average temperature
T_f	Nhiệt độ mặt sau dao	Tool flank temperature
b	Chiều rộng cắt	Width of cut
Q	Năng lượng kích hoạt để khuếch tán	Activation energy for diffusion
KT	Chiều sâu mòn mặt trước	Tool crater wear depth
R	Bán kính cung mòn mặt trước	Radius of the tool crater arc
RSM	Phương pháp bề mặt đáp ứng	Respond surface method
ANN	Phương pháp mạng neural	Artificial Neural Networks
CCD	Quy hoạch hỗn hợp đối xứng	Central composite design
FFD	Quy hoạch nhân tố toàn phần	Full factorial design
DFA	Hàm mục tiêu	Desirability Function Approach
DF	Bậc tự do	The total degrees of freedom
Seq SS	Tổng bình phương	Sequential sums of squares

Adj SS	Hiệu chỉnh tổng bình phương	Adjusted sums of squares
Adj MS	Hiệu chỉnh bình phương trung bình	Adjusted mean squares
F-Value	Giá trị F	F-value
P-Value	Giá trị P	P-value

DANH SÁCH CÁC BẢNG

Bảng 2.1	Các phương pháp mô hình hóa và tối ưu trong nghiên cứu tiện cứng	20
Bảng 2.2	Tổng quan các nghiên cứu về tiện cứng	22
Bảng 3.1	So sánh tiện cứng và mài	27
Bảng 3.2	Các ứng dụng trong công nghiệp của tiện cứng [71]	29
Bảng 4.1	Phân tử cạnh cắt bán kính mũi dao tham gia cắt gọt từ θA đến θD	62
Bảng 4.2	Thông số hình học dao và chiều dày lớp cắt cục bộ của phân tử cạnh cắt (j) ($\theta A=42.59^\circ$)	63
Bảng 5.1	Thông số mảnh dao TNGA160404S01525 6050 [106]	66
Bảng 5.2	Thông số cán dao PTGNR 1616H 16 [106]	67
Bảng 5.3	Thành phần hóa học của thép AISI 1055 (thép C55 theo TCVN) [107] ..	69
Bảng 5.4	Thuộc tính vật lý, cơ học thép AISI 1055 [107]	69
Bảng 5.5	Thông số chế độ cắt được cố định trong thí nghiệm	70
Bảng 5.6	Thiết kế thí nghiệm dựa trên CCD	74
Bảng 5.7	Ma trận mã hóa thông số thí nghiệm	74
Bảng 5.8	Chuỗi thiết bị được sử dụng khi đo lực [111]	76
Bảng 5.9	Kết quả đo lực dựa trên thiết kế thí nghiệm CCD	77
Bảng 5.10	Kết quả thí nghiệm độ nhám bề mặt dựa trên thiết kế CCD	80
Bảng 5.11	Kết quả thí nghiệm đo độ mòn dao dựa trên thiết kế CCD	82
Bảng 6.1	Góc trước trung bình của các phân tử bán kính mũi dao tham gia cắt dựa trên thiết kế thí nghiệm CCD	85
Bảng 6.2	Phân tích ANOVA cho góc trước trung bình (γ_{ave})	86
Bảng 6.3	Các kết quả thực nghiệm dựa trên thiết kế thí nghiệm CCD	88
Bảng 6.4	Phân tích ANOVA cho độ nhám bề mặt (Ra)	89
Bảng 6.5	Phân tích ANOVA cho độ mòn dao (VB)	92
Bảng 6.6	Phân tích ANOVA cho lực cắt (F)	95
Bảng 6.7	Kết quả tối ưu cho độ nhám bề mặt	101
Bảng 6.8	Kết quả tối ưu cho độ nhám bề mặt và độ mòn dao	102
Bảng 6.9	Kết quả tối ưu cho độ nhám bề mặt và độ mòn dao	103

Bảng 6.10 So sánh kết quả thực nghiệm giữa góc dao tiêu chuẩn và góc dao tối ưu	104
--	-----

DANH SÁCH CÁC HÌNH

Hình 2.1 Tổng quan nghiên cứu về tiện cứng	6
Hình 2.2 Đồ thị biến thiên các thành phần lực cắt theo chiều dài cắt khi tiện thép [8]: (a) Thép 9XC; (b) Thép X12M	8
Hình 2.3 Mòn mặt sau dao PCBN khi tiện cứng thép 9XC với chiều dài cắt l [8]: ...	8
Hình 2.4 Các kết quả tuổi thọ dao khi tiện cứng thép AISI 52100 [9].....	10
Hình 2.5 Tối ưu hóa độ nhám bề mặt [25]	13
Hình 2.6 Tổng quan các bước nghiên cứu.....	19
Hình 2.7 So sánh kết quả thí nghiệm và dự đoán từ mô hình toán	20
Hình 2.8 Ảnh hưởng của thông số công nghệ trong tiện cứng.....	23
Hình 3.1 Sơ đồ nguyên lý tiện và thông số hình học dao.....	25
Hình 3.2 Sơ đồ so sánh qui trình tiện truyền thống và tiện cứng.....	26
Hình 3.3 Các loại mảnh dao cắt gồm phổ biến trong tiện cứng [74]	31
Hình 3.4 Các thông số hình học dao trong tiện cứng	32
Hình 3.5 Sự ảnh hưởng của hình học dao trong tiện cứng.....	33
Hình 3.6 Các kiểu hình dạng của cạnh cắt trong tiện cứng [74]	33
Hình 3.7 Ảnh hưởng của thông số gia công và dụng cụ cắt đến chất lượng của bề mặt gia công trong tiện cứng.....	36
Hình 3.8 Độ nhám bề mặt Ra	36
Hình 3.9 Quá trình tạo phoi [79]	37
Hình 3.10 Các dạng phoi trong gia công tiện [80]	37
Hình 3.11 Sự hình thành phoi răng cưa [82]	38
Hình 3.12 Sự thay đổi hình dáng phoi với độ cứng chi tiết gia công [83]	39
Hình 3.13 Ảnh hưởng của độ cứng đến lực cắt [85]	40
Hình 3.14 Sơ đồ nguyên lý lực cắt trong tiện cứng.....	41
Hình 3.15 Quá trình sinh nhiệt và thoát nhiệt trong tiện.....	43

Hình 3.16 Ảnh hưởng của độ cứng, vận tốc cắt và mòn dao đến nhiệt cắt: (a) Ảnh hưởng vật liệu gia công và tốc độ cắt đến nhiệt cắt [94]; (b) Ảnh hưởng của mòn dao đến nhiệt cắt thép AISI 52100 [95]	44
Hình 3.17 Các dạng mòn dao theo tiêu chuẩn ISO 3685	45
Hình 3.18 Các dạng mòn dao trong tiện cứng [98]	46
Hình 3.19 Độ mòn dao mặt sau với thời gian [100].....	47
Hình 3.20 Biên dạng vết lõm mặt trước dao CBN [101]	48
Hình 3.21 Mối quan hệ hình học của vết lõm mặt trước dao [101]	48
Hình 3.22 Đường cong tuổi thọ dao: sự thay đổi mòn dao theo thời gian với các vận tốc cắt khác nhau [46].	50
Hình 4.1 Sơ đồ nguyên lý gia công tiện [103]:	52
Hình 4.2 Mô hình bán kính mũi dao tham gia cắt gọt trong tiện cứng	53
Hình 4.3. Mô hình mối quan hệ giữa các góc dao của cạnh cắt chính và phần tử cạnh cắt (j) (Hiệu chỉnh và cải tiến từ mô hình của Astakhov [103])	55
Hình 4.4 Chiều dày lớp cắt cục bộ của phần tử cạnh cắt (j).....	58
Hình 4.5 Mối quan hệ giữa các hệ tọa độ:.....	60
Hình 4.6 Quá trình cắt thực trong tiện cứng với $K_r = 84^\circ$, $\gamma_o = -6.03^\circ$, $\lambda_s = -6^\circ$, $r = 0.8$ mm, $d_w = 0.2$ mm và $f = 0.08$ mm/vòng: (a) Thông số hình học dao; (b) Độ dày lớp cắt cục bộ của phần tử cạnh cắt (j)	64
Hình 5.1 Máy tiện CNC BOEHRINGER DUS-400ti	65
Hình 5.2 Mảnh dao cắt TNGA160404S01525 6050 [106]	66
Hình 5.3 Cán dao PTGNR 1616H 16 [106]	67
Hình 5.4 Mẫu thí nghiệm.....	68
Hình 5.5 Kích thước mẫu thí nghiệm	68
Hình 5.6 Quá trình thiết kế hệ thống đồ gá thay đổi góc dao.....	71
Hình 5.7 Quá trình gia công hệ thống đồ gá thay đổi góc dao.....	71
Hình 5.8 Minh họa thiết kế thí nghiệm phối hợp có tâm ba yếu tố [110]	73
Hình 5.9 Sơ đồ thực nghiệm.....	75
Hình 5.10 Cảm biến đo lực Kistler Type 9257B [111]	76

Hình 5.11	Kích thước lắp ráp cảm biến đo lực trong quá trình tiện [111].....	76
Hình 5.12	Đo lực cắt trong tiện cứng	77
Hình 5.13	Hệ thống đo độ nhám bề mặt MITUTOYO SJ-210 178-390 [112]	78
Hình 5.14	Ca-líp thiết bị đo độ nhám	79
Hình 5.15	Đo độ nhám bề mặt mẫu thí nghiệm	79
Hình 5.16	Kính hiển vi Oxion Inverso materials science [113].....	81
Hình 5.17	Quá trình đo mòn dao	81
Hình 5.18	Mòn mặt sau trong thí nghiệm số 17: $\gamma_o = -6^\circ$, $\lambda_s = -6^\circ$ và $K_r = 75^\circ$	82
Hình 6.1	Phân tích quá trình tiện cứng cho thí nghiệm số 10:	85
Hình 6.2	Ảnh hưởng của các nhân tố đầu vào đến góc trước trung bình (γ_{ave}).....	87
Hình 6.3	Ảnh hưởng của các nhân tố đầu vào đến độ nhám bề mặt (Ra):.....	91
Hình 6.4	Bề mặt đáp ứng của độ nhám bề mặt theo góc nghiêng và góc nâng dao.....	91
Hình 6.5	Ảnh hưởng chính của các nhân tố đầu vào đến độ mòn dao mặt sau (VB)	93
Hình 6.6	Bề mặt đáp ứng của độ mòn dao theo góc trước và góc nâng dao.....	93
Hình 6.7	Ảnh hưởng của các nhân tố đầu vào đến lực cắt (F):.....	96
Hình 6.8	Bề mặt đáp ứng của lực cắt theo góc trước và góc nâng dao	97
Hình 6.9	So sánh kết quả thí nghiệm và dự đoán từ phương trình hồi qui:	98
Hình 6.10	Tối ưu hóa độ nhám bề mặt (Ra).....	100
Hình 6.11	Tối ưu hóa đồng thời độ nhám bề mặt và độ mòn dao.....	102
Hình 6.12	Tối ưu hóa đồng thời độ nhám bề mặt và độ mòn dao.....	103

Chương 1: GIỚI THIỆU CHUNG

1.1 Lý do chọn đề tài

Ngày nay, với sự phát triển nhanh chóng của kỹ thuật và công nghệ trong ngành công nghiệp chế tạo, các nhà sản xuất liên tục cải tiến và áp dụng các công nghệ mới vào quá trình sản xuất để giảm chi phí, nâng cao năng suất và chất lượng của sản phẩm gia công. Tiện cứng, một phương pháp gia công mới, đã được ứng dụng để gia công các vật liệu có độ cứng từ 45-70 HRC, thay thế nguyên công mài truyền thống. Nhờ những tiến bộ về máy công cụ, vật liệu dao và hình học dao nâng cao, tiện cứng đã trở thành một giải pháp thay thế lý tưởng để gia công hoàn thiện các chi tiết bằng thép cứng.

Độ nhám bề mặt là một thông số quan trọng ảnh hưởng lớn đến tính năng làm việc của chi tiết. Do đó, việc đạt được độ nhám bề mặt tối ưu là một trong những yêu cầu hàng đầu. Bên cạnh đó, các yếu tố khác như chi phí, thời gian sản xuất và tính linh hoạt của quy trình cũng đóng vai trò quan trọng trong gia công hiện đại.

Quá trình tiện cứng có nhiều ưu điểm hơn so với phương pháp mài truyền thống để gia công tinh các vật liệu cứng như linh hoạt hơn (dễ dàng gia công các biên dạng phức tạp, chuyển đổi nhanh các dạng gia công và có thể thực hiện nhiều hoạt động cắt gọt khác nhau trong một lần gá đặt), năng suất cao hơn (tốc độ bóc tách vật liệu cao hơn), chi phí thấp hơn (có thể sử dụng cùng máy tiện cho tiện truyền thống và tiện cứng, chi phí đầu tư máy móc thấp) và sản xuất thân thiện môi trường hơn (phoi sẽ được tái chế và loại bỏ dung dịch trơn nguội trong hầu hết các trường hợp tiện cứng). Tuy nhiên, thách thức lớn nhất của tiện cứng là nâng cao chất lượng bề mặt chi tiết gia công (độ nhám bề mặt) và giảm thiểu mòn dụng cụ cắt. Do sự khác biệt đáng kể giữa tiện cứng và tiện truyền thống, nhiều kiến thức và lý thuyết của tiện truyền thống không thể áp dụng trực tiếp cho tiện cứng [1]. Vì vậy, nghiên cứu về tiện cứng vẫn đang được đẩy mạnh và tiếp tục phát triển.

1.2 Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu nghiên cứu của đề tài là phân tích ảnh hưởng của các thông số hình học góc dao đến độ nhám bề mặt, độ mòn dao, lực cắt và tối ưu hóa các thông số góc dao cho quá trình tiện cứng sử dụng mảnh dao tiêu chuẩn. Các mục tiêu cụ thể bao gồm:

- Xây dựng mô hình toán hình học quá trình tiện cứng.
- Xây dựng phương pháp thay đổi thông số hình học góc dao cho các mảnh dao tiêu chuẩn để tối ưu hóa cho quá trình tiện cứng.
- Nghiên cứu thực nghiệm để đánh giá ảnh hưởng đồng thời các thông số hình học góc dao: góc nghiêng, góc trước và góc nâng dao đến độ nhám bề mặt, độ mòn dao và lực cắt trong quá trình tiện cứng.
- Thiết lập mô hình toán mô tả mối quan hệ giữa độ nhám bề mặt (Ra), độ mòn dao (VB) và lực cắt (F) với các thông số hình học góc dao.
- Tối ưu hóa các thông số hình học góc dao cho quá trình tiện cứng.

1.3 Nhiệm vụ nghiên cứu

Để đạt được các mục tiêu trên, đề tài thực hiện các nhiệm vụ sau:

- Nghiên cứu tổng quan tài liệu và các công trình đã công bố về tiện cứng, qua đó xác định các vấn đề chính cần giải quyết.
- Nghiên cứu cơ sở lý thuyết của quá trình tiện cứng, bao gồm đặc điểm, tính chất cắt gọt, hình học dao và chế độ cắt; xây dựng mô hình toán hình học cho quá trình tiện cứng.
- Phân tích và lựa chọn phương pháp quy hoạch thực nghiệm.
- Thiết kế, chế tạo hệ thống đồ gá thay đổi góc dao và các mẫu thí nghiệm.
- Tiến hành thực nghiệm để xác định mối quan hệ giữa các thông số hình học dao với độ nhám bề mặt, độ mòn dao và lực cắt.
- Giải các bài toán tối ưu hóa một mục tiêu và đa mục tiêu cho quá trình tiện cứng.

1.4 Phạm vi nghiên cứu

Phạm vi nghiên cứu của đề tài bao gồm:

- Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số hình học góc dao, bao gồm: góc nghiêng dao, góc trước dao và góc nâng dao đến độ mòn dao, độ nhám bề mặt và lực cắt trong điều kiện chỉ có phần bán kính mũi dao tham gia quá trình cắt gọt ($d_w \leq r(1 - \cos K_r)$).
- Tối ưu hóa các thông số góc dao cho quá trình tiện cứng sử dụng mảnh dao tiêu chuẩn.

1.5 Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

a. Hướng tiếp cận:

Đề tài được thực hiện qua các bước: nghiên cứu tổng quan tài liệu về tiện cứng, nghiên cứu cơ sở lý thuyết quá trình tiện cứng, xây dựng mô hình toán hình học quá trình tiện cứng, thực nghiệm quá trình tiện cứng, phân tích kết quả và tối ưu hóa các thông số hình học góc dao cho quá trình tiện cứng.

b. Phương pháp nghiên cứu:

Để thực hiện đề tài này, tác giả sử dụng các phương pháp nghiên cứu sau:

- Phương pháp phân tích-tổng hợp tài liệu.
- Phương pháp kế thừa.
- Phương pháp mô hình toán giải tích.
- Phương pháp qui hoạch thực nghiệm nhiều yếu tố đồng thời.
- Phương pháp thực nghiệm.
- Phương pháp xử lý số liệu thực nghiệm.
- Phương pháp tối ưu hóa nhiều thông số, một mục tiêu và đa mục tiêu.

1.6 Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài

Ý nghĩa khoa học:

- Nghiên cứu đã phân tích ảnh hưởng đồng thời của các thông số hình học góc dao: góc nghiêng dao, góc trước và đặc biệt là góc nâng dao đến độ nhám bề mặt, độ mòn dao và lực cắt, những đặc tính quan trọng nhất trong quá trình tiện cứng. Qua đó, xác định được xu hướng ảnh hưởng chính cũng như ảnh hưởng tương tác của chúng đến độ nhám bề mặt, độ mòn dao và lực cắt.
- Xây dựng được các mô hình toán thực nghiệm mô tả mối quan hệ giữa độ nhám bề mặt (Ra), độ mòn dao (VB) và lực cắt (F) với các thông số hình học góc dao.
- Xác định được các thông số góc dao tối ưu cho quá trình tiện cứng, giúp giảm độ nhám bề mặt chi tiết và giảm độ mòn dao so với khi sử dụng góc dao tiêu chuẩn của nhà sản xuất.
- Phát triển một mô hình toán hình học mới cho quá trình tiện cứng, mô tả chính xác hơn bản chất quá trình cắt. Mô hình này có thể kết hợp với các công thức và mô hình khác để tính toán lực cắt, nhiệt cắt và mòn dao cho từng phần tử lưỡi cắt và cho toàn bộ quá trình; đồng thời có thể sử dụng để nghiên cứu tiện các vật liệu khó gia công khác.

Ý nghĩa thực tiễn:

- Phương pháp thiết kế hệ thống đồ gá được đề xuất cung cấp một giải pháp hiệu quả để thay đổi các thông số hình học góc dao cho các mảnh dao tiêu chuẩn nhằm tối ưu quá trình tiện các vật liệu cứng hay khó gia công khác.
- Kết quả tối ưu về thông số hình học dụng cụ cắt được đề xuất làm tăng tuổi thọ dụng cụ cắt và chất lượng bề mặt gia công.
- Các kết quả nghiên cứu trong luận án có khả năng ứng dụng vào sản xuất thực tế nhằm nâng cao hiệu quả của quá trình tiện cứng.

1.7 Cấu trúc luận án

Luận án được trình bày trong 7 chương, bao gồm:

Chương 1: Giới thiệu sự cần thiết của đề tài, mục tiêu, phương pháp và nội dung nghiên cứu.

Chương 2: Tổng quan các tài liệu, công trình nghiên cứu liên quan đến chủ đề và xác định những vấn đề chính để định hướng nội dung nghiên cứu phù hợp.

Chương 3: Giới thiệu khái quát về quá trình tiện cứng, trình bày bản chất vật lý của quá trình để làm cơ sở cho phân tích và xây dựng mô hình toán quá trình tiện cứng.

Chương 4: Xây dựng mô hình toán hình học quá trình tiện cứng để xác định thông số hình học dao và chiều dày lớp cắt cho các phần tử cạnh cắt bán kính mũi dao tham gia cắt gọt.

Chương 5: Nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng của thông số hình học góc dao đến độ nhám bề mặt, độ mòn dao và lực cắt trong quá trình tiện cứng.

Chương 6: Phân tích kết quả thực nghiệm và tối ưu hóa thông số hình học góc dao cho quá trình tiện cứng.

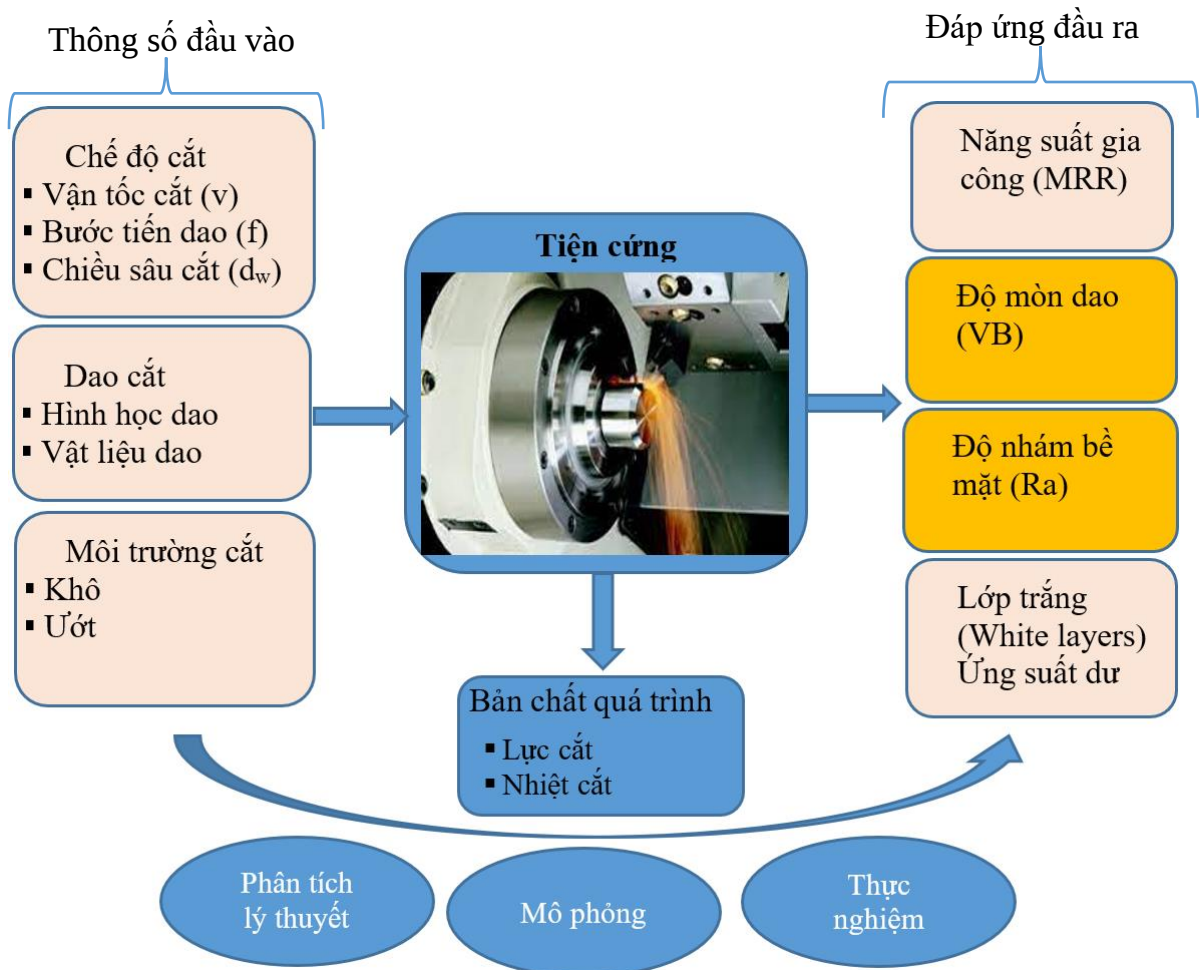
Chương 7: Tổng hợp những kết luận chính từ nghiên cứu và đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo.

Chương 2:

TỔNG QUAN CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU VỀ TIỆN CỨNG

2.1 Giới thiệu chung

Để tối ưu quá trình tiện cứng, việc chọn dụng cụ cắt (vật liệu dao và thông số hình học dao) và chế độ cắt (vận tốc cắt, bước tiến dao và chiều sâu cắt) phải phù hợp. Với mục tiêu này, nhiều nghiên cứu đã được thực hiện bằng các phương pháp số, phân tích lý thuyết và thực nghiệm nhằm phân tích, mô hình hóa và tối ưu hóa ảnh hưởng của các thông số hình học dao, vật liệu dao và chế độ cắt đến các đặc tính của quá trình tiện cứng như độ nhám bề mặt, độ mòn dao, lực cắt, nhiệt cắt và ứng suất dư. Hình 2.1 mô tả tổng quan các hướng nghiên cứu về tiện cứng.



Hình 2.1 Tổng quan các hướng nghiên cứu về tiện cứng

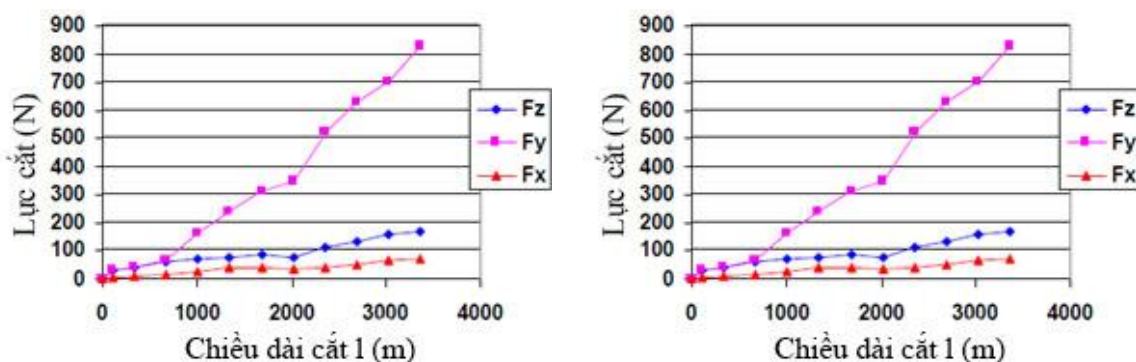
Trong số các thông số đầu ra của quá trình tiện cứng, độ nhám bề mặt và độ mòn dao là hai yếu tố quan trọng nhất để đánh giá chất lượng của quá trình gia công vì chúng phản ánh chất lượng sản phẩm và chi phí sản xuất (chi phí về dao cắt chiếm một phần đáng kể trong tổng chi phí sản xuất). Ngược lại, lực cắt trong tiện cứng thường khá nhỏ do chiều sâu cắt và bước tiến dao nhỏ kết hợp với vận tốc cắt cao, nên ít có ý nghĩa về mặt tối ưu hóa năng lượng cắt. Tuy nhiên, lực cắt và nhiệt cắt vẫn góp phần gây mòn dao và ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt gia công.

2.2 Ảnh hưởng của các thông số chế độ cắt khi tiện cứng

Việc lựa chọn các thông số công nghệ để gia công là rất quan trọng vì chúng ảnh hưởng trực tiếp đến độ mòn của dụng cụ cắt, chất lượng bề mặt, lực cắt, nhiệt cắt, v.v. Các thông số công nghệ thường được xem xét trong các nghiên cứu bao gồm tốc độ cắt, bước tiến dao và chiều sâu cắt. Nhiều nghiên cứu đã áp dụng tốc độ cắt trong khoảng từ 100 đến 250 m/phút [2], [3], [4]. Bước tiến dao trong khoảng từ 0.05 đến 0.2 mm/vòng, trong khi chiều sâu cắt không vượt quá 0.2 mm [5]. Tuy nhiên, một số nghiên cứu đã tiến hành ở phạm vi rộng hơn [6].

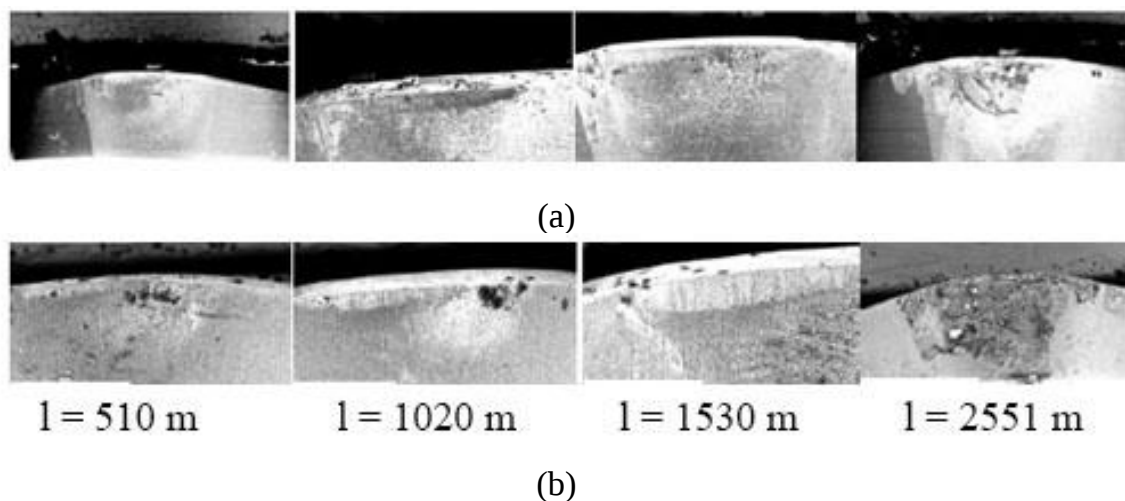
Ở trong nước, các nghiên cứu thực nghiệm chuyên sâu về tiện cứng vẫn còn hạn chế. Có thể kể đến hai nghiên cứu tiêu biểu: thứ nhất là nghiên cứu của Hoàng Việt về ảnh hưởng của thông số chế độ cắt đến độ nhám bề mặt trong gia công tiện [7]. Kết quả cho thấy trong ba thông số chế độ cắt (vận tốc cắt, lượng chạy dao, và chiều sâu cắt) thì vận tốc cắt có ảnh hưởng lớn nhất đến độ nhám bề mặt, trong khi chiều sâu cắt ảnh hưởng ít nhất.

Nghiên cứu thứ hai là của Nguyễn Thị Quốc Dung, khảo sát quá trình tiện thép hợp kim qua tôi bằng dao PCBN [8]. Các kết quả cho thấy sự khác biệt về lực cắt giữa hai loại thép 9XC và X12M, cùng có độ cứng 57 HRC, là do cấu trúc tổ chức tế vi của vật liệu. Trong cả hai trường hợp, lực hướng kính F_y là lớn nhất trong ba thành phần lực cắt (Hình 2.2), được giải thích là do hình học lưỡi cắt và đặc điểm quá trình tiện cứng. Cụ thể, bán kính mũi dao lớn ($r = 0.8$ mm) và chiều sâu cắt nhỏ ($d_w = 0.115$ mm).



Hình 2.2 Đồ thị biến thiên các thành phần lực cắt theo chiều dài cắt khi tiện thép [8]: (a) Thép 9XC; (b) Thép X12M

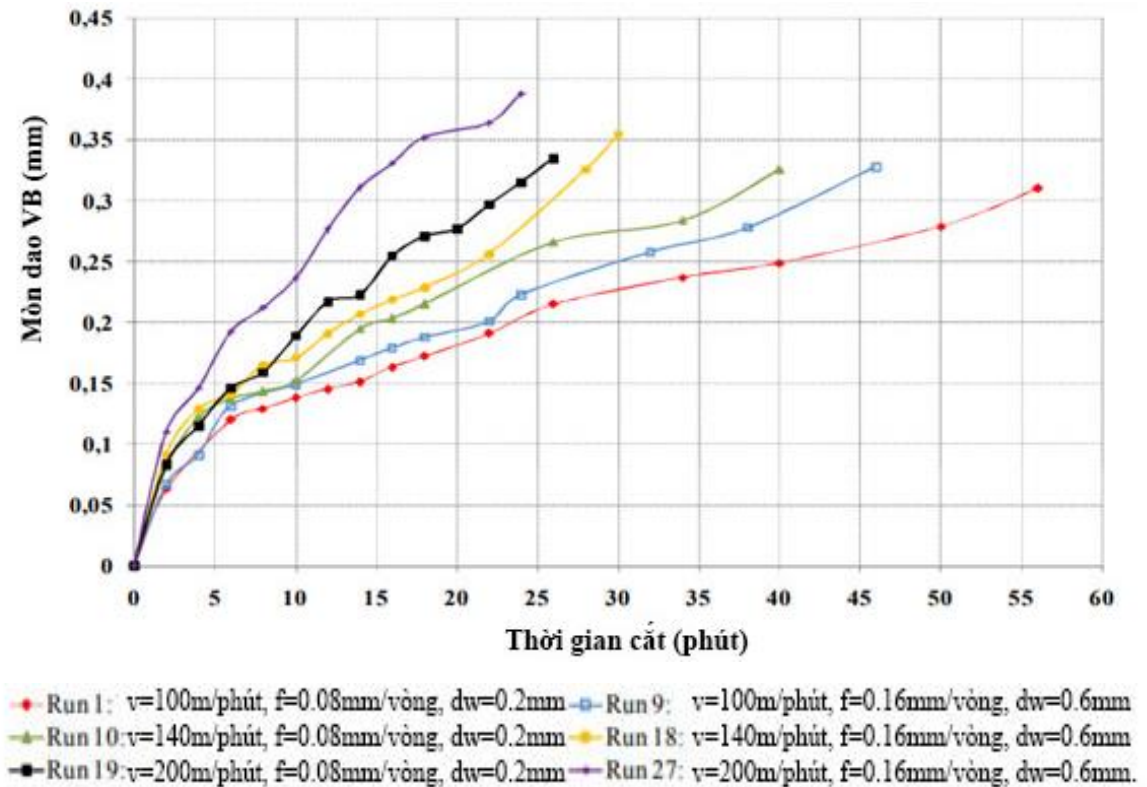
Kết quả nghiên cứu về mòn dụng cụ cắt PCBN và chất lượng bề mặt khi tiện thép hợp kim qua tôi, cho thấy tốc độ mòn mặt sau trung bình khi gia công thép 9XC và X12M lần lượt là $0.025 \mu\text{m}$ và $0.111 \mu\text{m}$ trên mỗi mét chiều dài cắt. Hình 2.3 mô tả quá trình mòn mặt sau theo chiều dài cắt. Độ nhám bề mặt gia công có giá trị nhỏ, tương đương với độ nhám cấp 7 – 8. Đáng chú ý, độ nhám bề mặt có xu hướng tăng khi độ cứng của vật liệu gia công tăng lên.



Hình 2.3 Mòn mặt sau dao PCBN khi tiện cứng thép 9XC với chiều dài cắt l [8]:
(a) Với vận tốc cắt $v = 140 \text{ m/phút}$; (b) Với vận tốc cắt $v = 180 \text{ m/phút}$

Ở ngoài nước, có nhiều nghiên cứu về thông số chế độ cắt như Khamel và cộng sự bằng nghiên cứu thực nghiệm, đã mô hình toán mối quan hệ giữa các đáp ứng đầu ra của quá trình tiện cứng thép AISI 52100 (60HRC) bằng dao CBN với các thông số

chế độ cắt gồm vận tốc cắt, bước tiến dao và chiều sâu cắt bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface Methodology-RSM) kết hợp phương pháp thiết kế thí nghiệm Taguchi [9]. Kết quả tuổi thọ dao khoảng từ 13.2 đến 54.11 phút. Độ nhám bề mặt từ 0.5 đến 1.15 μm . Các thành phần lực cắt gồm lực dọc trục F_x , lực cắt chính hay lực tiếp tuyến F_z và lực hướng kính F_y trong khoảng 50-179 N, 70-314 N và 111-403 N, tương ứng. Điều này cho thấy lực hướng kính F_y lớn hơn 1.5-2.5 lần so với lực dọc trục F_x và 1.2-2 lần so với lực cắt chính F_z . Các phân tích phương sai (Analysis of Variance - ANOVA) đã chỉ ra rằng tăng vận tốc cắt, bước tiến dao và chiều sâu cắt làm giảm tuổi thọ của dao, phù hợp với các nghiên cứu [10], [11], [12] và vận tốc cắt có ảnh hưởng nhiều nhất đến tuổi thọ dao với 89.83%, bước tiến dao là 5.69% và chiều sâu cắt chỉ 1.26% . Hình 2.4 cho thấy tuổi thọ dao ở các chế độ cắt khác nhau. Trong khi đó, bước tiến dao là nhân tố chính ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt với 64.09%, tiếp theo là vận tốc cắt với 23.99% và chiều sâu cắt rất ít, chỉ 1.35%. Lực cắt bị ảnh hưởng nhiều nhất bởi chiều sâu cắt. Khi vận tốc cắt tăng, làm giảm các thành phần lực cắt và độ nhám bề mặt do tăng nhiệt độ cắt trong vùng cắt, làm mềm hóa vật liệu chi tiết gia công, giảm chiều dày phoi và chiều dài tiếp xúc giữa phoi và mặt trước của dao. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng ảnh hưởng tương tác giữa các yếu tố chế độ cắt đến độ mòn dao và nhám bề mặt không đáng kể như trong các nghiên cứu [13], [14].



Hình 2.4 Các kết quả tuổi thọ dao khi tiện cứng thép AISI 52100 [9]

Trong nghiên cứu của Sudhansu và cộng sự, ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ nhám bề mặt, độ mòn dao, hình dạng phoi và chi phí trong quá trình tiện cứng thép AISI 4340 (49 HRC) sử dụng dụng cụ cắt cacbit phủ đa lớp CVD ($\text{TiN/TiCN/Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$) đã được khảo sát [15]. Kết quả cũng cho thấy bước tiến dao là thông số ảnh hưởng nhiều nhất đến với độ nhám bề mặt, chiếm tới 70%, tiếp theo là tốc độ cắt với 22% và độ nhám bề mặt tăng khi tăng bước tiến dao. Độ mòn của dao cho thấy ảnh hưởng lớn nhất bởi tốc độ cắt, lên đến 81.93%.

Das và cộng sự đã sử dụng phương pháp RSM để nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ cắt đến độ nhám bề mặt và độ mòn dao khi tiện cứng thép AISI 4140 steel (52HRC) bằng dao hợp kim gốm phủ PVD-TiN [16]. Kết quả nghiên cứu cũng cho thấy chiều sâu cắt có ảnh hưởng là rất nhỏ đến độ mòn dao và không có ý nghĩa về mặt thống kê với độ nhám bề mặt. Khi vận tốc cắt vượt quá 170 m/phút, độ nhám bề mặt lại tăng lên, trái ngược với các nghiên cứu trước đó [9]. Điều này được tác giả

giải thích là khi tiếp tục tăng vận tốc cắt sẽ làm tăng sự rung động của hệ thống, do đó làm tăng độ nhám bề mặt.

Laouissi và cộng sự đã so sánh độ nhám bề mặt, lực cắt tiếp tuyến, năng lượng cắt và tốc độ bóc tách vật liệu (Material Removal Rate-MRR) khi tiện gang EN-GJL-250 bằng dao hợp kim gốm phủ và không phủ [17]. Kết quả cho thấy bước tiến dao là nhân tố chính ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt, tiếp theo là tốc độ cắt và chiều sâu cắt, phù hợp với các nghiên cứu trước đó. Trong khi đó, chiều sâu cắt là nhân tố chính ảnh hưởng đến lực cắt, tiếp theo là bước tiến dao và vận tốc cắt.

Một kết quả tương tự được thấy trong nghiên cứu của Bensouilah và cộng sự, trong đó nghiên cứu tiện cứng thép AISI D3 bằng dao hợp kim gốm phủ (CC6050) và không phủ (CC650) [18]. Noordin và cộng sự đã tiến hành nghiên cứu thực nghiệm trên thép không gỉ martensitic bằng dao cacbit phủ TiAlN và xây dựng mô hình toán thực nghiệm để xác định ảnh hưởng của các thông số cắt đối với độ nhám bề mặt và tuổi thọ dao [19]. Tuổi thọ của dao tỷ lệ nghịch với cả tốc độ cắt và bước tiến, trong đó tốc độ cắt có ảnh hưởng lớn nhất đến tuổi thọ dao. Lực cắt tỷ lệ nghịch với tốc độ cắt và tỷ lệ thuận với bước tiến. Độ nhám bề mặt bị ảnh hưởng nhiều nhất bởi bước tiến dao và tỷ lệ nghịch với tốc độ cắt.

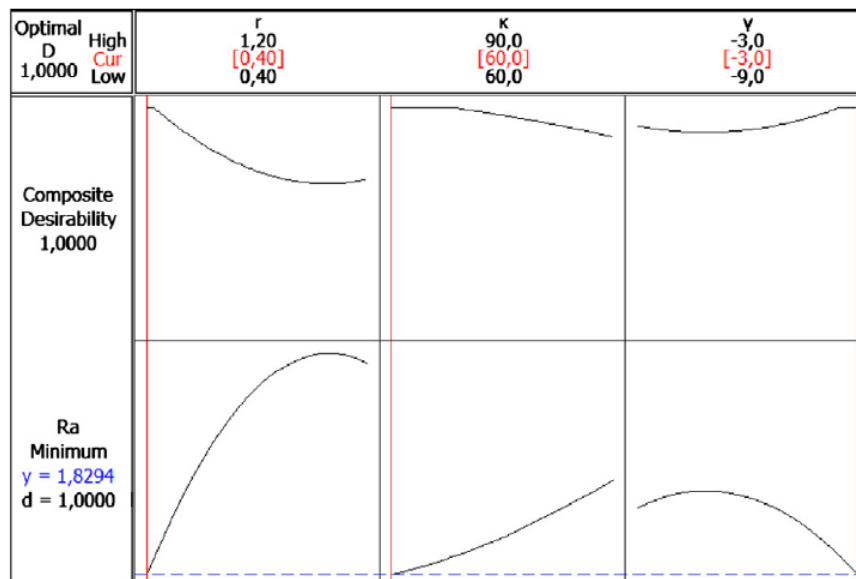
Nghiên cứu của Boucha và cộng sự trong quá trình tiện cứng thép AISI 52100 với mảnh dao CBN cũng cho thấy tốc độ cắt có ảnh hưởng nhiều nhất đến độ mòn của dụng cụ cắt, trong khi chiều sâu cắt ảnh hưởng nhiều nhất đến lực cắt và không có ảnh hưởng đáng kể đến độ nhám bề mặt [20]. Trong một nghiên cứu khác, Hamza và cộng sự cũng đã xác nhận rằng chiều sâu cắt chủ yếu ảnh hưởng đến các thành phần lực cắt và bước tiến dao có ảnh hưởng đáng kể nhất đến độ nhám bề mặt khi tiện cứng thép AISI D3 với các mảnh dao gốm phủ và không phủ [21].

2.3 Ảnh hưởng của thông số hình học dao cắt khi tiện cứng

Hình học dao có ảnh hưởng quan trọng đến các đặc tính của quá trình tiện cứng [22]. Một số nghiên cứu điển hình về hình học dao như Singh và cộng sự đã nghiên cứu kết hợp ảnh hưởng của thông số hình học dao (góc trước dao và bán kính mũi

dao) và chế độ cắt (vận tốc cắt và bước tiến dao) đến độ nhám bề mặt chi tiết gia công trong quá trình tiện cứng thép AISI 52100 (58 HRC) bằng dao hợp kim gốm [23]. Để thay đổi góc trước, tác giả sử dụng các mảnh dao có góc vát cạnh cắt khác nhau. Tuy nhiên, việc xác định góc trước hiệu dụng bằng cách cộng góc trước dao và góc vát mép cạnh cắt là chưa chính xác. Trong nghiên cứu này, tác giả đã sử dụng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) kết hợp thuật toán di truyền (Genetic Algorithm -GA) để xây dựng hàm hồi qui giữa độ nhám bề mặt với các thông số đầu vào, đồng thời tối ưu hóa quá trình gia công. Kết quả cho thấy độ nhám bề mặt tăng khi góc trước âm và bước tiến dao tăng, trong khi vận tốc cắt và bán kính mũi dao tăng làm giảm độ nhám. Nghiên cứu cho thấy không có sự ảnh hưởng tương tác giữa thông số hình học góc dao và chế độ cắt, chỉ có ảnh hưởng tương tác giữa bước tiến dao và bán kính mũi dao, nhưng tác động rất nhỏ. Khi tăng góc trước âm làm tăng chiều dài tiếp xúc giữa mặt trước của dao và phoi, tăng tỷ số nén phoi, chính điều này làm tăng sự rung động, dẫn đến tăng độ nhám bề mặt. Sự ảnh hưởng của bước tiến dao và bán kính mũi dao phù hợp với công thức lý thuyết về độ nhám bề mặt ($Ra = \frac{f^2}{32r}$). Trong khi đó, tăng góc trước dương thì độ nhám bề mặt giảm như nghiên cứu của Hossainy [10] và Cao [24].

Trong một nghiên cứu khác, Neseli và cộng sự đã tối ưu hóa góc trước, góc nghiêng dao và bán kính mũi dao để cải thiện độ nhám bề mặt khi tiện thép AISI 1040 bằng dao hợp kim gốm (Al_2O_3/TiC) [25]. Kết quả cho thấy bán kính mũi dao có ảnh hưởng lớn nhất đến độ nhám bề mặt, tiếp theo là góc nghiêng dao và góc trước. Độ nhám bề mặt tăng khi tăng góc trước âm và góc nghiêng dao. Tuy nhiên, khi tăng bán kính mũi dao, độ nhám bề mặt cũng tăng, trái với lý thuyết về độ nhám bề mặt khi tiện. Hiện tượng này được tác giả giải thích rằng việc tăng bán kính mũi dao có thể làm tăng rung động trong quá trình cắt, dẫn đến tăng độ nhám bề mặt. Phương pháp tối ưu hóa (Desirability Function Approach - DFA) được áp dụng để xác định các thông số góc tối ưu, với bán kính mũi dao là 0.4 mm, góc nghiêng dao là 60° , và góc trước là -3° (Hình 2.5).



Hình 2.5 Tối ưu hóa độ nhám bề mặt [25]

Trong khi đó, một nghiên cứu của Sharma và cộng sự cho thấy khi tăng góc nghiêng dao làm giảm độ nhám bề mặt khi tiện cứng thép bằng mảnh dao carbide phủ TiCN [26]. Qua hai nghiên cứu của Neseli và cộng sự [25] và Sharma và cộng sự [26], có thể thấy rằng ảnh hưởng của góc nghiêng dao đến độ nhám bề mặt là ngược nhau. Điều này cho thấy ảnh hưởng của thông số hình học dao đến tiện truyền thống và tiện cứng có thể khác nhau.

Cũng nghiên cứu ảnh hưởng của hình học góc dao và chế độ cắt, Zerti và cộng sự đã sử dụng phương pháp Taguchi để tối ưu hóa các thông số gia công (góc nghiêng dao, bán kính mũi dao, tốc độ cắt, bước tiến dao và chiều sâu cắt) nhằm cải thiện độ nhám bề mặt, lực cắt và năng lượng tiêu thụ trong quá trình tiện cứng thép AISI D3 [27]. Kết quả cho thấy tăng góc nghiêng dao và bán kính mũi dao sẽ giảm độ nhám bề mặt chi tiết gia công và có sự ảnh hưởng tương tác giữa góc nghiêng dao với chiều sâu cắt và vận tốc cắt, nhưng rất nhỏ, khoảng 3.82% và 1.16% tương ứng. Từ 2 nghiên cứu về tiện cứng [26] & [27], thấy rằng khi tăng góc nghiêng dao sẽ làm giảm độ nhám bề mặt chi tiết gia công, nhưng các nghiên cứu trên cũng chưa giải thích lý do cho vấn đề này.

Patel và cộng sự đã nghiên cứu ảnh hưởng của bán kính mũi dao và chế độ cắt đến độ nhám bề mặt chi tiết gia công khi tiện cứng bằng dao CBN [28]. Các kết quả phù hợp với các nghiên cứu trước, cho thấy độ nhám bề mặt giảm khi tăng bán kính mũi dao và tốc độ cắt hoặc giảm bước tiến dao. Tuy nhiên, tăng bán kính mũi dao có thể làm tăng độ mòn dao. Trong khi đó, Chou và cộng sự đã tiến hành một nghiên cứu chi tiết về ảnh hưởng của bán kính mũi dao đến độ nhám bề mặt, độ mòn dao và lực cắt ở các điều kiện gia công khác nhau trong quá trình tiện tinh thép AISI 52100 đã tôi cứng bằng dao gốm [29]. Kết quả cho thấy xu hướng tương tự: độ nhám bề mặt tốt hơn với bán kính mũi dao lớn và độ mòn dao thấp hơn với dao có bán kính mũi nhỏ. Qua các nghiên cứu [23] & [27], có thể thấy rằng mặc dù có sự tương tác giữa thông số hình học dao và chế độ cắt, nhưng mức độ ảnh hưởng rất nhỏ và có thể bỏ qua.

Ngoài độ nhám bề mặt, độ mòn dao cũng là yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến chi phí sản xuất. Hossainy đã nghiên cứu thực nghiệm ảnh hưởng đồng thời chế độ cắt (vận tốc cắt, bước tiến dao và chiều sâu cắt) và hình học góc dao (góc nghiêng dao và góc trước dao) đến lực cắt, độ mòn dao và độ nhám bề mặt theo thời gian khi tiện bằng dao thép gió (HSS) [10]. Kết quả cho thấy khi tăng góc nghiêng dao, lực cắt tập trung trên một chiều dài lưỡi cắt ngắn hơn, làm tăng tốc độ mòn dao. Trong khi đó, tăng góc trước dương giúp phoi thoát dễ dàng trên mặt trước dao, giảm lực cắt và nhiệt cắt, do đó giảm mòn dao. Tuy nhiên, nghiên cứu của Kuhn và cộng sự lại cho thấy góc trước không có ảnh hưởng đáng kể đến độ mòn dao khi phay bánh răng bằng dao carbide phủ AlCrN [30]. So sánh hai nghiên cứu [10] và [30], trong tiện truyền thống bằng dao HSS (chịu nhiệt kém), sự thay đổi góc trước có ảnh hưởng đáng kể đến độ mòn dao do nhiệt tăng trên mặt trước dao.

Trong các nghiên cứu hình học dao, hình học cạnh cắt trong tiện cứng cũng được quan tâm vì ảnh hưởng đáng kể đến độ mòn dao và chất lượng bề mặt chi tiết [31]. Trong nghiên cứu tiện cứng thép dụng cụ DF-3 (58 HRC) bằng dao hợp kim gốm phủ PVD-TiN, Davoudinejad và cộng sự thấy rằng tuổi thọ dao và độ nhám bề

mặt cải thiện hơn với cạnh cắt vát mép so với cạnh cắt bo cung [11]. Tuy nhiên, nghiên cứu không giải thích lý do cho vấn đề này. Anselmo và cộng sự so sánh ảnh hưởng của cạnh cắt vát mép và cạnh cắt bo cung đến độ mài mòn và tuổi thọ dao trong cắt liên tục và gián đoạn, cho thấy dao vát cạnh có tuổi thọ cao hơn trong cắt liên tục, trong khi dao bo cung hiệu quả hơn trong cắt gián đoạn [32]. Một nghiên cứu khác về ảnh hưởng của bán kính cung cạnh cắt đến mòn dao khi tiện cứng thép AISI52100 được thực hiện bởi Zhao và cộng sự [33], kết quả nghiên cứu đã cho thấy khi giảm bán kính cạnh cắt sẽ tăng độ mòn dao, điều này là do khi giảm bán kính cạnh cắt làm cho cạnh cắt sắc hơn, vì vậy mòn nhanh hơn. Trong khi đó, Thiele và cộng sự cho thấy độ nhám bề mặt lớn hơn khi sử dụng dao có bán kính cạnh cắt lớn so với dao có bán kính cạnh nhỏ [34].

Bên cạnh độ nhám bề mặt, lực cắt và nhiệt cắt cũng là các yếu tố được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm. Harisha và cộng sự đã áp dụng phương pháp Taguchi để thiết kế thí nghiệm nhằm tối ưu hóa các thông số công nghệ (góc nghiêng dao, chiều sâu cắt, bán kính mũi dao, bước tiến dao) trong quá trình tiện cứng thép AISI 1055 nhằm giảm lực cắt [35]. Kết quả cho thấy chiều sâu cắt và góc nghiêng dao là nhân tố chính ảnh hưởng đến lực cắt; khi tăng góc nghiêng dao, lực dọc trục sẽ tăng nhưng lực hướng kính giảm và các thành phần lực cắt tăng khi tăng bước tiến dao. Góc nghiêng dao tối ưu được xác định là 60° - 70° . Trong một nghiên cứu khác, Saglam và cộng sự đã xem xét ảnh hưởng của bước tiến dao, góc trước và góc nghiêng dao đến lực cắt và nhiệt độ cắt trong quá trình tiện cứng thép AISI 1040 (40HRC) bằng mảnh dao carbide [36]. Kết quả cho thấy tăng góc nghiêng dao làm tăng lực dọc trục nhưng giảm lực hướng kính, tương tự như [35]. Khi tăng góc trước dương, lực cắt giảm trong khi nhiệt độ cắt tăng. Gunay và cộng sự cũng xác định rằng lực cắt giảm khi tăng góc trước dương và tăng khi góc trước âm [37]. Sự ảnh hưởng của góc trước đến lực cắt có thể được giải thích thông qua góc cắt. Khi tăng góc trước dương, góc cắt giảm, chiều dài tiếp xúc phoi - dao giảm, tỷ số nén phoi giảm, từ đó giảm lực cắt. Xu và cộng sự đã thay đổi hình dáng bề mặt trước dao để cải thiện quá trình tiện cứng thép AISI52100 [38]. Kết quả cho thấy lực cắt, nhiệt độ cắt và ứng suất dư giảm so với

dao có mặt trước phẳng. Tuy nhiên, điều này làm yếu cạnh cắt, dễ gây mẻ dao trong tiện cứng.

Ngoài ảnh hưởng của hình học dao trong tiện cứng, các nghiên cứu về hình học dao trong gia công macro và micro cũng được quan tâm. Mikołajczyk và cộng sự đã nghiên cứu ảnh hưởng của góc nghiêng dao nhằm giảm thiểu độ dày lớp cắt trong gia công tiện micro thép C45 [39]. Saravanmurugan và cộng sự đã tối ưu đồng thời hình học dao và chế độ cắt để giảm thiểu rung động tuần hoàn “chatter” trong quá trình gia công [40].

2.4 Độ nhám bề mặt khi tiện cứng

Độ nhám bề mặt của chi tiết gia công là một trong những yếu tố quan trọng, quyết định hiệu quả của bất kỳ quy trình gia công nào. Trong tiện cứng, các yếu tố như chế độ cắt và hình học dao ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt chi tiết với mức độ khác nhau [41]. Đáng chú ý, mòn dụng cụ cắt cũng có ảnh hưởng đáng kể đến độ nhám bề mặt.

Nhiều nghiên cứu thực nghiệm về tiện cứng đã được tiến hành nhằm đánh giá tác động của các thông số gia công đến độ nhám bề mặt. Rech và cộng sự đã xem xét ảnh hưởng của tốc độ cắt và bước tiến dao đến độ nhám bề mặt của thép 27MnCr5 có độ cứng 850 HV khi tiện bằng mảnh dao PCBN. Kết quả cho thấy độ nhám bề mặt thấp (R_a dưới $0.2\text{ }\mu\text{m}$) có thể đạt được ở bước tiến dao 0.05 mm/vòng [42]. Abrão đã khảo sát ảnh hưởng của vật liệu dụng cụ cắt, bao gồm PCBN với hàm lượng CBN cao và thấp, gốm hỗn hợp, gốm gia cố bằng sợi và gốm silic-nitrit đến độ nhám bề mặt khi tiện tinh thép AISI H13 (52 HRC) và AISI E52100 (62 HRC) [43]. Kết quả cho thấy dao hàm lượng CBN thấp và gốm hỗn hợp đem lại bề mặt gia công tốt nhất, với R_a thấp tới $0.14\text{ }\mu\text{m}$.

Trong một nghiên cứu khác, Benga và cộng sự đã xác định được các thông số gia công tối ưu để đạt độ nhám bề mặt thấp khi tiện thép DIN 100Cr6 (62 HRC) bằng dao gốm hỗn hợp, gốm gia cố sợi và hai loại dao PCBN, với độ nhám thấp nhất đạt $R_a = 0.25\text{ }\mu\text{m}$ [44]. Tương tự, Özel và cộng sự đã tiến hành tiện thép AISI D2 (60

HRC) bằng dao gồm với các bán kính mũi dao khác nhau, thiết kế thí nghiệm với ba thông số đầu vào là bước tiến dao, tốc độ cắt và thời gian cắt để phân tích ảnh hưởng của chúng đến độ nhám bề mặt [45]. Kết quả cho thấy, độ nhám thấp nhất ($Ra = 0.18 \mu m$) được đạt được ở bước tiến dao thấp và tốc độ cắt cao nhất.

Những nghiên cứu này cho thấy, mặc dù độ nhám bề mặt trong tiện cứng chưa đạt giá trị $Ra = 0.1 \mu m$ như trong quá trình mài, nhưng việc lựa chọn các thông số gia công phù hợp có thể giúp đạt được độ nhám bề mặt phù hợp với yêu cầu kỹ thuật của hầu hết các sản phẩm cơ khí.

2.5 Mài mòn dao cắt khi tiện cứng

Mài mòn dao là một vấn đề quan trọng trong tiện cứng, vì đây là chỉ số quyết định tuổi thọ của dụng cụ cắt. Tuổi thọ dao phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm vật liệu của chi tiết gia công và dụng cụ cắt, thông số hình học dao cũng như chế độ cắt. Nhiều tác giả đã nghiên cứu các cơ chế dẫn đến mài mòn dụng cụ cắt trong quá trình gia công kim loại.

Khi tiện thép khuôn P20 với tốc độ cắt 250 m/phút, nhiệt độ trên mặt trước của dao carbide có thể vượt quá $1.000^{\circ}C$. Nhiệt độ cao tạo điều kiện cho các nguyên tử từ dao cắt khuếch tán vào phoi, đặc biệt tập trung tại vùng giữa chiều dài tiếp xúc giữa dao và phoi, dẫn đến hiện tượng mài mòn dạng vết lõm do quá trình khuếch tán mạnh [46]. Opitz và cộng sự đã giải thích cơ chế mài mòn liên quan đến tốc độ và nhiệt độ cắt. Theo đó, mài mòn cơ học chiếm ưu thế ở tốc độ và nhiệt độ cắt thấp; mài mòn bám dính ở tốc độ và nhiệt độ cắt trung bình; trong khi mài mòn khuếch tán là cơ chế chính ở tốc độ và nhiệt độ cắt cao [47].

Luo và cộng sự đã nghiên cứu đặc tính mài mòn của dao gốm và CBN trong quá trình tiện cứng thép AISI 4340 [48]. Kết quả cho thấy mài mòn cơ học của chất kết dính trong dao CBN dưới tác động của các hạt carbide cứng trong phôi là nguyên nhân chính gây mài mòn, và đây cũng là cơ chế mài mòn chủ yếu đối với dao gốm. Liu và cộng sự đã khảo sát hiện tượng mài mòn mặt sau của dụng cụ CBN khi tiện cứng thép chịu lực JIS-SUJ2 [49]. Họ kết luận rằng ma sát giữa dao và phôi góp phần

quan trọng vào quá trình mài mòn mặt sau. Khi độ mòn mặt sau dao tăng, ma sát giữa dao và phôi tăng theo, dẫn đến lực cắt và lực hướng kính tăng. Đồng thời, ứng suất dư trong chi tiết gia công cũng tăng đáng kể cùng với sự gia tăng độ mòn mặt sau. Trong nghiên cứu tiện cứng thép AISI D2 (62 HRC) bằng dao PCBN, Arsecularatne và cộng sự đã sử dụng độ mòn mặt sau làm tiêu chí để quyết định tuổi thọ của dụng cụ cắt [50]. Tương tự, Ozel và cộng sự đã tiến hành tiện thép AISI D2 (60 HRC) bằng dao gốm với chiều sâu cắt 0.2 mm [51]. Sau 15 phút gia công ở tốc độ cắt cao, độ mòn mặt sau dao đạt 0.15 mm, được xem là giới hạn tuổi thọ dụng cụ.

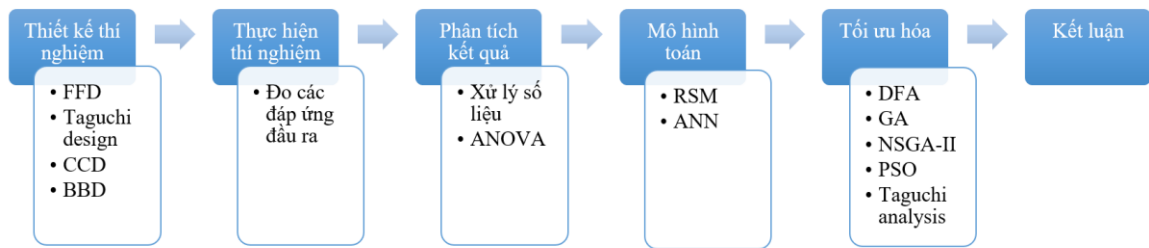
Amlana và cộng sự đã đánh giá độ mòn mặt sau của dao carbide phủ nhiều lớp và dao gốm trong quá trình tiện cứng thép AISI 52100 [52]. Kết quả cho thấy mài mòn cơ học và bám dính là các cơ chế chính đối với dao carbide phủ, trong khi mài mòn cơ học là cơ chế chủ yếu đối với dao gốm. Quan sát tương tự được Ramanuj và cộng sự ghi nhận trong quá trình tiện cứng thép AISI D2 bằng dao carbide phủ [53].

Qua các nghiên cứu trên cho thấy, đối với dao carbide phủ, mài mòn cơ học và mài mòn bám dính là các cơ chế chính; trong khi với dao gốm và CBN, mài mòn cơ học chiếm ưu thế. Các hạt cứng như carbide, CBN, và martensite có trong vật liệu phôi và dụng cụ cắt là nguyên nhân chính gây ra mài mòn cơ học. Mài mòn mặt sau dao được coi là yếu tố quan trọng nhất vì nó ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt, ứng suất dư, lớp trắng, và độ chính xác kích thước của chi tiết gia công. Do đó, mài mòn mặt sau thường được xem là tiêu chí để đánh giá tuổi thọ dao trong quá trình tiện cứng.

2.6 Mô hình toán và tối ưu quá trình tiện cứng

Mô hình toán và tối ưu hóa quá trình tiện cứng đóng vai trò quan trọng trong lĩnh vực gia công, góp phần nâng cao hiệu quả và chất lượng sản phẩm. Hình 2.6 trình bày tổng quan các bước trong nghiên cứu về tiện cứng. Parida và cộng sự đã sử dụng phương pháp thiết kế thí nghiệm hỗn hợp đối xứng (Central Composite Design - CCD), xây dựng mô hình toán bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (Response Surface Methodology - RSM), phân tích phương sai (Analysis of Variance - ANOVA), và tối ưu hóa đa mục tiêu bằng hàm mục tiêu (Desirability Function Approach - DFA) để

ngiên cứu ảnh hưởng của các thông số gia công, bao gồm vận tốc cắt, bước tiến dao, chiều sâu cắt và nhiệt độ chi tiết gia công, đến mòn dao và độ nhám bề mặt khi tiện nóng thép Monel-400 [54]. Kết quả cho thấy mô hình RSM có hệ số tương quan R^2 đối với độ nhám bề mặt và mòn dao lần lượt là 86.17% và 94.72%, cho thấy mức độ chính xác cao của mô hình.

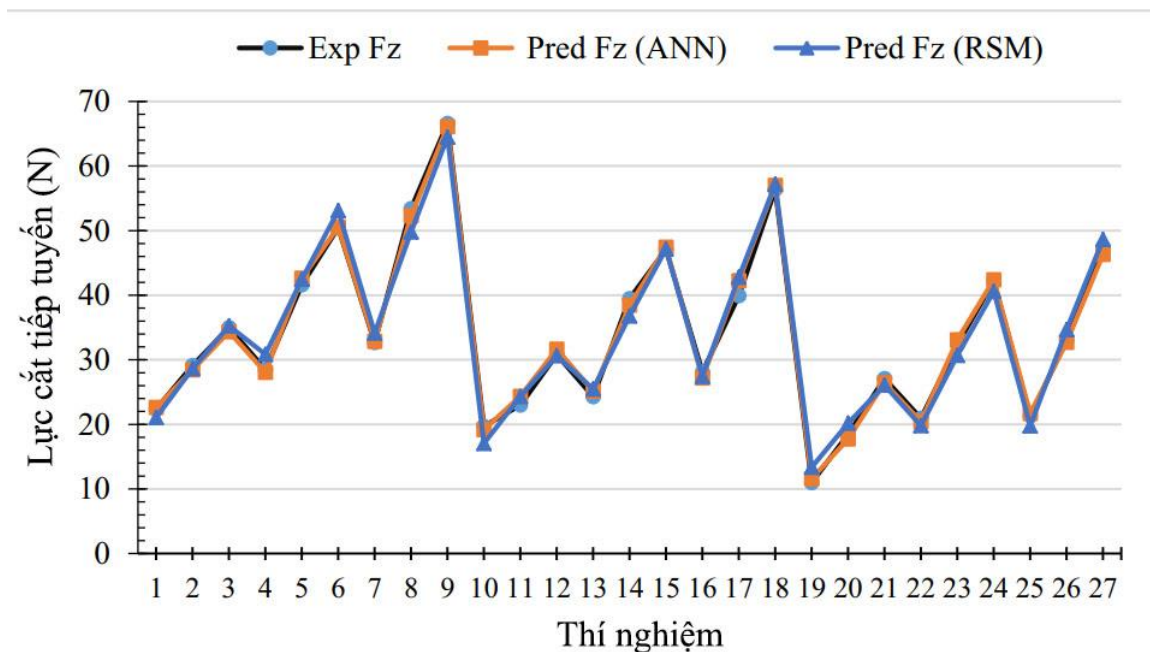


Full Factorial Design (FFD); Central Composite Design (CCD); Box-Behnken Design (BBD); Analysis of Variance (ANOVA); Response Surface Method (RSM); Artificial Neural Network (ANN); Desirability Function Approach (DFA); Genetic Algorithms (GA); Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II); Particle Swarm Optimization (PSO)

Hình 2.6 Tổng quan các bước nghiên cứu

Bagaber và cộng sự cũng đã áp dụng các phương pháp tương tự cho nghiên cứu tiện thép không gỉ AISI 316 bằng dao carbide không phủ [55]. Mô hình toán dựa trên RSM đối với năng lượng tiêu thụ, độ nhám bề mặt và mòn dao đều có hệ số tương quan cao, lần lượt $R^2 = 90\%$, 93.5% và 88.5% .

Laghari và cộng sự sử dụng RSM, DFA trong nghiên cứu tiện, kết quả cho thấy hệ số tương quan $R^2 = 99.3\%$, 99.2% , và 92.56% đối với các mô hình lực cắt, cho thấy sự chính xác rất cao của mô hình [56]. Chabbi và cộng sự đã áp dụng RSM và mạng nơ-ron nhân tạo (Artificial Neural Network - ANN) để xây dựng mối quan hệ giữa các thông số chế độ cắt và các đáp ứng đầu ra (độ nhám bề mặt, lực cắt và tốc độ bóc tách vật liệu), đồng thời tiến hành tối ưu hóa đa mục tiêu bằng DFA [57]. Kết quả cho thấy hệ số tương quan R^2 của mô hình ANN (99.48%) cao hơn mô hình RSM (98.15%), tuy nhiên sự khác biệt trong dự đoán giữa hai mô hình là không đáng kể (Hình 2.7).



Hình 2.7 So sánh kết quả thí nghiệm và dự đoán từ mô hình toán

Trong một nghiên cứu khác, Tang và cộng sự đã mô hình hóa các thành phần lực cắt trong tiện cứng với năm yếu tố đầu vào, bao gồm vận tốc cắt, bước tiến dao, chiều sâu cắt, độ cứng chi tiết gia công và bán kính mũi dao [65]. Tác giả đã sử dụng mô hình toán hàm mũ (Orthogonal Regression Methodology - ORM) và RSM để mô hình hóa quá trình gia công, kết quả cho thấy mô hình RSM cho độ chính xác cao hơn so với ORM. Phương pháp RSM cũng được sử dụng rộng rãi trong nhiều nghiên cứu như Xiao [58], Santhosh [59], và Aslan [60]. Bảng 2.1 trình bày các phương pháp được sử dụng trong các nghiên cứu khác nhau.

Bảng 2.1 Các phương pháp mô hình hóa và tối ưu trong nghiên cứu tiện cứng

Tác giả	Phương pháp nghiên cứu	Vật liệu chi tiết/ vật liệu dao	Thông số nghiên cứu
Azizi và cộng sự [61]	CCD RSM ANOVA DFA	EN19 (50 HRC)/Cacbit phủ	v (m/phút): 40, 80, 120 f (mm/vòng): 0.08, 0.16, 0.24 d_w (mm): 0.04, 0.08, 0.12

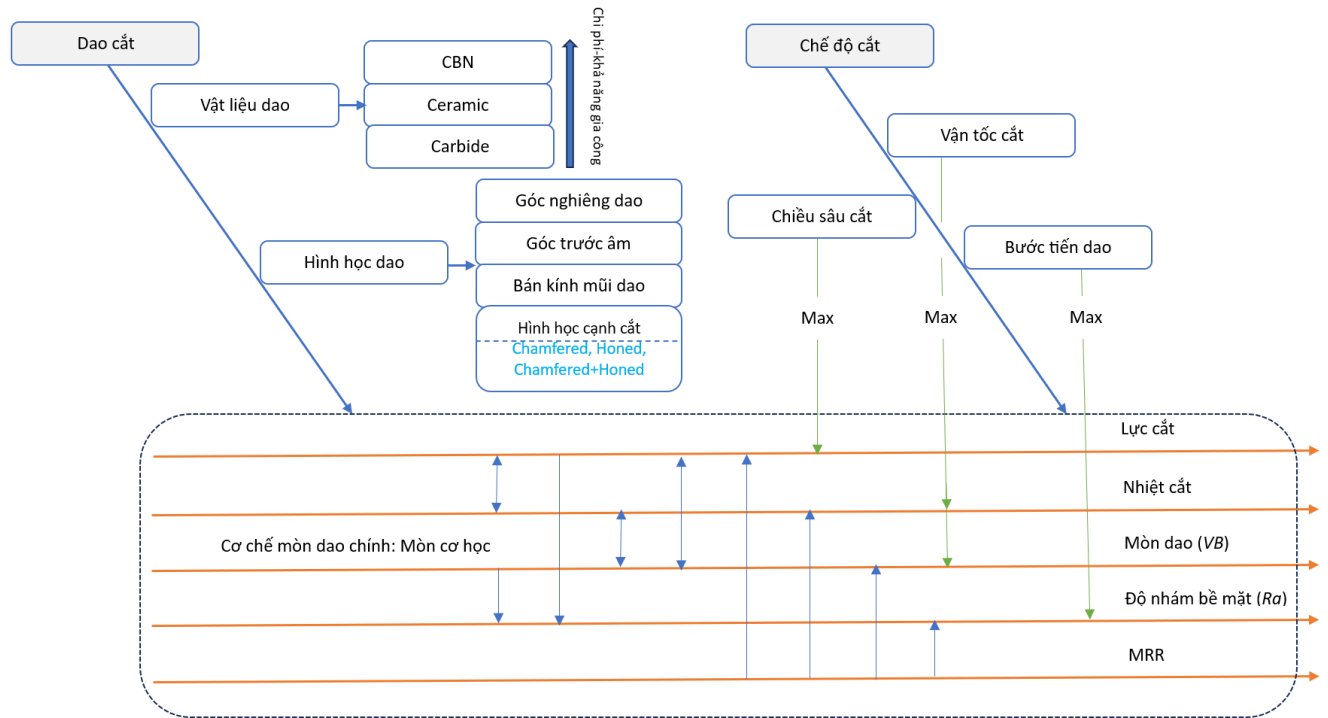
Zerti và cộng sự [62]	Taguchi (L_{25})	AISI 420 (59HRC)/Hợp kim gồm phủ	v (m/phút): 80, 120, 170, 240, 340
	RSM, ANN		f (mm/vòng): 0.08, 0.12, 0.16, 0.2, 0.24
	ANOVA		
	DFA		d_w (mm): 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
Arfaoui và cộng sự [63]	CCD	AISI 52100 (62 HRC) /PCBN	v (m/phút): 100, 200, 300
	RSM		f (mm/vòng): 0.05, 0.1, 0.15
	ANOVA		d_w (mm): 1, 2.5, 4
	DFA		
Suresh và cộng sự [64]	CCD	AISI H13 (55HRC)/Hợp kim gồm hỗn hợp	v (vòng/phút): 80, 140, 200
	RSM		f (mm/vòng): 0.1, 0.14, 0.18
	ANOVA		d_w (mm): 0.2, 0.4, 0.6
	DFA		
Singh và cộng sự, [65]	FFD	AISI 52100 (58 HRC) / Hợp kim gồm hỗn hợp	v (vòng/phút): 100, 150, 200
	RSM		f (mm/vòng): 0.1, 0.2, 0.32
	ANOVA		d_w (mm): 0.2
	GA		r (mm): 0.4, 0.8, 1.2
Meddour và cộng sự [66]	BBD	AISI 4140 (60 HRC)/Hợp kim gồm hỗn hợp	v (vòng/phút): 120, 182, 244
	RSM, ANN		f (mm/vòng): 0.08, 0.11, 0.18
	ANOVA		d_w (mm): 0.1, 0.2, 0.3
	DFA		r (mm): 0.8, 1.2, 1.6

2.7 Kết luận

Các vấn đề nghiên cứu liên quan đến tiện cứng đã được tổng quan và trình bày chi tiết trong Bảng 2.2 và Hình 2.8.

Bảng 2.2 Tổng quan các nghiên cứu về tiện cứng

Các thông số đầu vào		Các thông số đầu ra		Phương pháp nghiên cứu	Vật liệu gia công
		Độ nhám bề mặt (Ra)	Độ mòn dao (VB)		
Hình học dao	Góc nghiêng dao $K_r = 60^\circ - 90^\circ$	✓	✓ tiện thường	PP thiết kế thí nghiệm: - FFD - Taguchi - CCD	- AISI 1040 - AISI 1055 - AISI 52100 - AISI D3 - AISI D2 - AISI 4340 - AISI H11 - AISI H13
	Góc trước $\gamma_o = - 3^\circ - - 9^\circ$	✓	✓ tiện thường		
	Góc nâng dao λ_s				
	Bán kính mũi dao $r = 0.4; 0.8; 1.2 \text{ mm}$	✓	✓		
	Hình dáng cạnh cắt - Bo cung - Vát mép	✓	✓		
Chế độ cắt	Vận tốc cắt - Ceramic $v = 75 - 240 \text{ m/phút}$ - CBN $v = 90 - 246 \text{ m/phút}$	✓	✓	PP mô hình toán: - RSM ([9], [19], [23], [58], [78], [27]...) - ANN PP tối ưu: - DF ([55], [9], [54], [57], [36]...) - GA - Taguchi ...	
	Bước tiến dao - Ceramic $f = 0.04 - 0.15 \text{ mm/vòng}$ - CBN $f = 0.08 - 0.25 \text{ mm/vòng}$	✓	✓		
	Chiều sâu cắt - Ceramic $d_w = 0.1 - 0.2 \text{ mm}$ - CBN $d_w = 0.1 - 0.6 \text{ mm}$	✓	✓		



Hình 2.8 Ảnh hưởng của thông số công nghệ trong tiện cứng

Nhận xét chung về các kết quả nghiên cứu tiện cứng:

- Các nghiên cứu đã chỉ ra rằng thông số chế độ cắt được phân tích khá đầy đủ và chi tiết. Tổng quan cho thấy bước tiến dao có ảnh hưởng lớn nhất đến độ nhám bề mặt; khi bước tiến dao tăng, độ nhám cũng tăng. Ngược lại, vận tốc cắt có tác động mạnh nhất đến độ mòn dao (tuổi thọ dao), với xu hướng tăng vận tốc cắt làm tăng độ mòn dao nhưng giảm độ nhám bề mặt. Trong khi đó, chiều sâu cắt có ảnh hưởng lớn nhất đến lực cắt, khi tăng chiều sâu cắt, lực cắt cũng tăng. Tuy nhiên, chiều sâu cắt lại ít ảnh hưởng đến độ mòn dao và độ nhám bề mặt, nhưng đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao tốc độ bóc tách vật liệu (MRR) và năng suất gia công. Các nghiên cứu cho thấy rằng chế độ cắt tối ưu phụ thuộc vào từng nhóm vật liệu dao và chi tiết gia công cụ thể.
- Các nghiên cứu về thông số hình học của dao như góc dao, kính mũi dao và hình dáng cạnh cắt còn khá hạn chế. Trong đó, góc dao đóng vai trò rất quan trọng trong quá trình tiện cứng, tuy nhiên ảnh hưởng đồng thời của các thông số góc dao đến các đáp ứng đầu ra của quá trình tiện cứng như độ nhám bề mặt

và mòn dao chưa được nghiên cứu một cách đầy đủ, đặc biệt là nghiên cứu về góc nâng dao trong tiện cứng.

- Độ nhám bề mặt (R_a) trong tiện cứng có thể đạt từ 0.14 đến 0.18 μm , trong khi độ mòn mặt sau dao (VB) được xem là tiêu chí quan trọng để đánh giá tuổi thọ dao. Đây là hai thông số đầu ra quan trọng nhất, phản ánh chất lượng và hiệu quả quá trình gia công.
- Dao hợp kim gốm được đánh giá là dụng cụ cắt phù hợp nhất xét trên khía cạnh kinh tế và kỹ thuật, và hiện đang được ứng dụng rộng rãi trong tiện cứng.
- Cơ chế mòn dao trong tiện cứng chủ yếu bao gồm mài mòn cơ học, mài mòn dính và mài mòn khuếch tán, trong đó mài mòn cơ học chiếm ưu thế.
- Các nghiên cứu đã phát triển mô hình dự đoán các đặc tính gia công chủ yếu bằng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM), kết hợp với các thiết kế thí nghiệm (CCD) và tối ưu hóa đa mục tiêu (DFA). Phương pháp này đã chứng minh hiệu quả trong việc nghiên cứu, phân tích, và tối ưu hóa các quá trình gia công.
- Các mảnh dao tiêu chuẩn trong tiện cứng có thông số góc dao được xác định cho lưỡi cắt chính khi gắn trên cán dao. Tuy nhiên, trong tiện cứng, chỉ có bán kính mũi dao tham gia vào quá trình cắt do chiều sâu cắt và bước tiến dao thường rất nhỏ. Tiện cứng rất khác biệt so với tiện truyền thống, do đó nhiều kiến thức từ tiện truyền thống không thể áp dụng trực tiếp cho tiện cứng.

Từ tổng quan các nghiên cứu, có thể thấy cần tiến hành một nghiên cứu toàn diện về ảnh hưởng đồng thời của các thông số hình học góc dao để tối ưu quá trình tiện cứng. Chính vì vậy, nghiên cứu sắp tới sẽ lần đầu tiên xem xét ảnh hưởng đồng thời của các thông số góc dao đến độ nhám bề mặt và độ mòn dao, hai đáp ứng đầu ra quan trọng nhất trong đánh giá chất lượng quá trình tiện cứng.

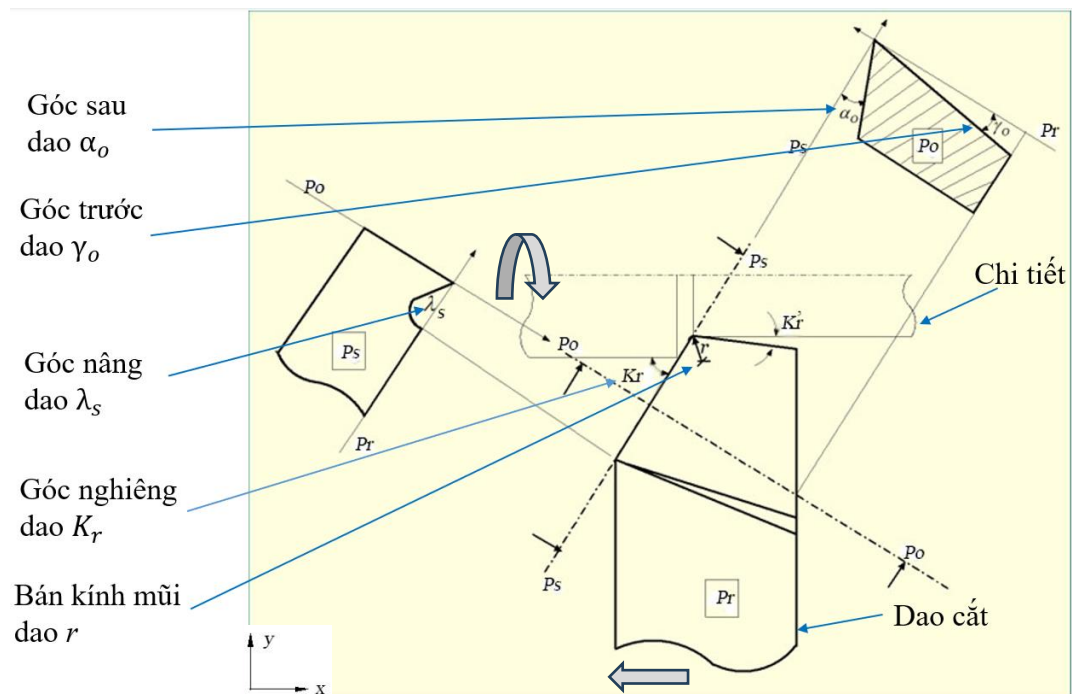
Chương 3:

CƠ SỞ LÝ THUYẾT QUÁ TRÌNH TIỆN CỨNG

3.1 Khái niệm về tiện cứng

Tiện cứng là quá trình tiện các chi tiết có độ cứng 45 HRC trở lên [67], [68]. Thông thường, độ cứng của các chi tiết gia công trong khoảng 45 – 68 HRC [1].

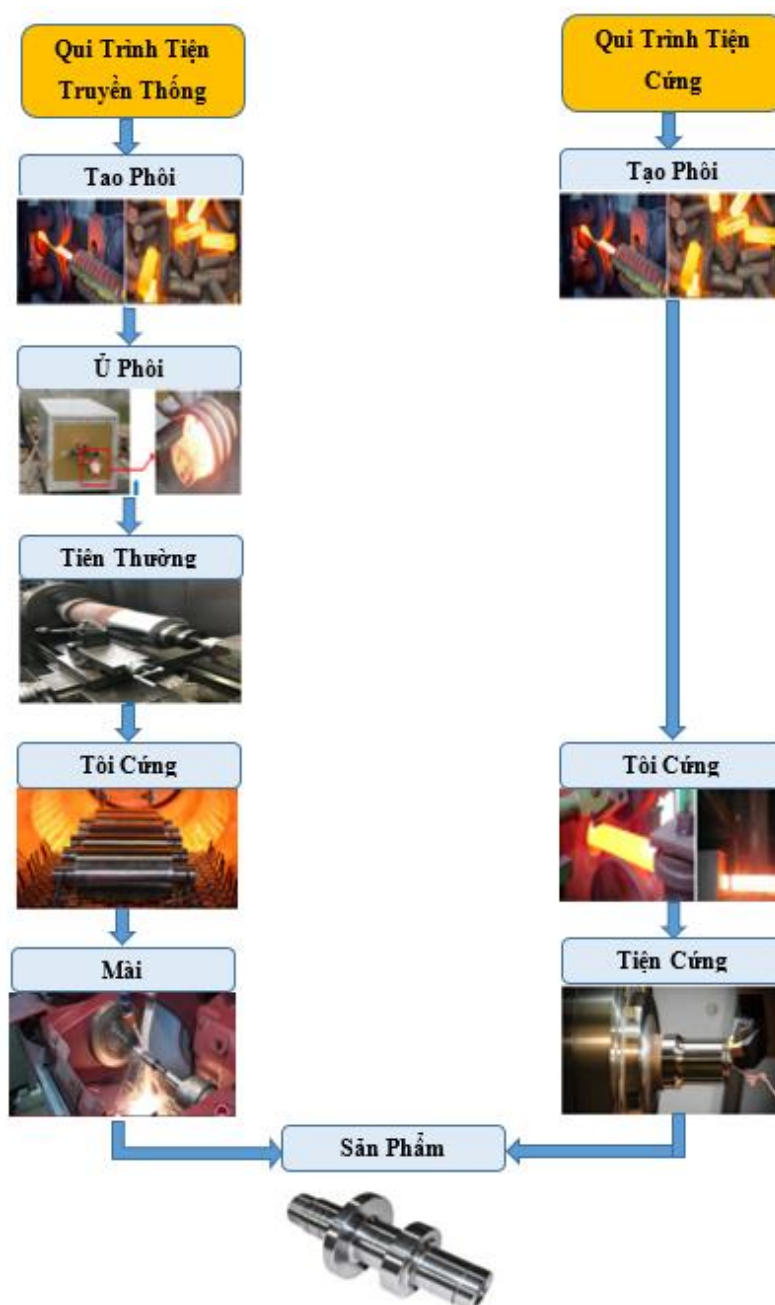
Hình học dao và chế độ cắt là những yếu tố quan trọng trong quá trình tiện cứng. Các thông số hình học của dụng cụ cắt xét trong hệ tiêu chuẩn “the tool-in-hand system (T-hand-S)” được xác định dựa trên các mặt phẳng tham chiếu cơ bản bao gồm mặt phẳng đáy (mặt phẳng cơ sở) P_r là mặt phẳng vuông góc với vector vận tốc cắt (hướng z), mặt phẳng trục dao (mặt cắt chính) P_o là mặt phẳng vuông góc với hình chiếu của cạnh cắt trên mặt phẳng đáy (nếu cạnh cắt cong là mặt phẳng vuông góc với tiếp tuyến của hình chiếu cạnh cắt tại điểm đang xét) và mặt phẳng cạnh cắt P_s là mặt phẳng chứa cạnh cắt (nếu cạnh cắt cong là mặt phẳng tiếp tuyến cạnh cắt tại điểm đang xét) và vuông góc với mặt phẳng đáy (Hình 3.1).



Hình 3.1 Sơ đồ nguyên lý tiện và thông số hình học dao

Tiện cứng thay thế nguyên công mài trong quy trình sản xuất truyền thống để gia công tinh các chi tiết có độ cứng cao, ứng dụng cho nhiều loại sản phẩm như vòng bi, trục, bánh răng, pít-tông, v.v.

Sự khác biệt giữa quy trình tiện thông thường và tiện cứng được thể hiện trong Hình 3.2.



Hình 3.2 Sơ đồ so sánh quy trình tiện truyền thống và tiện cứng

Với nhiều ưu điểm vượt trội, tiện cứng đã được công nhận như một giải pháp thay thế cho quá trình mài truyền thống. Một số nghiên cứu cho thấy trong một số trường hợp, tốc độ bóc tách vật liệu (Material Removal Rate - MRR) trong tiện cứng có thể cao hơn nhiều so với mài. Ước tính cho thấy thời gian gia công có thể giảm tới 60% [69] và nếu áp dụng tiện cứng để sản xuất các chi tiết phức tạp, chi phí sản xuất có thể giảm tới 30%, giúp ngành công nghiệp Mỹ thu lợi nhuận hàng năm lên tới 6 tỷ USD [70]. Khả năng gia công linh hoạt, dễ dàng gia công các bề mặt phức tạp, cùng với quá trình gia công thân thiện với môi trường hơn nhờ không sử dụng dung dịch trơn nguội và phoi có thể tái chế, là những điểm mạnh của tiện cứng.

Tiện cứng và mài là hai quy trình cạnh tranh, do đó cần hiểu rõ sự khác biệt giữa chúng. Bảng 3.1 so sánh một số đặc tính cơ bản của tiện cứng và mài.

Bảng 3.1 So sánh tiện cứng và mài

Thông số	Mài	Tiện cứng
Năng suất	Tương đối thấp	Cao
Thời gian thiết lập	Lâu	Tương đối ít
Chi phí vận hành	Cao	Thấp
Tính linh hoạt	Thấp (yêu cầu bánh mài hình dạng đặc biệt)	Linh hoạt hơn
Độ chính xác	Tốt hơn	Có thể đạt được $Ra = 0.2$ μm hoặc thấp hơn
Thân thiện với môi trường	Không thể cắt khô	Cắt khô
Tiếp xúc gia công	Đa điểm	Đơn điểm

3.2 Ưu điểm và nhược điểm của tiện cứng

3.2.1 Ưu điểm của tiện cứng

Quá trình tiện cứng mang lại nhiều lợi ích, bao gồm:

- Khả năng gia công dễ dàng các chi tiết có biên dạng phức tạp.

- Có thể thực hiện nhiều công đoạn gia công trong một lần gá đặt.
- Giảm chi phí sản xuất trên mỗi sản phẩm.
- Chất lượng bề mặt sau gia công có thể đạt mức tương đương quá trình mài.
- Năng suất cao so với phương pháp mài truyền thống.

3.2.2 Nhược điểm của tiện cứng

Mặc dù có nhiều ưu điểm, tiện cứng cũng tồn tại một số hạn chế:

- Trong một số trường hợp, việc tiện cứng yêu cầu máy móc cứng vững đặc biệt để đảm bảo quá trình gia công thành công. Độ cứng vững của máy ảnh hưởng trực tiếp đến độ chính xác của tiện cứng.
- Tiện cứng có thể không phù hợp đối với một số kích thước hoặc hình dạng chi tiết nhất định. Thông thường, tỷ lệ chiều dài trên đường kính (L/D) của chi tiết không nên vượt quá 4:1 khi không có biện pháp hỗ trợ gá đặt bổ sung.
- Chất lượng bề mặt chi tiết gia công có xu hướng giảm dần theo quá trình mài mòn dao, ngay cả khi dao vẫn nằm trong giới hạn tuổi thọ cho phép.

3.3 Vật liệu chi tiết và ứng dụng trong tiện cứng

Tiện cứng thường được áp dụng cho các vật liệu kim loại có độ cứng từ 45 HRC trở lên, bao gồm thép cứng, thép làm khuôn, thép vòng bi, thép gió, thép hợp kim và gang hợp kim. Thép tôi cứng, nhờ khả năng nâng cao độ bền, chống mài mòn và bền mỏi, được sử dụng phổ biến nhất trong công nghiệp. Ví dụ, thép tôi cứng được dùng để chế tạo vòng bi, trục cam, bánh răng, dụng cụ cắt, khuôn mẫu, v.v. Tiện cứng hiện được ứng dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực như vận tải, năng lượng, và các ngành kỹ thuật cơ khí khác [70]. Một số ứng dụng công nghiệp tiêu biểu được mô tả trong Bảng 3.2.

Bảng 3.2 Các ứng dụng trong công nghiệp của tiện cứng [71]

				
Mặt xích	Vòi phun	Ly hợp	Trục bánh răng	Trục vít
				
Vòng lăn	Bánh xe lửa	Vòng bơm	Piston	Bánh răng

3.4 Dụng cụ cắt khi tiện cứng

3.4.1 Các loại vật liệu dụng cụ cắt cho tiện cứng

Việc lựa chọn vật liệu dao phù hợp đóng vai trò quan trọng đối với hiệu quả quá trình tiện cứng, vì nó ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng bề mặt và chi phí sản xuất. Mảnh dao phải chịu tải trọng cơ học lớn và nhiệt độ cao. Một số đặc tính cơ bản của vật liệu dao bao gồm:

- Độ cứng cao: giúp chống mài mòn cơ học và biến dạng, duy trì độ chính xác gia công.
- Khả năng chống va đập tốt: chịu được tải va đập, ngăn ngừa mẻ hoặc gãy dao, đặc biệt trong gia công gián đoạn hoặc khi bề mặt phôi có cấu trúc vi mô phức tạp.
- Sự ổn định vật lý và hóa học ở nhiệt cao: duy trì độ cứng, độ bền và khả năng chống mài mòn ở nhiệt độ cao, cho phép cắt gọt hiệu quả trong điều kiện tiện cứng.

- Khả năng dẫn nhiệt tốt: giúp giảm nhiệt độ cạnh cắt.

Các vật liệu dụng cụ cắt chính được sử dụng trong tiện cứng là cacbit thiêu kết, gốm và CBN.

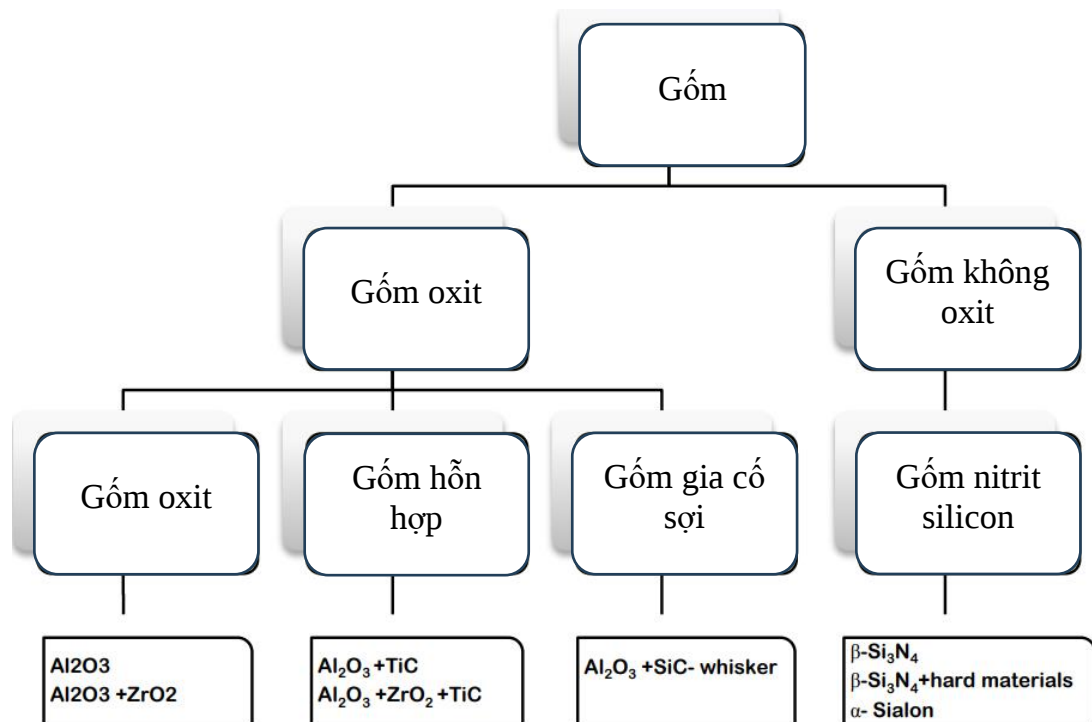
a. Mảnh dao cắt cacbit thiêu kết (sintered carbide inserts)

Mảnh dao cắt cacbit thiêu kết được chế tạo bằng phương pháp kết hợp các vi hạt cacbit vonfram (tungsten carbide) với chất kết dính coban ở nhiệt độ và áp suất cao. Có hai loại cacbit vonfram thiêu kết: loại ISO K để gia công gang xám, kim loại màu và vật liệu phi kim loại mài mòn như sợi thủy tinh, than chì; và loại ISO P để gia công kim loại sắt [72]. Lima và cộng sự đã nghiên cứu khả năng ứng dụng của mảnh dao cacbit phủ nhiều lớp TiCN/Al₂O₃/TiN (Titanium carbonitride /Aluminum oxide /Titanium nitride) trong gia công thép tôi, kết quả cho thấy dao cacbit phủ không hiệu quả khi độ cứng phôi vượt quá 50 HRC [73].

b. Mảnh dao hợp kim gốm (ceramic inserts)

Dụng cụ cắt hợp kim gốm có khả năng chịu nhiệt và độ cứng vượt trội so với cacbit, đồng thời duy trì ổn định hóa học và vật lý ở nhiệt độ tới 1500°C. Đối với vật liệu tôi cứng có độ cứng từ 600 đến 650 HV, dụng cụ cắt gốm phù hợp để gia công ở tốc độ cắt cao và không cần dung dịch trơn nguội. Có hai loại chính: gốm nền aluminum oxide Al₂O₃ và gốm nền silicon-nitride Si₃N₄. Gốm Al₂O₃ nguyên chất thường có độ bền và độ dẻo dai thấp, dẫn nhiệt kém; tuy nhiên, việc bổ sung các oxide như titan, magie và crom cải thiện đáng kể tính chất cơ học, cho phép gia công gang xám khô hoặc ướt ở tốc độ trên 450 m/phút. Gốm Si₃N₄, với độ bền cao và khả năng chống sốc nhiệt tốt, hiệu quả hơn gốm Al₂O₃ nguyên chất trong điều kiện cắt nhiệt độ cao.

Gốm gia cố bằng sợi silicon carbide SiC (Al₂O₃ + SiC), với 20–40% sợi SiC dạng tinh thể mịn, cải thiện độ bền, độ cứng nóng và khả năng chống mài mòn, phù hợp cho nguyên công phay. Gốm gia cố đã được sử dụng thành công cho vật liệu cứng và siêu hợp kim khó gia công. Hình 3.3 minh họa các loại mảnh dao gốm phổ biến trong tiện cứng.



Hình 3.3 Các loại mảnh dao cắt gốm phổ biến trong tiện cứng [74]

c. Mảnh dao Cubic Boron Nitride (CBN)

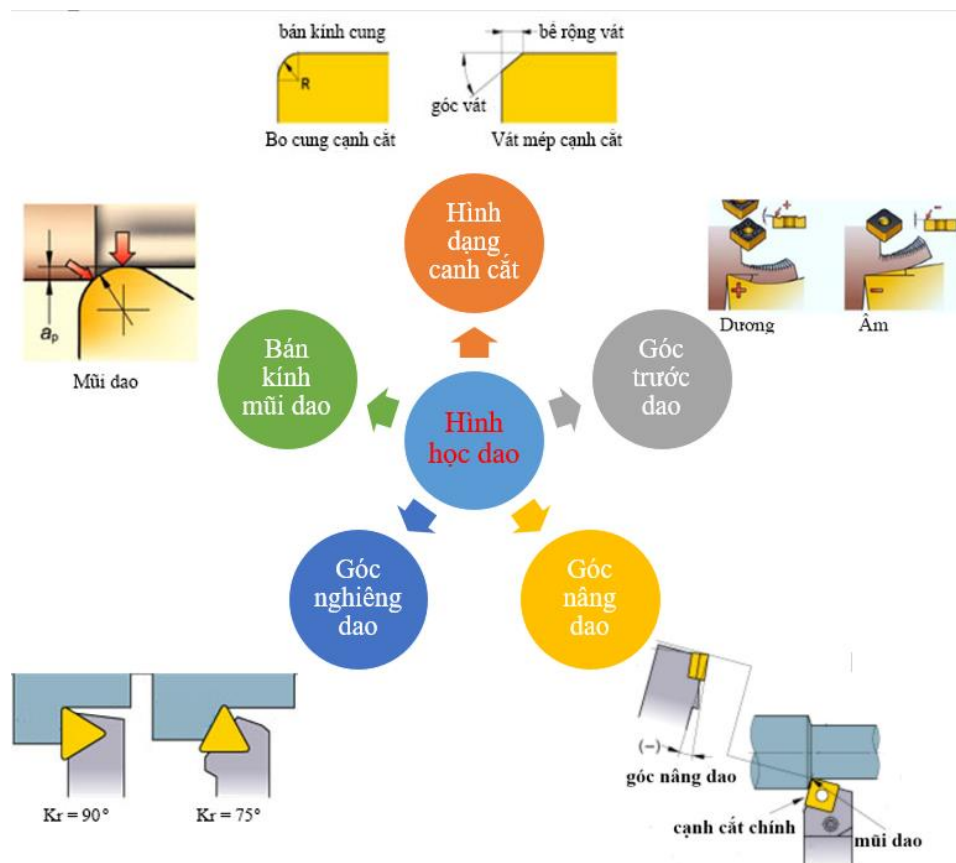
Cubic Boron Nitride (CBN), được phát triển lần đầu vào cuối những năm 1950, là một trong những vật liệu cứng nhất hiện nay và thường được sử dụng trong gia công như một dụng cụ cắt siêu cứng. CBN có cấu trúc tinh thể lập phương giống với kim cương. Tuy nhiên, chúng có các đặc tính rất khác biệt; ví dụ, kim cương rất dễ bị grafit hóa và oxy hóa khi tiếp xúc với không khí, đồng thời phản ứng với kim loại ở nhiệt độ cao. Ngược lại, CBN có độ ổn định cao hơn ở nhiệt độ cao và ít phản ứng với kim loại, cho phép gia công hiệu quả hơn đối với các phôi kim loại như thép dụng cụ, gang xám và các hợp kim cứng. Nghiên cứu cho thấy gia công bằng CBN hiệu quả với phôi cứng trên 48 HRC, cho chất lượng bề mặt tốt và giảm mài mòn dụng cụ. Tuổi thọ dụng cụ CBN thường cao hơn dao cacbit siêu kết và gốm, mặc dù chi phí cao hơn. Gia công khô được khuyến nghị để tránh nứt do sốc nhiệt [75].

d. Mảnh dao Polycrystalline Cubic Boron Nitride (PCBN)

PCBN là vật liệu composite từ hạt CBN và chất kết dính, tạo thành bằng phương pháp thiêu kết [76]. Có hai loại PCBN: CBN-H (hàm lượng CBN cao, ~90% khối lượng, kết dính kim loại như coban) và CBN-L (hàm lượng CBN thấp hơn, 50–70% thể tích, kết dính gốm như TiC, TiN). Tỷ lệ CBN cao hơn mang lại độ bền và độ cứng cao hơn. Nghiên cứu [77] cho thấy CBN-H thích hợp cho tiện cứng thô, trong khi CBN-L phù hợp tiện cứng tinh.

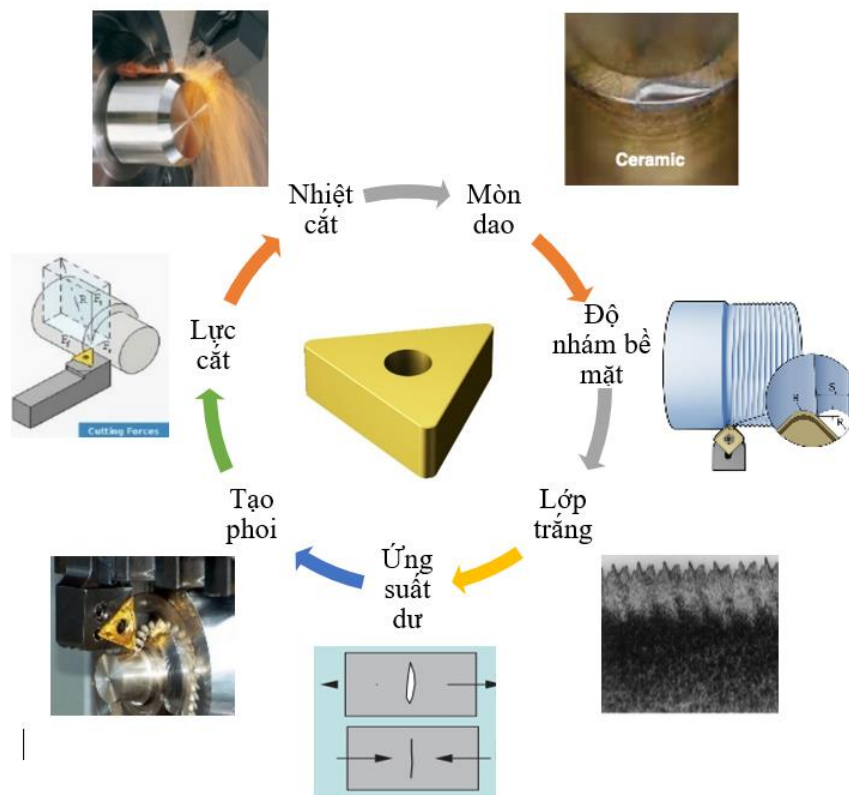
3.4.2 Hình học dao cắt cho tiện cứng

Hình học dao cắt bao gồm: góc nghiêng dao, góc trước dao, góc nâng dao, bán kính mũi dao và hình dạng cạnh cắt (Hình 3.4).



Hình 3.4 Các thông số hình học dao trong tiện cứng

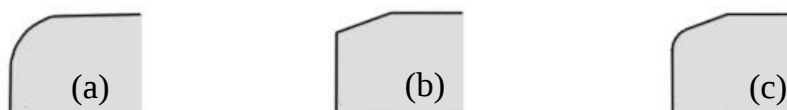
Hình học dao cắt có vai trò quan trọng trong tiện cứng, ảnh hưởng đến quá trình hình thành phoi, sinh nhiệt, lực cắt, mài mòn dao, độ nhám bề mặt, ứng suất dư và cấu trúc lớp bề mặt chi tiết, như thể hiện trong Hình 3.5.



Hình 3.5 Sự ảnh hưởng của hình học dao trong tiện cứng

Mặc dù các vật liệu dụng cụ cắt dùng trong tiện cứng có độ cứng và độ ổn định nhiệt cao, chúng thường giòn và dễ gãy. Để khắc phục, góc trước dao thường là góc âm, nhưng việc tăng giá trị góc này có thể làm tăng ứng suất nén. Hiệu quả của mảnh dao cũng phụ thuộc vào hình dạng vi mô của lưỡi cắt. Dao cắt sắc bén thông thường không đủ bền cho gia công cứng, do đó các dụng cụ cắt bằng gốm, CBN và PCBN được thiết kế với hình dạng cạnh đặc biệt thông qua quá trình chỉnh sửa cạnh cắt.

Chỉnh sửa cạnh cắt là quy trình tinh chỉnh cơ học dụng cụ cắt, có nhiều phương pháp như mài (grinding), chải (brushing), gia công laser (laser machining), tia lửa điện (electrical discharge machining) [78]. Có ba loại hình dạng cạnh cắt cơ bản: bo cung, vát mép, và kết hợp bo cung - vát mép (Hình 3.6).



Hình 3.6 Các kiểu hình dạng của cạnh cắt trong tiện cứng [74]

(a) Cạnh cắt bo cung; (b) Cạnh cắt vát mép; (c) Cạnh cắt bo cung-vát mép

3.5 Các thông số công nghệ (chế độ cắt) trong tiện cứng

Tốc độ cắt (v) là tốc độ tổng hợp của tốc độ vòng của chi tiết gia công và tốc độ của chuyển động chạy dao. Tuy nhiên trong thực tế tốc độ của chuyển động chạy dao thường rất nhỏ so tốc độ vòng của chi tiết gia công nên thường bỏ qua. Vậy công thức gần đúng để tính vận tốc cắt như sau:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{100} (m/ph) \quad (3.1)$$

Trong đó:

- D : đường kính chi tiết gia công (mm)
- n : số vòng quay của chi tiết trong một phút (vòng/phút)

Lượng chạy dao (f) là khoảng dịch chuyển của dao theo phương chuyển động chạy dao sau một vòng quay của chi tiết gia công, đơn vị (mm/vòng).

Chiều sâu cắt (d_w) là khoảng cách giữa bề mặt đã gia công và bề mặt chưa gia công.

$$d_w = \frac{D - d}{2} (mm) \quad (3.2)$$

Trong đó:

- D : đường kính chi tiết trước khi gia công (mm)
- d : đường kính chi tiết sau khi gia công (mm)

3.6 Các chỉ tiêu kinh tế-kỹ thuật trong tiện cứng

3.6.1 Năng suất gia công (Material Removal Rate-MRR)

Năng suất gia công, hay tốc độ cắt bỏ vật liệu, được định nghĩa là thể tích vật liệu được cắt bỏ trên một đơn vị thời gian, được thể hiện qua phương trình (3.3). Đây là một chỉ số quan trọng đối với các nhà sản xuất, với mục tiêu tăng năng suất một cách hiệu quả mà không làm suy giảm các yếu tố khác của quá trình gia công. Trong đó, vận tốc cắt ảnh hưởng nhiều nhất đến MRR, tiếp theo là bước tiến dao và chiều

sâu cắt. Do đó, nếu muốn tăng năng suất, cần tăng cả ba thông số cắt này. Tuy nhiên, các thông số cắt cũng có giới hạn, vì chúng ảnh hưởng đến tuổi thọ dao, độ mòn dao, chất lượng bề mặt, lực cắt, nhiệt cắt, v.v.

$$MRR = f \cdot v \cdot d_w \text{ (mm}^3\text{/phút)} \quad (3.3)$$

Trong đó:

- f : bước tiến dao (mm/vòng)
- v : vận tốc cắt (m/phút)
- d_w : chiều sâu cắt (mm)

3.6.2 Chi phí sản xuất trong tiện cứng

Chi phí sản xuất là một tiêu chí kinh tế quan trọng để đánh giá hiệu quả của quá trình sản xuất. Tuổi thọ dao là yếu tố then chốt cần xem xét khi lựa chọn dụng cụ cắt, vì nó ảnh hưởng trực tiếp đến chi phí sản xuất. Trong tiện cứng, chi phí liên quan đến dao cắt thường chiếm tỷ lệ lớn nhất. Do đó, việc lựa chọn vật liệu dao, các thông số hình học dao và chế độ cắt phải được xem xét kỹ lưỡng, phù hợp với yêu cầu của quá trình tiện cứng.

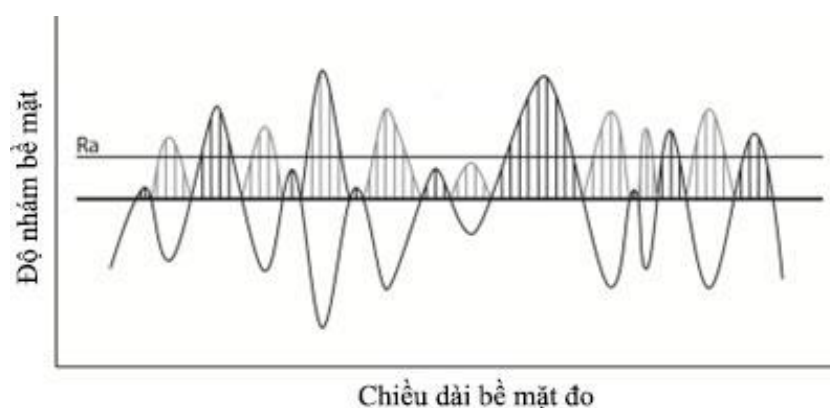
3.6.3 Độ nhám bề mặt (R_a)

Chất lượng bề mặt gia công được đánh giá trên hai khía cạnh: (1) hình dạng (profile) bề mặt, phản ánh cấu trúc lớp ngoài cùng của chi tiết, và (2) các biến đổi luyện kim bề mặt trong lớp vật liệu ngay bên dưới bề mặt gia công. Hai khía cạnh này chủ yếu được xác định thông qua các đại lượng như độ nhám bề mặt, ứng suất dư và lớp trắng (white layer). Các đặc tính này chịu ảnh hưởng của chế độ gia công, hình học và vật liệu dụng cụ cắt, như minh họa trong Hình 3.7.



Hình 3.7 Ảnh hưởng của thông số gia công và dụng cụ cắt đến chất lượng của bề mặt gia công trong tiện cứng

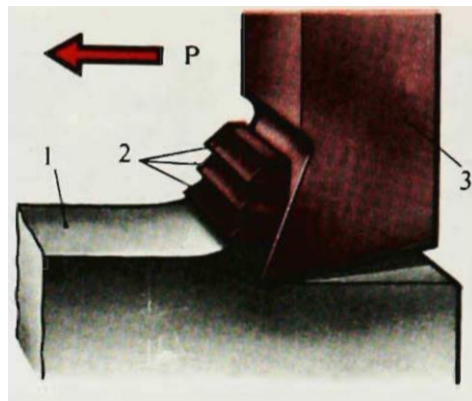
Trong đánh giá chất lượng bề mặt gia công, độ nhám bề mặt là một yêu cầu quan trọng trong công nghiệp, vì nó ảnh hưởng đến độ chính xác kích thước và tính chất làm việc của chi tiết. Độ nhám bề mặt (R_a) thường được sử dụng rộng rãi để đánh giá chất lượng bề mặt gia công. R_a là giá trị trung bình cộng của các giá trị độ lệch (theo giá trị tuyệt đối) của biên dạng bề mặt so với đường trung bình (Hình 3.8). Đây là một thông số dễ xác định, dễ đo lường và cung cấp mô tả tổng quát tốt nhất về sự thay đổi độ cao trên bề mặt. Đơn vị của R_a thường là micromet (μm).



Hình 3.8 Độ nhám bề mặt R_a

3.7 Cơ chế hình thành phoi khi tiện cứng

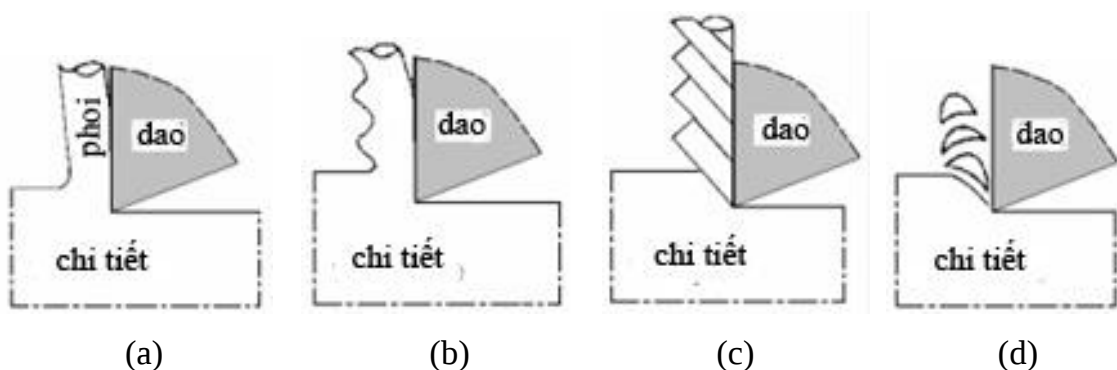
Trong quá trình cắt gọt, phần cắt của dao có hình dạng như một nêm. Dưới tác dụng của lực cơ học từ máy, dao sẽ cắt sâu vào lớp bề mặt của phôi và nén chặt lớp vật liệu này. Tại vùng bị nén, ứng suất bên trong vật liệu tăng lên. Khi dao tiếp tục tiến sâu, ứng suất bên trong vượt quá giới hạn bền liên kết giữa các phần tử kim loại, khiến chúng trượt theo mặt cắt và di chuyển trên mặt trước của dao. Sự chuyển động liên tục của dao theo chiều tiến sẽ hình thành phoi thông qua quá trình nén, trượt và dịch chuyển các phần tử kim loại kế tiếp (Hình 3.9).



Hình 3.9 Quá trình tạo phoi [79]

1. Phôi; 2. Phoi; 3. Dao

Tùy theo điều kiện gia công và vật liệu của phôi, sẽ tạo thành các loại phoi khác nhau như Hình 3.10 [80].

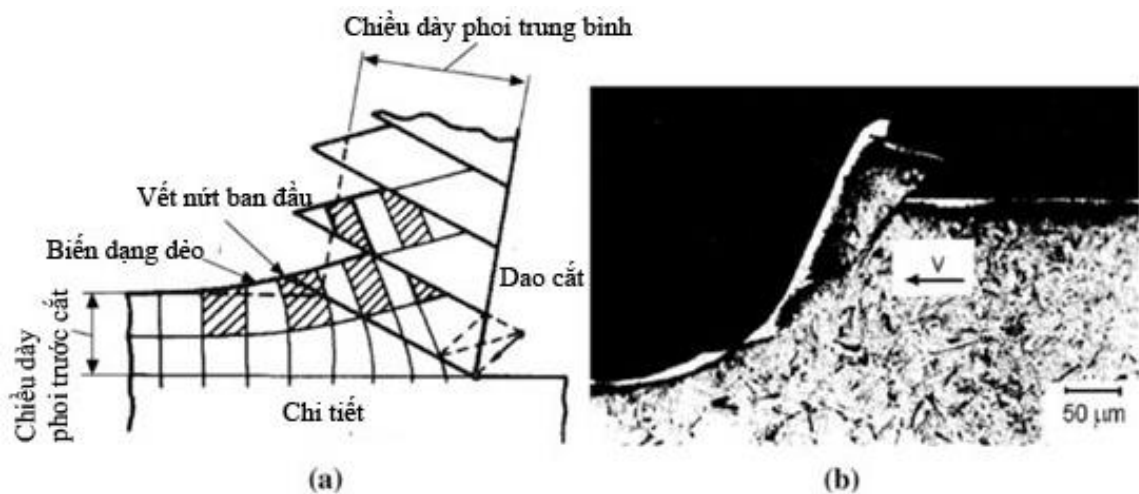


Hình 3.10 Các dạng phoi trong gia công tiện [80]

(a) Phoi dây; (b) Phoi lượn sóng; (c) Phoi răng cưa; (d) Phoi vụn

Một hiện tượng đặc trưng trong tiện cứng là sự hình thành phoi răng cưa. Nghiên cứu cơ chế tạo phoi răng cưa là bước quan trọng để hiểu rõ hơn về cách các điều kiện cắt khác nhau dẫn đến sự hình thành loại phoi này. Có hai lý thuyết phổ biến giải thích sự xuất hiện của phoi răng cưa: lý thuyết của Shaw và cộng sự [80], và lý thuyết của Davies và cộng sự [81]. Theo Shaw, sự khởi phát và lan truyền vết nứt gây ra phoi răng cưa. Trong khi đó, Davies cho rằng quá trình cắt đoạn nhiệt (adiabatic shear) là nguyên nhân chính.

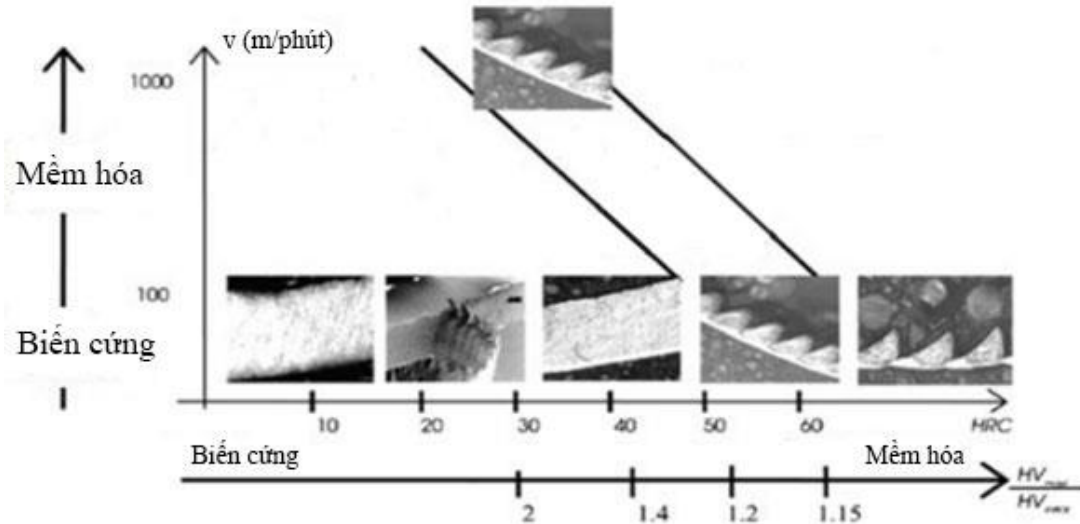
Lý thuyết vết nứt ban đầu cho rằng ứng suất lệch, tồn tại trong quá trình gia công, gây ra các vết nứt trên bề mặt tự do của phôi gần vùng cắt do biến dạng dẻo nén lớn. Sau khi khởi phát, vết nứt lan dọc theo mặt phẳng cắt về phía dao cho đến khi ứng suất nén trên mặt phẳng này đạt giá trị tới hạn. Trong giai đoạn này, phoi răng cưa có xu hướng trượt trên mặt trước dao. Khi vết nứt cũ ổn định, một vết nứt mới hình thành và chu trình lặp lại. Hình 3.11 minh họa cơ chế tuần hoàn của quá trình hình thành phoi răng cưa do vết nứt khởi phát ban đầu.



Hình 3.11 Sự hình thành phoi răng cưa [82]

Lý thuyết đoạn nhiệt cho rằng khi dao bắt đầu cắt vào phôi, một trường ứng suất tổng thể được hình thành. Khi ứng suất cắt đạt mức cực đại, vật liệu bắt đầu chảy và nhiệt sinh ra do biến dạng dẻo sẽ thoát khỏi vùng cắt chính. Kết quả là giới hạn chảy giảm do vật liệu bị mềm hóa bởi nhiệt [81]. Hình 3.12 thể hiện tương quan giữa sự mềm hóa nhiệt và độ cứng theo nghiên cứu của Poulachon và cộng sự [83]. Nghiên

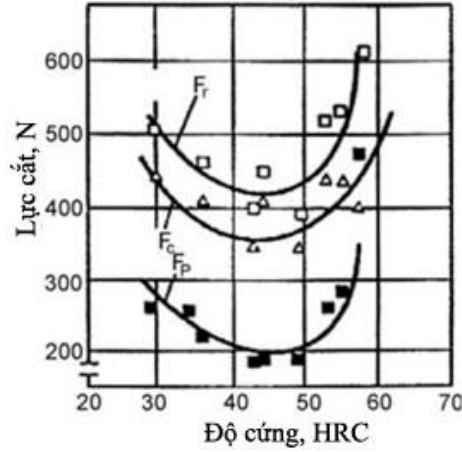
cứu cho thấy các thông số quan trọng ảnh hưởng đến sự hình thành phoi răng cưa là độ cứng của phôi và tốc độ cắt. Khi độ cứng tăng lên khoảng 53 HRC, vết nứt bắt đầu xuất hiện.



Hình 3.12 Sự thay đổi hình dáng phoi với độ cứng chi tiết gia công [83]

3.8 Lực cắt trong tiện cứng

Tiện cứng được thực hiện trong các điều kiện công nghệ và cơ - nhiệt đặc thù. Các cơ chế liên quan đến quá trình cắt (hình thành phoi, sinh nhiệt, mài mòn dụng cụ) về cơ bản khác biệt so với gia công các vật liệu thông thường. Để tránh mẻ dao khi gia công vật liệu cứng, cạnh cắt thường được vát mép từ -20° đến -25° , tạo góc trước hiệu dụng lớn, dẫn đến ứng suất cao trong vùng lân cận lưỡi cắt [84]. Từ Hình 3.13, có thể quan sát thấy lực cắt tăng khi gia công vật liệu có độ cứng trên 45 HRC, thường được xem là giới hạn dưới của gia công cứng.



Hình 3.13 Ảnh hưởng của độ cứng đến lực cắt [85]

Theo Chryssolouris [86], sự thay đổi lực cắt theo độ cứng chi tiết gia công có thể được giải thích bởi sự gia tăng ứng suất chảy khi độ cứng tăng, đồng thời giảm khi nhiệt cắt sinh ra làm mềm vật liệu. Nakayama và cộng sự [82] chỉ ra rằng thành phần hướng kính của lực cắt lớn hơn lực tiếp tuyến, và sự khác biệt này tăng đáng kể khi mặt sau dao bị mòn.

Để xác định lực cắt trong tiện cứng, có thể áp dụng các mô hình lực cắt được đề xuất trong [87], [88] hoặc mô hình lực cắt tổng quát của Altintas [89]. Theo đó, lực cắt được chia thành hai thành phần: lực cắt kim loại (metal shear force) và lực cắt cạnh (edge force), tức lực do tiếp xúc giữa mặt sau dao và bề mặt gia công.

$$\begin{aligned} F_t &= K_{tc}bh + K_{te}b \\ F_f &= K_{fc}bh + K_{fe}b \\ F_r &= K_{rc}bh + K_{re}b \end{aligned} \quad (3.4)$$

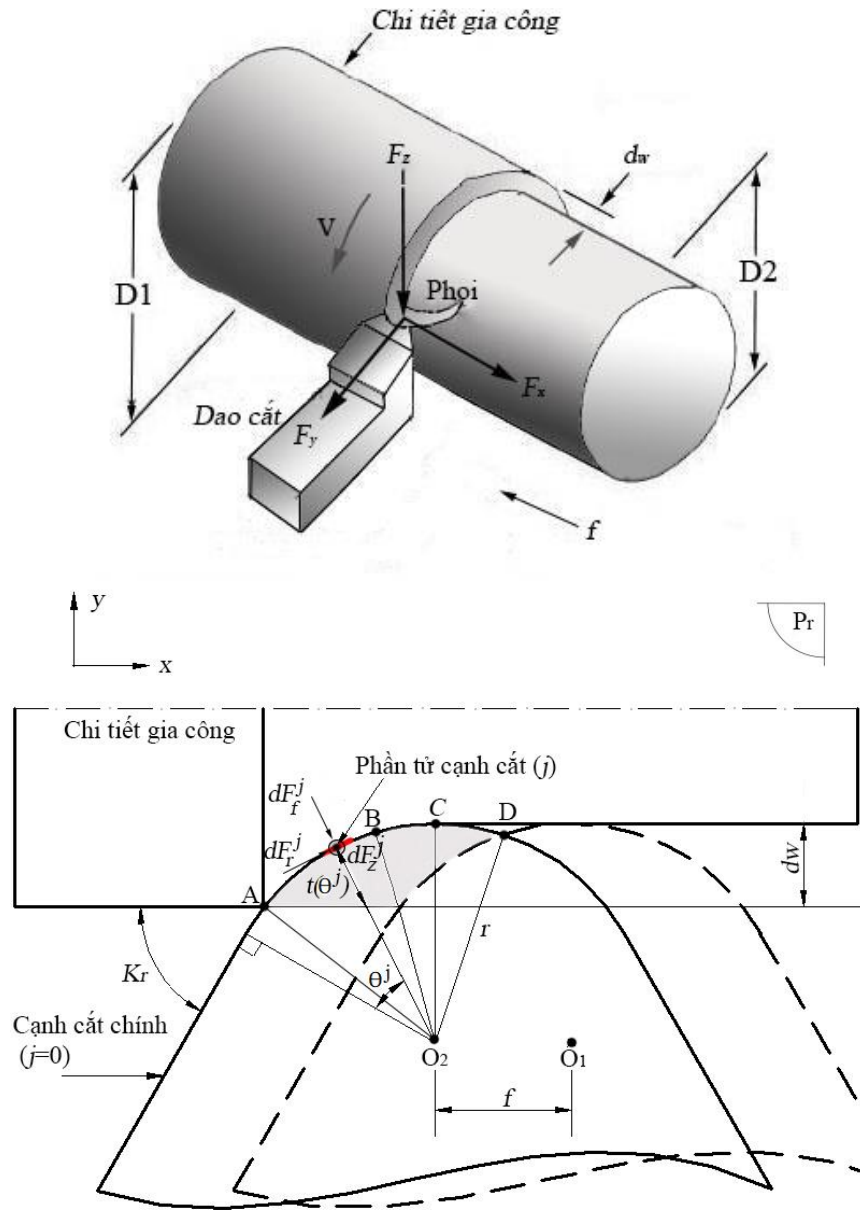
Trong đó, F_t , F_f và F_r lượt là các lực tiếp tuyến, lực tiến dao và lực hướng kính; K_{tc} , K_{fc} , K_{rc} là các hệ số lực cắt theo ba phương tương ứng, K_{te} , K_{fe} , K_{re} là hệ số lực cắt cạnh được xác định bằng các thí nghiệm cắt; b là chiều rộng vết cắt (chiều dài cạnh) và h là chiều dày lớp cắt.

$$K_{tc} = \frac{\tau_s}{\sin\phi_n} \frac{\cos(\beta_n - \gamma_n) + \tan\lambda_s \tan\eta \sin\beta_n}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \gamma_n) + \tan^2\eta \sin^2\beta_n}}$$

$$K_{fc} = \frac{\tau_s}{\sin\phi_n \cos\lambda_s} \frac{\sin(\beta_n - \gamma_n)}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \gamma_n) + \tan^2\eta \sin^2\beta_n}} \quad (3.5)$$

$$K_{rc} = \frac{\tau_s}{\sin\phi_n} \frac{\cos(\beta_n - \gamma_n) \tan\lambda_s - \tan\eta \sin\beta_n}{\sqrt{\cos^2(\phi_n + \beta_n - \gamma_n) + \tan^2\eta \sin^2\beta_n}}$$

Trong quá trình tiện cứng, chỉ có bán kính mũi dao tham gia vào quá trình cắt, khiến chiều dày lớp cắt thay đổi liên tục. Thông số hình học góc dao của các phần tử cạnh cắt cũng thay đổi tương ứng. Do đó, để đánh giá chính xác, mũi dao thường được chia thành các phần tử nhỏ với gia số góc $d\theta$ (Hình 3.14).



Hình 3.14 Sơ đồ nguyên lý lực cắt trong tiện cứng

Bằng cách áp dụng mô hình lực cắt cho mỗi phần tử cạnh cắt, ta có lực tiếp tuyến (dF_t), lực hướng kính (dF_r) và lực tiến dao (dF_f) tác dụng lên phần tử cạnh cắt như sau:

$$\begin{aligned}dF_t &= dF_{tc} + dF_{te} \\dF_r &= dF_{rc} + dF_{re} \\dF_f &= dF_{fc} + dF_{fe}\end{aligned}\tag{3.6}$$

Các lực cạnh được xem như tương tự các lực tìm thấy trong thử nghiệm cắt trực giao. Thành phần hướng kính của lực cạnh được giả định bằng không ($dF_{re} = 0$).

Lực cắt theo các phương x, y, z của máy tiện có thể được xác định từ các thành phần lực theo hướng tiếp tuyến, hướng kính và tiến dao, thông qua quan hệ:

$$\begin{aligned}dF_z &= dF_t \\dF_y &= -dF_r \sin(K_r - \theta^j) + dF_f \sin(K_r - \theta^j) \\dF_x &= dF_r \cos(K_r - \theta^j) + dF_f \sin(K_r - \theta^j)\end{aligned}\tag{3.7}$$

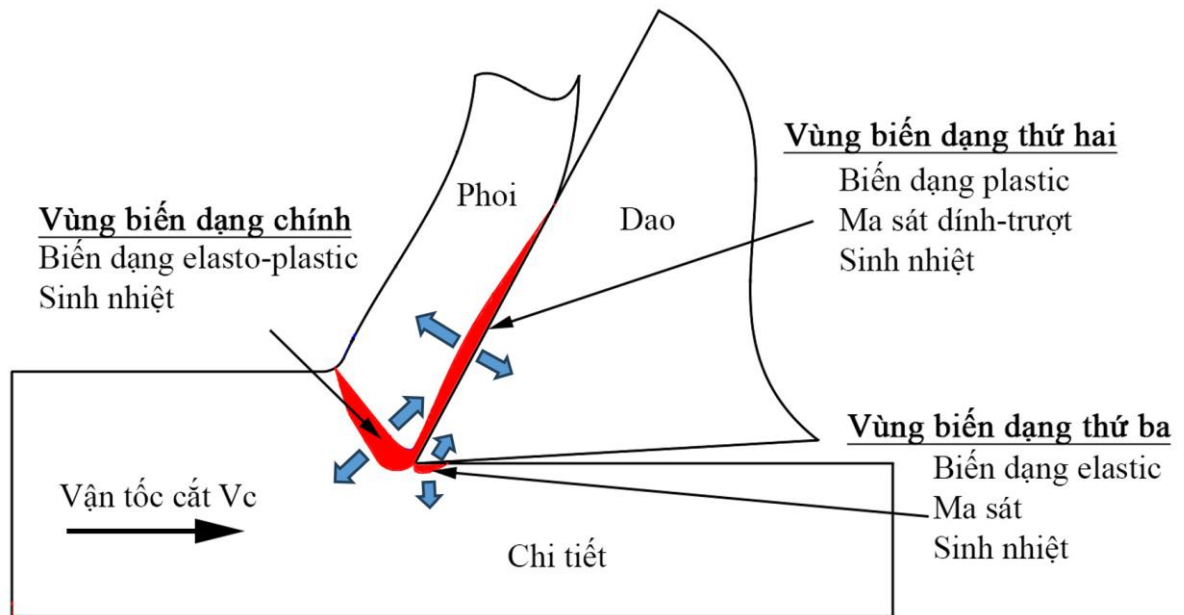
Tổng lực cắt theo mỗi phương x, y, z như sau:

$$F_q = \sum_{j=1}^k dF_q, \quad q = x, y, z\tag{3.8}$$

3.9 Nhiệt cắt khi tiện cứng

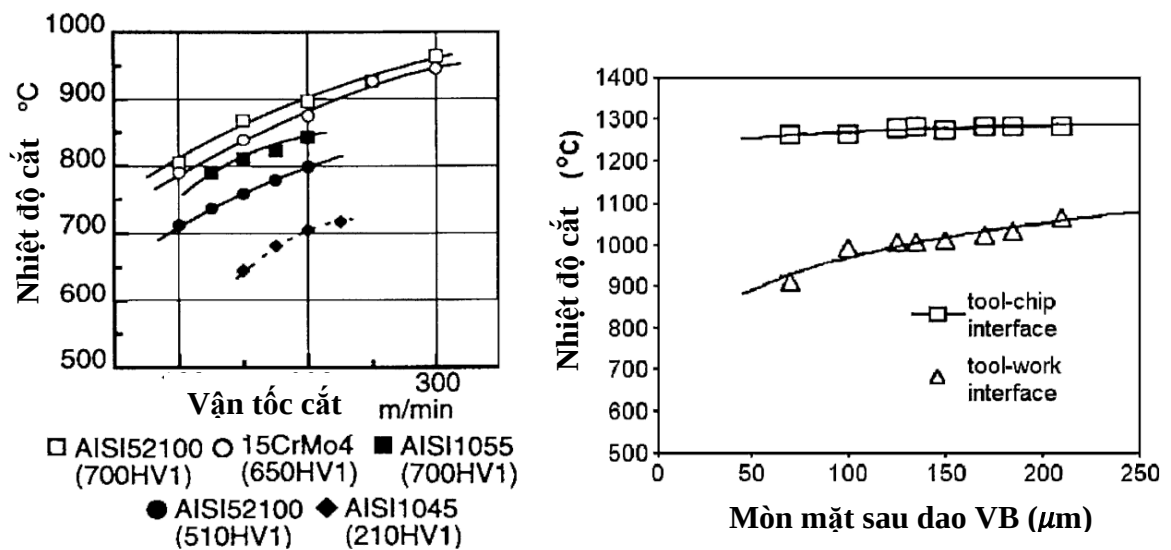
Phần lớn năng lượng từ lực cắt trong quá trình gia công được chuyển hóa thành nhiệt năng [90] như trong Hình 3.15. Nhiều yếu tố ảnh hưởng đến quá trình sinh nhiệt trong cắt kim loại, bao gồm đặc tính vật lý và hóa học của vật liệu chi tiết gia công và vật liệu dụng cụ cắt, cũng như các thông số chế độ cắt và hình học dụng cụ cắt [91]. Nhiệt độ cao trong vùng cắt, dao động trong khoảng 800 đến 1200 °C, tác động tiêu cực đến độ bền, độ cứng và khả năng chống mòn của dụng cụ cắt [92]. Ngoài ra, nhiệt độ quá cao còn làm giảm khả năng kiểm soát độ chính xác kích thước và duy trì chất

lượng bề mặt mong muốn, dẫn đến chi phí gia công tăng và chất lượng sản phẩm giảm [93].



Hình 3.15 Quá trình sinh nhiệt và thoát nhiệt trong tiện

Hình 3.16 (a) cho thấy nhiệt độ mặt sau dao gần vùng lân cận cạnh cắt tăng lên khi tăng vận tốc cắt và độ cứng của vật liệu gia công [94]. Trong phạm vi gia công cứng, độ cứng vật liệu tăng làm tăng lực cắt, từ đó làm tăng năng lượng cắt và dẫn đến nhiệt độ tăng cao [67].



Hình 3.16 Ảnh hưởng của độ cứng, vận tốc cắt và mòn dao đến nhiệt cắt:
(a) Ảnh hưởng vật liệu gia công và tốc độ cắt đến nhiệt cắt [94]; (b) Ảnh hưởng của mòn dao đến nhiệt cắt thép AISI 52100 [95]

Wang và Liu đã chỉ ra rằng mài mòn mặt sau dao là nguyên nhân chính gây ra hư hỏng do nhiệt ở lớp dưới bề mặt chi tiết khi gia công vật liệu cứng [95]. Nhiệt độ lớn nhất tại bề mặt tiếp xúc dao-chi tiết tăng lên khi xảy ra mòn mặt sau, đạt khoảng 1150°C đối với $VB = 200\text{ }\mu\text{m}$, trong khi nhiệt độ tại vùng tiếp xúc dao-phoi vẫn tương đối ổn định ở mức khoảng 1300°C như thể hiện ở Hình 3.16 (b).

3.10 Mài mòn dao và cơ chế mài mòn trong tiện cứng

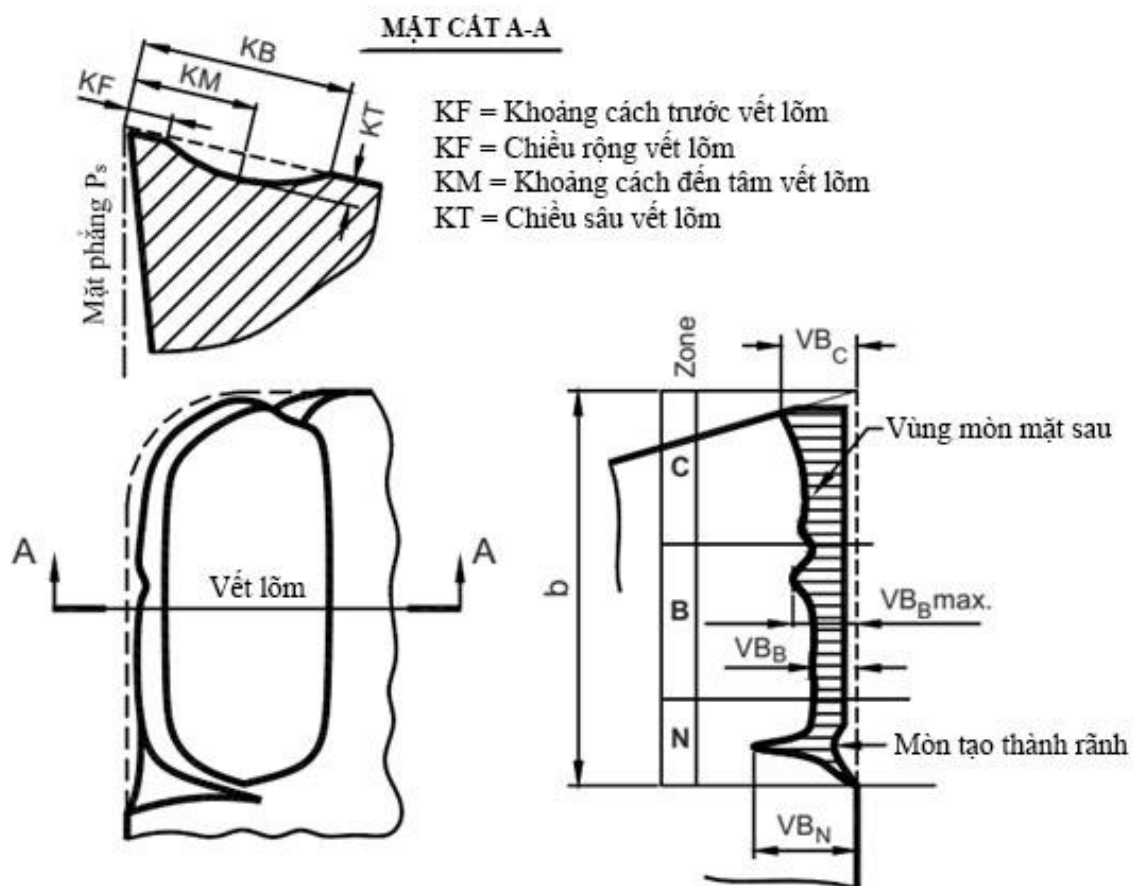
Trong quá trình gia công, dụng cụ cắt có thể bị hỏng do mài mòn, gãy, nứt mẻ hoặc biến dạng dẻo. Tuy nhiên, các hư hỏng như gãy, nứt mẻ hay biến dạng dẻo có thể được hạn chế thông qua việc lựa chọn đúng vật liệu dao, thiết kế hình học dụng cụ cắt và điều kiện cắt thích hợp. Sự phức tạp của quá trình tiện cứng, bao gồm nhiệt độ cao và ứng suất lớn trong vùng cắt, dẫn đến cơ chế mài mòn trở nên phức tạp, thường liên quan đồng thời đến các yếu tố hóa học, cơ học và nhiệt. Trong tiện cứng, một hoặc nhiều cơ chế mài mòn có thể đồng thời xảy ra [76], [77], [96]. Các cơ chế mài mòn dụng cụ cắt cơ bản gồm:

Mài mòn khuếch tán (Diffusion wear): Do nhiệt độ cao tại vùng tiếp xúc, các nguyên tử trong hai vật liệu (dao và phôi) trở nên không ổn định và khuếch tán sang vật liệu đối diện, nơi nồng độ nguyên tử tương ứng thấp hơn. Sự khuếch tán liên tục của vật liệu dao vào phôi gây ra mài mòn, phụ thuộc vào điều kiện hòa tan và nhiệt độ cắt. Trong PCBN, pha kết dính là thành phần dễ bị mài mòn nhất [77].

Mài mòn bám dính (Adhesion wear): Dưới áp suất và nhiệt độ cao, bề mặt phoi có thể dính vào mặt trước của dụng cụ, tạo ra “mỏi hàn” vì mô đun vật liệu phôi có ái lực luyện kim cao. Lớp vật liệu bám dính này không ổn định, khi bong ra sẽ kéo theo những mảnh vật liệu dụng cụ cắt, gây ra mài mòn bám dính. Loại mài mòn này thường gặp khi gia công hợp kim nhôm trong điều kiện cắt khô hoặc gần khô, nhưng ít phổ biến trong gia công cứng.

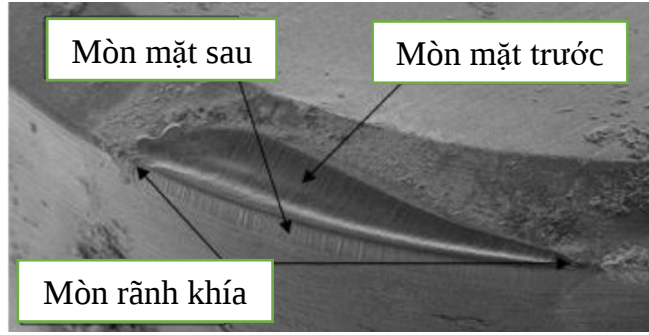
Mài mòn cơ học (Abrasion wear): Mùi mòn cơ học xảy ra do ma sát giữa mặt trước dụng cụ cắt với phoi và giữa mặt sau dụng cụ cắt với bề mặt gia công. Cơ chế này chủ yếu chịu ảnh hưởng của độ cứng vật liệu gia công, liên quan chặt chẽ đến độ cứng, hình dạng và mật độ phân bố các hạt cứng như oxide, carbide, nitride, martensite, austenite [97].

Các dạng mài mòn chủ yếu quan sát được trong tiện cứng gồm mài mòn mặt sau, mài mòn mặt trước (vết lõm), mài mòn khía, sứt mẻ và nứt do sốc nhiệt [77]. Trong đó, mòn do sứt mẻ và nứt do sốc nhiệt có thể giảm thiểu khi kiểm soát chặt chẽ điều kiện gia công. Hình 3.17 thể hiện các dạng mòn dao theo tiêu chuẩn ISO 3685.



Hình 3.17 Các dạng mòn dao theo tiêu chuẩn ISO 3685

Hình 3.18 minh họa các dạng mài mòn điển hình trong quá trình gia công vật liệu cứng bằng dao CBN.



Hình 3.18 Các dạng mòn dao trong tiện cứng [98]

Mòn mặt sau (Flank wear):

Mòn mặt sau xảy ra trên mặt sau dụng cụ cắt, đặc trưng bởi chiều rộng vết mòn (VB). Trong tiện cứng, do độ cứng cao của vật liệu gia công, mài mòn cơ học là cơ chế mòn chính khi mặt sau dao cọ xát với bề mặt gia công do hiện tượng đàn hồi (spring-back) của vật liệu gia công [76], [77]. Mòn mặt sau ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt và giảm độ chính xác gia công.

Để phân tích tốc độ mài mòn mặt sau, các mô hình toán học đã được áp dụng. Huang và cộng sự đã phát triển mô hình mài mòn cho dao CBN có cạnh cắt vát mép khi tiện cứng [99]. Tốc độ cắt (V_c), độ cứng hạt mài (P_a), ứng suất cắt pháp tuyến (σ) và độ cứng dụng cụ cắt (P_t) có ảnh hưởng lớn đến độ mòn mặt sau. Ngoài ra, tốc độ mài mòn dụng cụ phụ thuộc các thông số hình học dao như bán kính mũi dao (r) và góc sau dao (α). Mài mòn cơ học và bám dính đều có đóng góp đáng kể vào mài mòn mặt sau dụng cụ cắt trong gia công vật liệu.

Tốc độ mài mòn mặt sau (dVB/dt) được tính như sau:

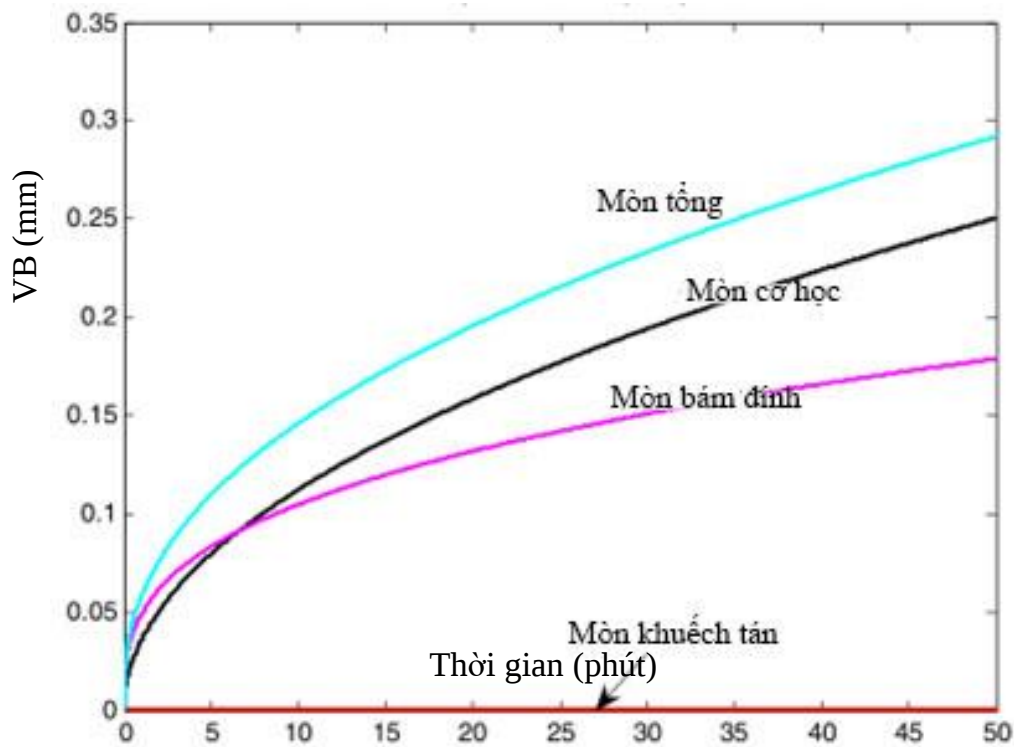
$$\frac{dVB}{dt} = \frac{(\cot \alpha + \tan \gamma)r}{[VB(r - VB \tan \alpha)]} \left\{ K_{\text{abrasion}} K \left(\frac{P_a^{n-1}}{P_t^n} \right) V_c VB \sigma + K_{\text{adhesion}} e^{aT} V_c \sigma + K_{\text{diff}} \sqrt{V_c VB} e^{-\frac{K_Q}{T+273}} \right\} \quad (3.9)$$

Trong đó, K_{diff} , K_Q , K_{adhesion} , K_{abrasion} , a là các hệ số hiệu chỉnh bằng thực nghiệm cho các loại dụng cụ cắt và vật liệu phôi khác nhau. Các tác giả so sánh mô hình toán đề xuất với kết quả thực nghiệm cho thấy độ tương đồng cao.

Mô hình toán khác về mòn dao do Singh và cộng sự [100] phát triển cho dao gổm cũng xét đến ảnh hưởng của tốc độ cắt (v), độ cứng hạt mài (P_a), lực pháp tuyến (N) và độ cứng dụng cụ (P_t) khi tiện cứng:

$$\frac{dh_f}{dt} = \left(\frac{K_2 v N}{K b \phi h_f} \right) \left(\frac{P_a^{n-1}}{P_t^n} \right) + \left(\frac{K_3 N^{m_1} v}{b \phi h_f^2} \right) + \left(\frac{K_4}{\phi} \right) \left(\sqrt{\frac{v}{h_f \frac{Q}{k T_f}}} \right) \quad (3.10)$$

Hình 3.19 thể hiện sự thay đổi độ mòn mặt sau theo thời gian ở điều kiện $v = 100$ m/phút, $f = 0.12$ mm/vòng, $d_w = 1.2$ mm, góc vát mép 26° .

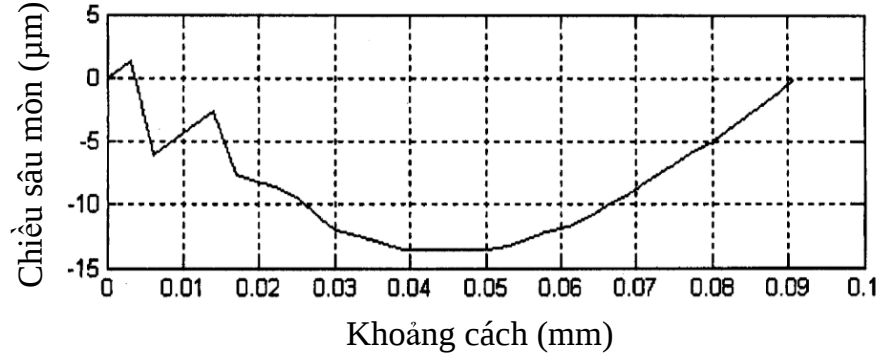


Hình 3.19 Độ mòn dao mặt sau với thời gian [100]

Mòn mặt trước (Crater wear):

Mòn mặt trước (KT) xảy ra trên mặt trước dụng cụ, thường không ảnh hưởng nhiều đến tuổi thọ dao trừ khi quá mức, dẫn đến biến dạng hoặc gãy dụng cụ, làm yếu lưỡi cắt. Tuy nhiên, lực cắt có xu hướng giảm khi mài mòn mặt trước tăng [97]. Tại vùng tiếp xúc giữa mặt trước dao và phoi, dao chịu ma sát dưới áp suất và nhiệt độ cao, gây ra mài mòn cơ học, bám dính và khuếch tán, hoặc đồng thời cả ba cơ chế.

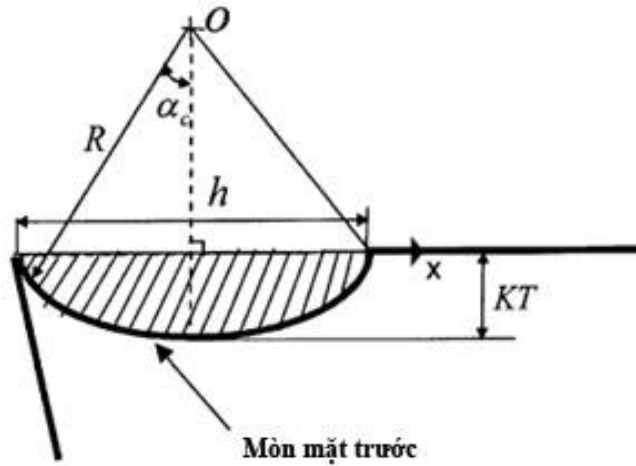
Hình 3.20 thể hiện biên dạng vết lõm mặt trước của dao CBN theo chiều dài tiếp xúc lớn nhất, được đo từ lưỡi cắt sau 66 phút cắt ở điều kiện $v = 1.52 \text{ m/s}$, $f = 0.076 \text{ mm/vòng}$ và $d_w = 0.102 \text{ mm}$.



Hình 3.20 Biên dạng vết lõm mặt trước dao CBN [101]

Huang và cộng sự đã phát triển mô hình toán lý thuyết liên quan đến mài mòn mặt trước dao CBN khi tiện cứng, so sánh với nhiều điều kiện cắt khác nhau [101]. Kết quả cho thấy mài mòn khuếch tán, bám dính và cơ học ảnh hưởng đến mài mòn mặt trước. Các yếu tố như hình học dao, thông số cắt, vật liệu dao và phôi đều tác động đến độ mòn mặt trước. Tốc độ mòn mặt trước dao được thể hiện như sau:

$$\frac{dK_T}{dt} = \left(\begin{array}{l} K_{abrasion} K \left(\frac{P_a^{n-1}}{P_t^n} \right) V_{chip} h \sigma + \\ K_{adhesion} e^{aT} V_c h \sigma + K_{diff} \sqrt{V_c V_{be}} e^{-K \frac{Q}{T+273}} \end{array} \right) / D(K_T) \quad (3.11)$$



Hình 3.21 Mối quan hệ hình học của vết lõm mặt trước dao [101]

Dựa vào Hình 3.21, mối quan hệ giữa chiều dài tiếp xúc h , chiều sâu mài mòn KT và bán kính R như sau:

$$R^2 = \left(\frac{h}{2}\right)^2 + (R - KT)^2 \quad (3.12)$$

Mòn rãnh khía (Notch wear):

Mòn rãnh khía là dạng mòn đặc biệt xuất hiện tại vị trí lưỡi cắt giao nhau với bề mặt chi tiết, kết hợp mòn mặt sau và mặt trước. Dạng mòn này thường xảy ra khi gia công các vật liệu cứng hoặc vật liệu có lớp bề mặt cứng, do mài mòn cơ học giữa dụng cụ cắt và chi tiết.

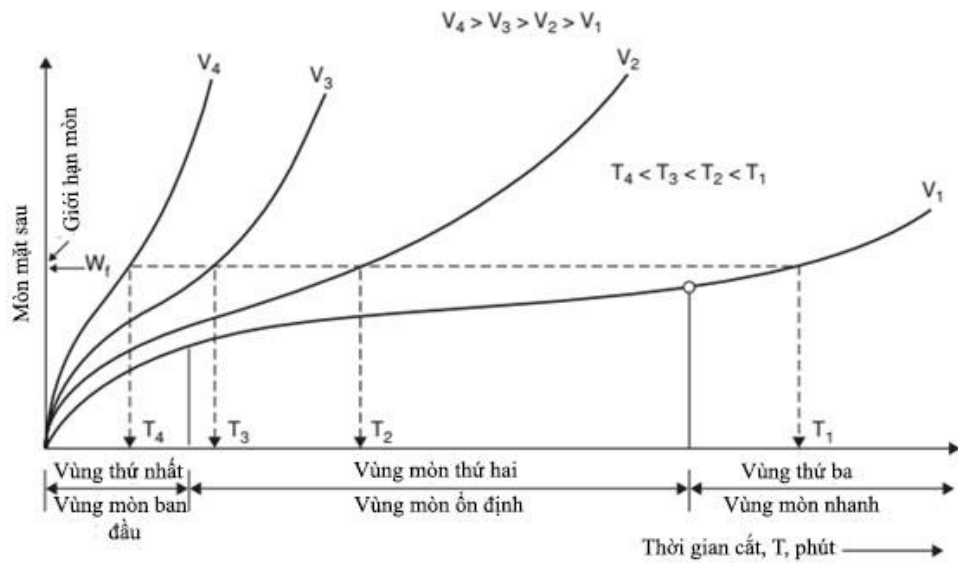
3.11 Tuổi thọ dao trong tiện cứng

Tuổi thọ dao là thời gian sử dụng hữu ích của dụng cụ cắt, ký hiệu là T (phút). Tuổi thọ của dao phụ thuộc vào nhiều yếu tố như vật liệu làm dao, vật liệu gia công, thông số hình học của dao, chế độ cắt, dung dịch trơn nguội, v.v.

Trong các yếu tố này, tốc độ cắt có ảnh hưởng lớn nhất đến tuổi thọ dao. Khi tốc độ cắt tăng, năng lượng tiêu hao trong quá trình cắt tăng theo, nhiệt sinh ra nhiều hơn, dẫn đến quá trình mài mòn diễn ra nhanh, làm giảm tuổi thọ dao.

Trong thực tế, độ mòn mặt sau dao (VB) thường được sử dụng để đánh giá tuổi thọ dao. Khi VB tăng, diện tích tiếp xúc giữa dao và phôi tăng, làm gia tăng ma sát, nhiệt độ và giảm chất lượng bề mặt gia công. Cuối cùng, tình trạng này có thể dẫn đến hỏng dao.

Hình 3.22 minh họa đường cong tuổi thọ dao điển hình, thể hiện sự thay đổi độ mòn dao theo thời gian dưới các tốc độ cắt khác nhau.



Hình 3.22 Đường cong tuổi thọ dao: sự thay đổi mòn dao theo thời gian với các vận tốc cắt khác nhau [46].

Độ mòn mặt sau theo thời gian gia công có thể chia thành ba giai đoạn. Ban đầu, lưỡi cắt rất sắc bị mòn nhanh ngay sau khi bắt đầu cắt. Sau đó, quá trình mài mòn dao diễn ra ổn định, gần như tuyến tính so với thời gian cắt tăng dần. Cuối cùng, khi VB đạt giá trị giới hạn, độ mòn mặt sau tăng theo cấp số nhân. Dao cắt phải được thay thế trước khi vượt quá giới hạn (VB_{lim}) để tránh hỏng dao nghiêm trọng. Thời gian cắt tương ứng với VB_{lim} được gọi là tuổi thọ dao. Taylor lần đầu tiên biểu diễn tuổi thọ dao như một hàm của các điều kiện cắt:

$$T_t = C_t V^{-p'} f^{-q'} \quad (3.13)$$

Trong đó T_t [phút] là tuổi thọ của dao, V [m/phút] là tốc độ cắt và f [mm/vòng] là lượng chạy dao. C_t , p và q là các hằng số xác định thông qua thực nghiệm cho một cặp vật liệu dao - phôi nhất định.

Tuổi thọ dao thay đổi tùy thuộc vào tiêu chí độ mòn được chọn. Trong tiện cứng, là quá trình gia công tinh, độ nhám bề mặt của sản phẩm là yếu tố quan trọng. Theo tiêu chuẩn ISO 3685 [102], tuổi thọ dao được xác định tại thời điểm dụng cụ không còn tạo ra chi tiết có chất lượng bề mặt mong muốn. Khi Ra đạt 1.6 μm (độ

nhám bề mặt tương đương với mài thông thường), thử nghiệm kết thúc. Nếu tiêu chí này không được đáp ứng, thử nghiệm kết thúc khi độ mòn mặt sau (VB) đạt 0.3 mm.

3.12 Kết luận

Nghiên cứu đã trình bày chi tiết cơ sở lý thuyết của quá trình tiện cứng, bao gồm khái niệm, đặc điểm, ứng dụng và các yếu tố ảnh hưởng chính đến quá trình này. Tiện cứng là một phương pháp hiệu quả thay thế cho mài trong gia công các chi tiết cứng (≥ 45 HRC). Quá trình tiện cứng có ưu điểm vượt trội như năng suất cao, linh hoạt và thân thiện với môi trường, nhưng cũng gặp thách thức như lực cắt xác định lớn và nhiệt độ cao gây mòn dao nhanh chóng. Vật liệu dụng cụ cắt phổ biến gồm cacbit, gốm và CBN với yêu cầu cao về độ bền nhiệt, độ cứng và khả năng chống mài mòn. Các thông số hình học dao và chế độ cắt được xác định có ảnh hưởng quyết định đến lực cắt, nhiệt độ, độ mòn dao và chất lượng bề mặt gia công. Những nội dung lý thuyết này là nền tảng quan trọng để phân tích, xây dựng mô hình toán và tối ưu hóa quá trình tiện cứng trong các chương tiếp theo của luận án.

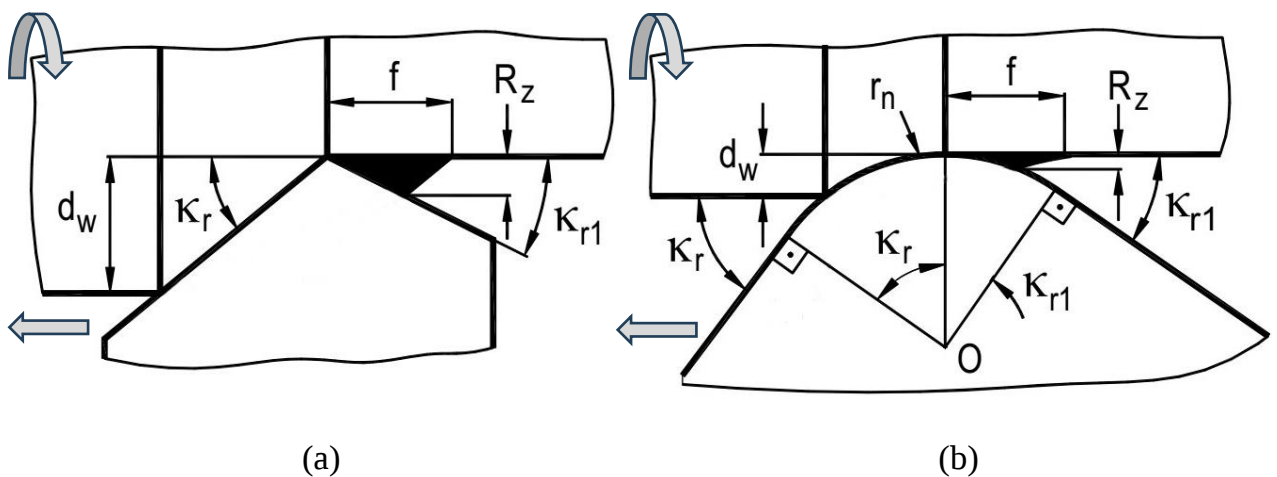
Chương 4:

MÔ HÌNH TOÁN HÌNH HỌC QUÁ TRÌNH TIỆN CỨNG

4.1 Giới thiệu chung

Quá trình tiện cứng khác biệt đáng kể so với tiện truyền thống, do đó nhiều kiến thức và lý thuyết của tiện truyền thống không thể áp dụng trực tiếp cho tiện cứng [1]. Hình 4.1(a) mô tả sơ đồ nguyên lý tiện truyền thống - một quá trình gia công thô, trong đó bán kính mũi dao tương đối nhỏ so với chiều sâu cắt. Vì vậy, chỉ cần xem xét các phần thẳng của cạnh cắt chính và cạnh cắt phụ, và mũi dao được coi như một điểm.

Ngược lại, Hình 4.1(b) mô tả sơ đồ nguyên lý tiện cứng - một quá trình gia công tinh với chiều sâu cắt và bước tiến rất nhỏ, nên chỉ phần bán kính mũi dao tham gia vào quá trình cắt ($d_w \leq r_n(1 - \cos K_r)$). Do đó, việc xác định chính xác vị trí cắt trên bán kính mũi dao, các thông số hình học góc dao cục bộ, cùng với chiều dày lớp cắt cục bộ tại các phần tử của cạnh cắt thuộc bán kính mũi dao là cần thiết. Điều này nhằm phân tích ảnh hưởng của các thông số hình học dao đến quá trình tiện cứng.



Hình 4.1 Sơ đồ nguyên lý gia công tiện [103]:

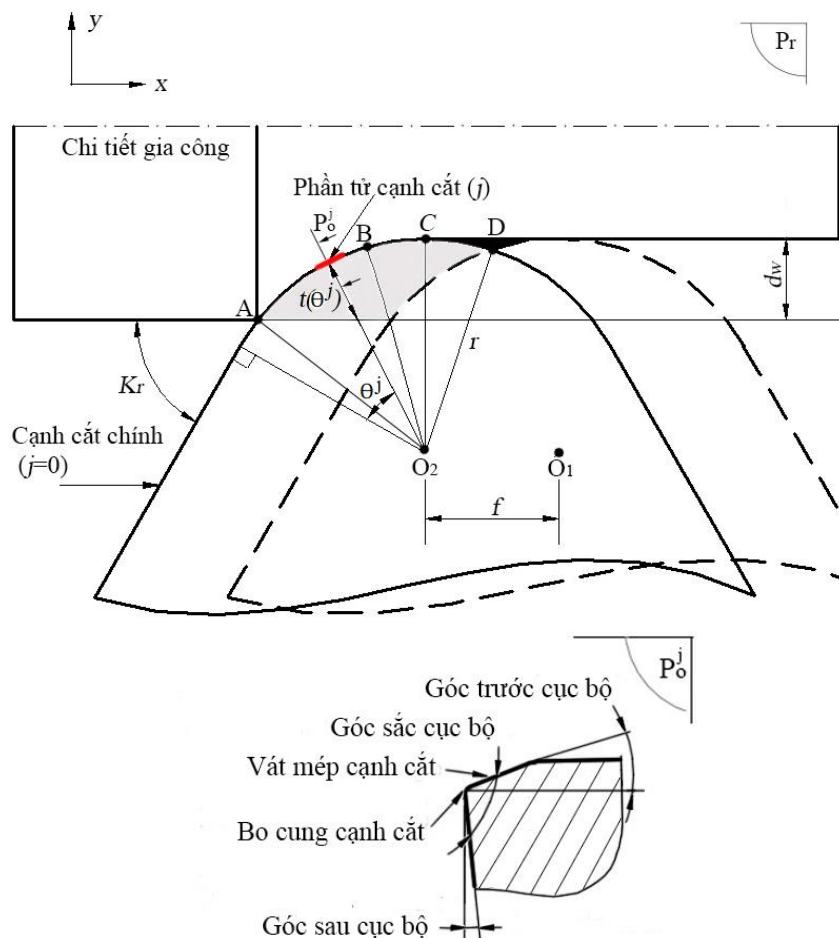
(a) Tiện truyền thống; (b) Tiện cứng

d_w : chiều sâu cắt; K_r : góc nghiêng dao; r_n : bán kính mũi dao; f : bước tiến dao; R_z : độ nhám

4.2 Mô hình toán hình học quá trình tiện cứng

Trong quá trình tiện cứng, chỉ có bán kính mũi dao tham gia cắt gọt. Do đó, cần xây dựng một mô hình toán học hình học cho quá trình này. Phương pháp thực hiện dựa trên hệ tiêu chuẩn “T-hand-S” được đề xuất như sau: trước tiên, cạnh cắt chính được xem như một phần tử cạnh cắt ($j=0$). Tiếp theo, phần bán kính mũi dao tham gia cắt gọt được mô hình hóa bằng cách xấp xỉ thành các phần tử cạnh cắt thẳng ($j=1,2,3\dots$). Vì vậy, các mô hình toán về lực cắt, nhiệt cắt, mòn dao... có thể được áp dụng cho mỗi phần tử cạnh cắt.

Mô hình hóa bán kính mũi dao tham gia cắt gọt trong quá trình tiện cứng và các thông số hình học dao cục bộ của mỗi phần tử cạnh cắt như Hình 4.2. Các phần tử cạnh cắt từ θ_A đến θ_C là phần tử cạnh cắt chính, θ_C ứng với vị trí mũi dao, còn các phần tử từ θ_C tới θ_D là phần tử cạnh cắt phụ.

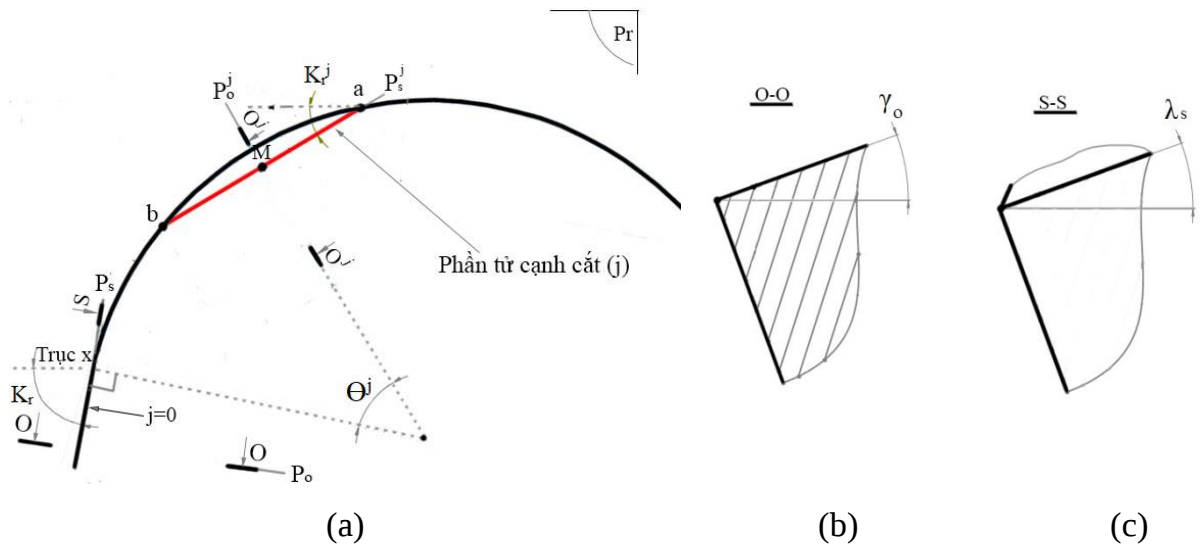


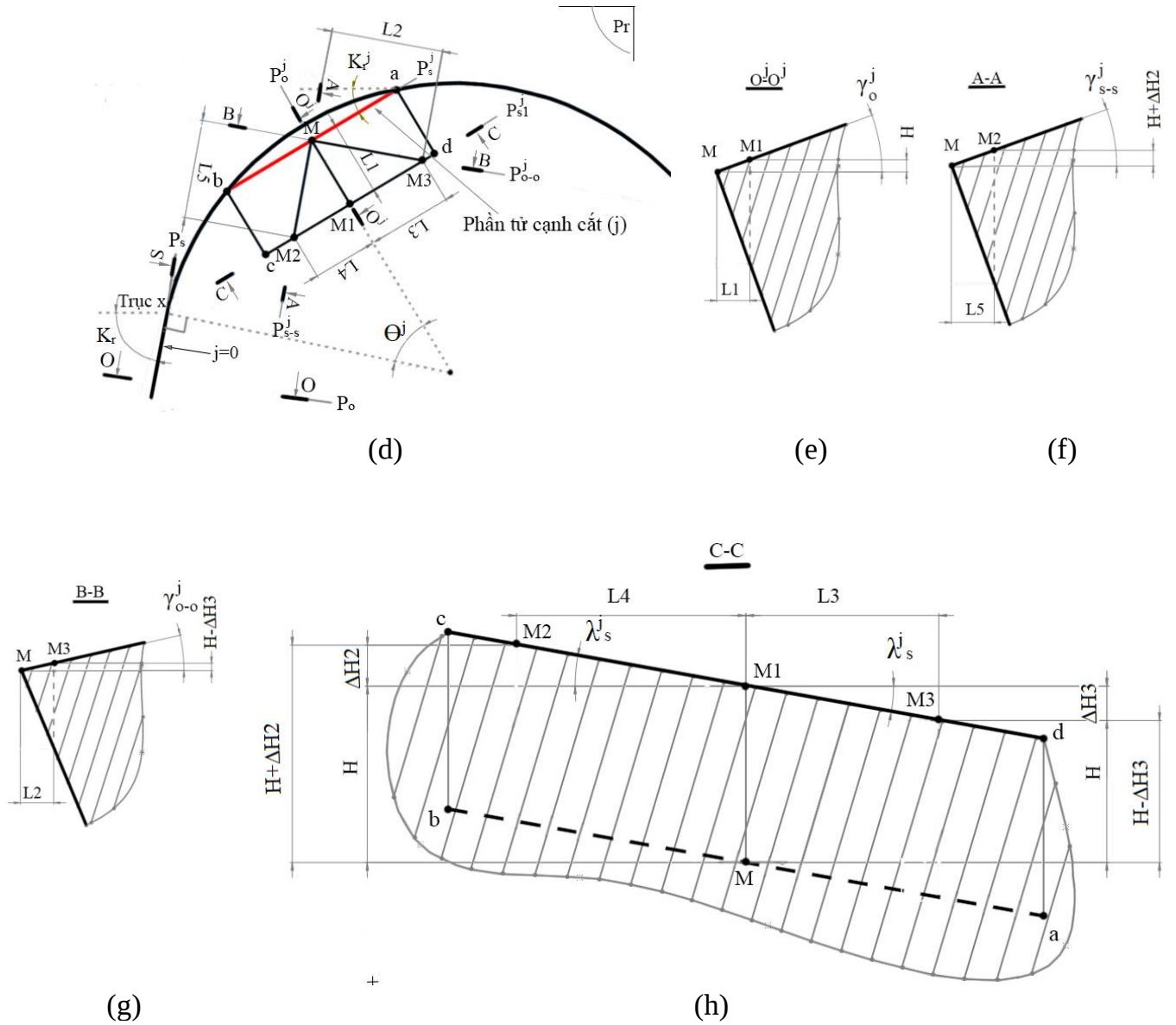
Hình 4.2 Mô hình bán kính mũi dao tham gia cắt gọt trong tiên cứng

4.2.1 Mô hình toán hình học dao

Để xây dựng mô hình toán hình học dao trong quá trình tiện cứng, nghiên cứu dựa trên hệ tiêu chuẩn hình học dao “the tool in hand system (T-hand-S)”. Theo đó, ba mặt phẳng tham chiếu cơ bản, bao gồm mặt phẳng đáy P_r , mặt phẳng trục giao P_o và mặt phẳng cạnh cắt P_s , được sử dụng để định nghĩa các thông số hình học góc dao: góc nghiêng dao K_r , góc trước γ_o và góc nâng dao λ_s , tương ứng cho lưỡi cắt chính ($j=0$), như thể hiện ở Hình 4.3 (a-c).

Đối với phần tử cạnh cắt bán kính mũi dao (j), các mặt phẳng P_r , P_o^j , P_s^j được sử dụng để định nghĩa các thông số hình học góc dao cục bộ (K_r^j , γ_o^j và λ_s^j). Ngoài ra, ba mặt phẳng P_{s1}^j , P_{s-s}^j và P_{o-o}^j song song mặt phẳng cạnh cắt của phần tử cạnh cắt (j) P_s^j , mặt phẳng cạnh cắt P_s và mặt phẳng trục giao P_o tương ứng, được kết hợp để mô tả mối quan hệ giữa các góc dao, như trong Hình 4.3 (d-h). Mặt phẳng P_c là mặt trước dao.





Hình 4.3. Mô hình mối quan hệ giữa các góc dao của cạnh cắt chính và phần tử cạnh cắt (j) (Hiệu chỉnh và cải tiến từ mô hình của Astakhov [103])

Từ Hình 4.3 (a), ta có góc nghiêng dao cục bộ:

Góc nghiêng dao cục bộ:

$$K_r^j = \begin{cases} K_r - \Theta^j & \text{khi } \Theta^j \leq K_r \text{ (lưỡi cắt chính)} \\ \Theta^j - K_r & \text{khi } \Theta^j > K_r \text{ (lưỡi cắt phụ)} \end{cases} \quad (4.1)$$

Từ Hình 4.3 (e):

$$\tan \gamma_o^j = \frac{H}{L_1} \quad (4.2)$$

Từ Hình 4.3 (h):

$$\Delta H2 = L4 \tan \lambda_s^j; \Delta H3 = L3 \tan \lambda_s^j \quad (4.3)$$

Từ Hình 4.3 (d):

$$\begin{aligned} \frac{L1}{L2} &= \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right); \frac{L3}{L2} = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right) \\ \frac{L1}{L5} &= \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right); \frac{L4}{L5} = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Và từ Hình 4.3 (f, g):

$$\tan \gamma_{o-o}^j = \tan \gamma_o = \frac{H - \Delta H3}{L2}; \tan \gamma_{s-s}^j = \tan \lambda_s = \frac{H + \Delta H2}{L5} \quad (4.5)$$

Thay phương trình (4.2-4.4) vào phương trình (4.5), ta có:

$$\begin{aligned} \tan \gamma_o &= \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right) \tan \gamma_o^j - \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right) \tan \lambda_s^j \\ \tan \lambda_s &= \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right) \tan \gamma_o^j + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right) \tan \lambda_s^j \end{aligned} \quad (4.6)$$

Từ phương trình (4.6), ta có:

Góc trước cục bộ:

$$\gamma_o^j = \tan^{-1} \left(\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right) \tan \gamma_o + \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right) \tan \lambda_s \right) \quad (4.7)$$

Góc nâng cục bộ:

$$\lambda_s^j = \begin{cases} \tan^{-1} \left(-\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right) \tan \gamma_o + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right) \tan \lambda_s \right) & \text{khi } \theta^j \leq K_r \\ -\tan^{-1} \left(-\cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right) \tan \gamma_o + \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta^j\right) \tan \lambda_s \right) & \text{khi } \theta^j > K_r \end{cases} \quad (4.8)$$

Và góc trước pháp tuyến cục bộ:

$$\tan \gamma_n^j = \tan \gamma_o^j \cos \lambda_s^j \quad (4.9)$$

4.2.2 Mô hình toán diện tích cắt

Tiếp theo, chúng ta xác định các thông số lớp cắt cục bộ cho mỗi phần tử cạnh cắt (j). Dựa trên Hình 4.4, ta có:

Phần bán kính mũi dao tham gia cắt gọt:

$$\theta_A = K_r - \angle AO_2E = K_r - \cos^{-1}\left(\frac{r - d_w}{r}\right) \quad (4.10)$$

$$\theta_C = K_r \quad (4.11)$$

$$\theta_D = K_r + \angle CO_2D = K_r + \sin^{-1}\left(\frac{f}{2r}\right) \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \theta_B &= K_r - \angle FO_2E = K_r - \tan^{-1}\left(\frac{AE - AF}{O_2E}\right) \\ &= K_r - \tan^{-1}\left(\frac{r \sin(K_r - \theta_A) - f}{r - d_w}\right) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Chiều dày lớp cắt cục bộ:

Zone 1: $\theta_A \leq \theta^j < \theta_B$

$$t_1(\theta^j) = r - O_2X_1 = r - \frac{r - d_w}{\cos(K_r - \theta^j)} \quad (4.14)$$

Zone 2: $\theta_B \leq \theta^j \leq \theta_D$

$$t_2(\theta^j) = r - O_2X_2 = r - \sqrt{r^2 + f^2 - 2rf \cos \angle O_2O_1X_2} \quad (4.15)$$

Sử dụng định luật sin, ta có:

$$\begin{aligned} \frac{O_1O_2}{\sin \angle O_2X_2O_1} &= \frac{O_1X_2}{\sin \angle O_1O_2X_2} \\ \frac{f}{\sin(\theta^j + \pi/2 - K_r - \angle O_2O_1X_2)} &= \frac{r}{\sin(\pi - (\theta^j + \pi/2 - K_r))} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Từ phương trình (4.16), ta có:

$$\angle O_2O_1X_2 = \left(\theta^j + \pi/2 - K_r - \sin^{-1}\left(\frac{f}{r} \sin(\theta^j + \pi/2 - K_r)\right) \right) \quad (4.17)$$

Thế phương trình (4.17) vào phương trình (4.15), ta có:

$$t_2(\theta^j) = \quad (4.18)$$

Hệ tọa độ (x_r, y_r^j, x_r^j) có được bằng cách xoay hệ tọa độ (x_r, y_r^o, x_r^o) một góc θ_r quanh trục z_r , Hình 4.5(b):

$$\begin{bmatrix} z_r \\ y_r^j \\ x_r^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta^j & \sin \theta^j \\ 0 & -\sin \theta^j & \cos \theta^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_r \\ y_r^o \\ x_r^o \end{bmatrix}$$

$$y_r^j = \cos \theta^j y_r^o + \sin \theta^j x_r^o \quad (4.21)$$

Hệ tọa độ (z_n^j, y_c^j, x_r^j) có được bằng cách xoay hệ tọa độ (z_r, y_r^j, x_r^j) một góc λ_s^j quanh trục x_s^j , Hình 4.5(c):

$$\begin{bmatrix} z_n^j \\ y_c^j \\ x_r^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \lambda_s^j & \sin \lambda_s^j & 0 \\ -\sin \lambda_s^j & \cos \lambda_s^j & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_r \\ y_r^j \\ x_r^j \end{bmatrix}$$

$$z_n^o = \cos \lambda_s^o z_r + \sin \lambda_s^o y_r^o$$

$$y_c^o = -\sin \lambda_s^o z_r + \cos \lambda_s^o y_r^o \quad (4.22)$$

Và hệ tọa độ (z_c, y_c^j, x_c^j) có được bằng cách xoay hệ tọa độ (z_n^j, y_c^j, x_r^j) một góc γ_n^j quanh trục y_c^j , Hình 4.5(d):

$$\begin{bmatrix} z_c \\ y_c^j \\ x_c^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_n^j & 0 & -\sin \gamma_n^j \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma_n^j & 0 & \cos \gamma_n^j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_n^j \\ y_c^j \\ x_r^j \end{bmatrix}$$

$$x_c^o = \sin \gamma_n^o z_n^o + \cos \gamma_n^o x_r^o \quad (4.23)$$

Thế phương trình (4.22) & (4.23) vào phương trình (4.20), ta có:

$$y_c^j = (-\cos \theta_c^j \sin \lambda_s^o + \sin \theta_c^j \sin \gamma_n^o \cos \lambda_s^o) z_r$$

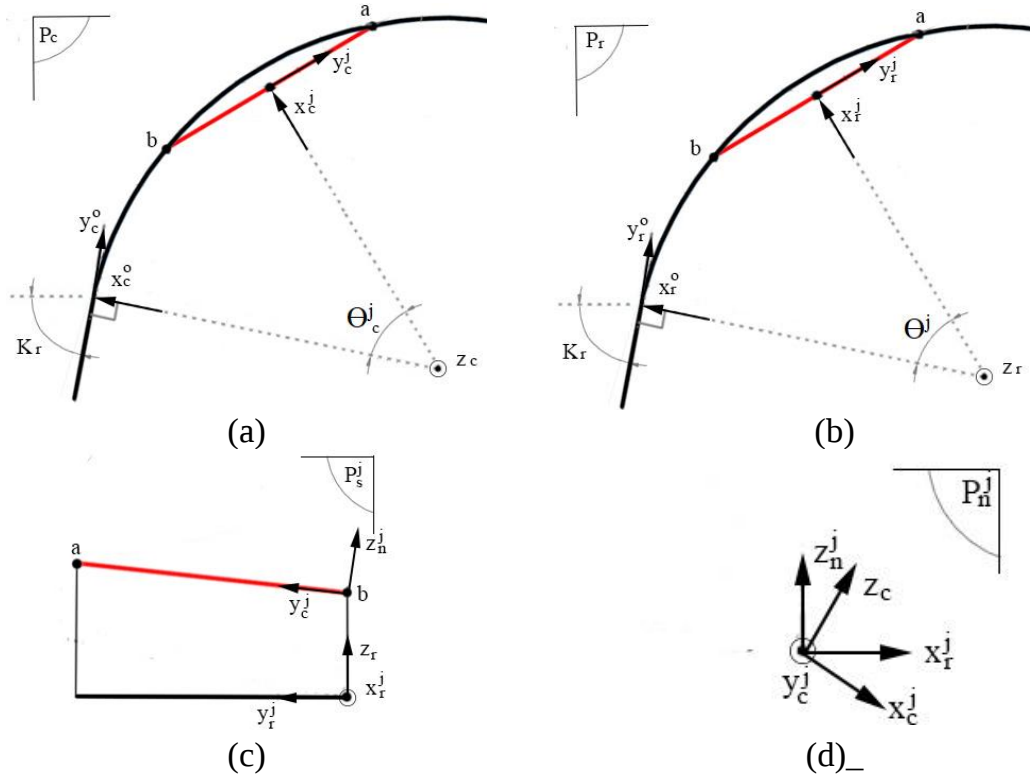
$$+ (\cos \theta_c^j \cos \lambda_s^o + \sin \theta_c^j \sin \gamma_n^o \sin \lambda_s^o) y_r^o + \sin \theta_c^j \sin \gamma_n^o x_r^o$$

Hay $y_c^j = Az_r + By_r^o + Cx_r^o$ (4.24)

$$\text{Với: } A = (-\cos \theta_c^j \sin \lambda_s^o + \sin \theta_c^j \sin \gamma_n^o \cos \lambda_s^o)$$

$$B = (\cos \theta_c^j \cos \lambda_s^o + \sin \theta_c^j \sin \gamma_n^o \sin \lambda_s^o)$$

$$C = \sin \theta_c^j \cos \gamma_n^o$$



Hình 4.5 Mối quan hệ giữa các hệ tọa độ:

(a) (z_c, y_c^j, x_c^j) và (z_c, y_c^o, x_c^o) trên mặt phẳng trước dao P_c ; (b) (x_r, y_r^j, x_r^j) và (x_r, y_r^o, x_r^o) trên mặt phẳng tham khảo P_r ; (c) (z_n^j, y_c^j, x_r^j) và (z_r, y_r^j, x_r^j) trên mặt phẳng cạnh cắt (j) P_s^j và (d) (z_c, y_c^j, x_c^j) và (z_n^j, y_c^j, x_r^j) trên mặt phẳng pháp tuyến (j) P_n^j

Vì y_r^j là véc tơ đơn vị của hình chiếu phân tử cạnh cắt (j) trên mặt phẳng (P_r), ta có:

$$y_r^j = \frac{y_c^j - (y_c^j \cdot z_r)z_r}{\|y_c^j - (y_c^j \cdot z_r)z_r\|} \quad (4.25)$$

Thay phương trình (4.21) & (4.24) vào phương trình (4.25), ta có:

$$\cos \theta^j y_r^o + \sin \theta^j x_r^o = \frac{By_r^o + Cx_r^o}{X} \text{ với } X = \|y_c^j - (y_c^j \cdot z_r)z_r\| \quad (4.26)$$

Từ phương trình (4.26), ta có:

$$\tan\theta^j = \frac{\tan\theta_c^j \cos \gamma_n^o}{\cos \lambda_s^o + \tan\theta_c^j \sin \gamma_n^o \sin \lambda_s^o} = \frac{\tan\theta_c^j \cos \gamma_n}{\cos \lambda_s + \tan\theta_c^j \sin \gamma_n \sin \lambda_s} \quad (4.27)$$

Và từ phương trình (4.27), ta có:

$$\theta_c^j = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{\tan\theta_c^j \cos \lambda_s}{\cos \gamma_n - \tan\theta_c^j \sin \gamma_n \sin \lambda_s} \right) & \text{khi } \theta^j \leq \frac{\pi}{2} \\ \tan^{-1} \left(\frac{\tan\theta_c^j \cos \lambda_s}{\cos \gamma_n - \tan\theta_c^j \sin \gamma_n \sin \lambda_s} \right) + \pi & \text{khi } \theta^j > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4.28)$$

Tóm tắt mô hình toán hình học quá trình tiện cứng như sau:

- Góc nghiêng dao cục bộ (Local cutting-edge angle):

$$K_r^j = \begin{cases} K_r - \theta^j & \text{khi } \theta^j \leq K_r \text{ (lưỡi cắt chính)} \\ \theta^j - K_r & \text{khi } \theta^j > K_r \text{ (lưỡi cắt phụ)} \end{cases}$$

- Góc trước cục bộ (Local rake angle):

$$\gamma_o^j = \tan^{-1} \left(\sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta^j \right) \tan \gamma_o + \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta^j \right) \tan \lambda_s \right)$$

- Góc trước pháp tuyến cục bộ (Local normal rake angle):

$$\tan \gamma_n^j = \tan \gamma_o^j \cos \lambda^j$$

- Góc nâng dao cục bộ (Local inclination angle):

$$\lambda_s^j = \begin{cases} \tan^{-1} \left(-\cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta^j \right) \tan \gamma_o + \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta^j \right) \tan \lambda_s \right) & \text{khi } \theta^j \leq K_r \\ -\tan^{-1} \left(-\cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta^j \right) \tan \gamma_o + \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta^j \right) \tan \lambda_s \right) & \text{khi } \theta^j > K_r \end{cases}$$

- Phần bán kính mũi dao tham gia quá trình cắt gọt:

$$\theta_A = K_r - \cos^{-1} \left(\frac{r - d_w}{r} \right)$$

$$\theta_C = K_r$$

$$\theta_D = K_r + \sin^{-1} \left(\frac{f}{2r} \right)$$

$$\theta_B = K_r - \tan^{-1} \left(\frac{r \sin(K_r - \theta_A) - f}{r - d_w} \right)$$

- Góc trên mặt trước dao (The angle θ_c^j in the tool rake plane):

$$\theta_c^j = \begin{cases} \tan^{-1} \left(\frac{\tan \theta^j \cos \lambda_s}{\cos \gamma_n - \tan \theta^j \sin \gamma_n \sin \lambda_s} \right) & \text{ khi } \theta^j \leq \frac{\pi}{2} \\ \tan^{-1} \left(\frac{\tan \theta^j \cos \lambda_s}{\cos \gamma_n - \tan \theta^j \sin \gamma_n \sin \lambda_s} \right) + \pi & \text{ khi } \theta^j > \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

- Chiều dày lớp cắt cục bộ:

$$\text{Zone 1: } \theta_A \leq \theta^j < \theta_B$$

$$t_1(\theta^j) = r - \frac{r - d_w}{\cos(K_r - \theta^j)}$$

$$\text{Zone 2: } \theta_B \leq \theta^j \leq \theta_D$$

$$t_2(\theta^j) = r - \sqrt{r^2 + f^2 - 2rf \cos \left(\theta^j + \frac{\pi}{2} - K_r - \sin^{-1} \left(\frac{f}{r} \sin \left(\theta^j + \frac{\pi}{2} - K_r \right) \right) \right)}$$

- Diện tích lớp cắt cục bộ:

$$dA^j = t(\theta^j) r d\theta \text{ với gia số } d\theta$$

4.3 So sánh mô hình toán và quá trình cắt thực

Để đánh giá độ chính xác của mô hình toán, chúng ta so sánh kết quả của mô hình toán đề xuất với quá trình cắt thực. Ví dụ, xét quá trình tiện cứng với các thông số công nghệ như sau: góc nghiêng dao $K_r = 84^\circ$, góc trước $\gamma_o = -6.03^\circ$, góc nâng dao $\lambda_s = -6^\circ$, bán kính mũi dao $r = 0.8 \text{ mm}$, góc vát cạnh cắt $= 0^\circ$, vận tốc cắt $v = 120 \text{ m/phút}$, chiều sâu cắt $d_w = 0.2 \text{ mm}$, và bước tiến dao $f = 0.08 \text{ mm/vòng}$. Kết quả so sánh được thể hiện trong Bảng 4.1 và Bảng 4.2.

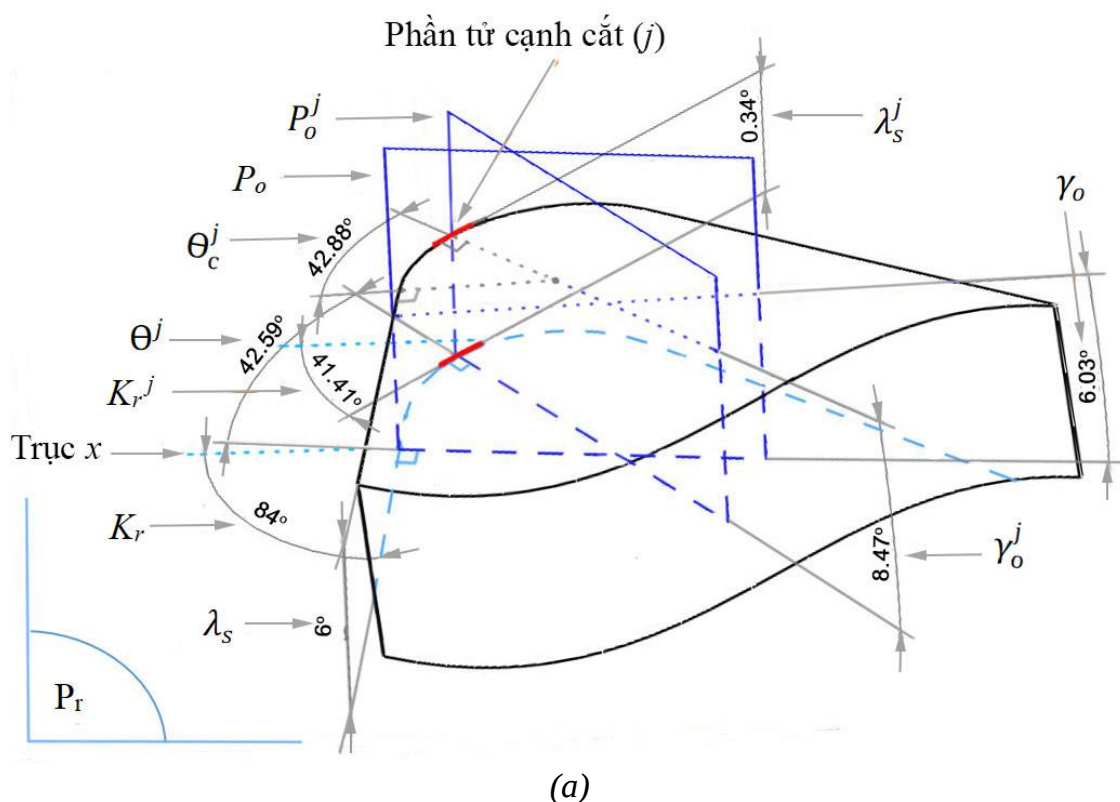
Bảng 4.1 Phần tử cạnh cắt bán kính mũi dao tham gia cắt gọt từ θ_A đến θ_D

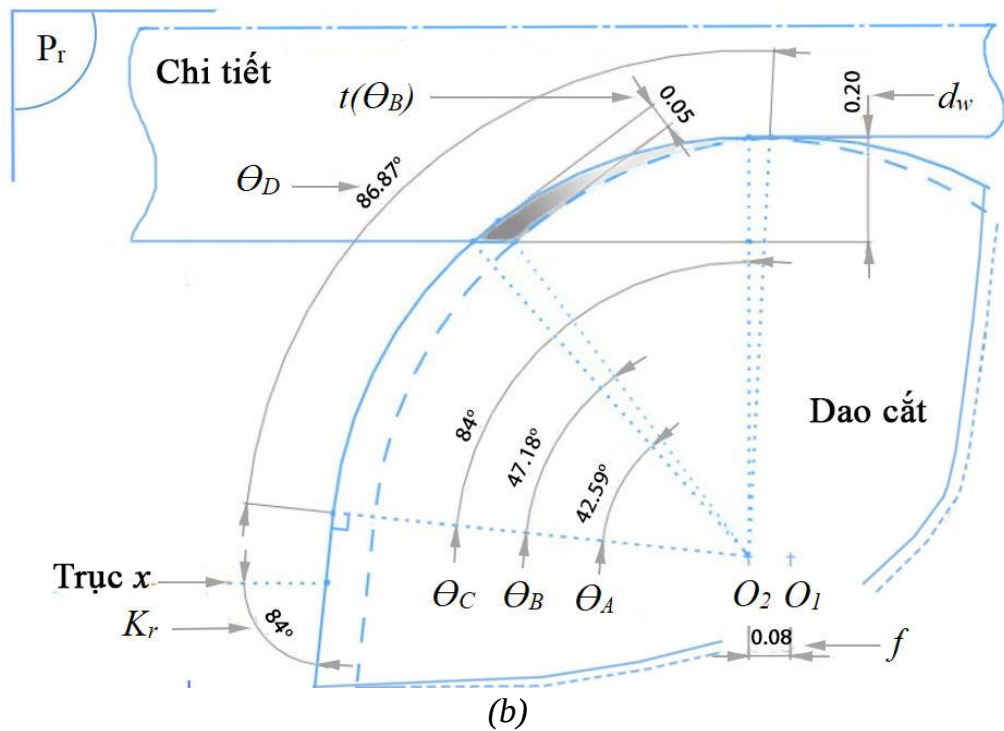
	$\theta_A(^{\circ})$	$\theta_D(^{\circ})$
Mô hình toán	42.59	86.87
Quá trình cắt thực	42.59	86.87

Bảng 4.2 Thông số hình học dao và chiều dày lớp cắt cục bộ của phần tử cạnh cắt
(j) ($\theta_A=42.59^\circ$)

	$K_r^j (^\circ)$	$\gamma_o^j (^\circ)$	$\lambda_s^j (^\circ)$	$t^j (mm)$
Mô hình toán	41.41	-8.47	-0.34	0
Qua trình cắt thực	41.41	-8.47	-0.34	0

Dựa vào Hình 4.6 (b), phần tử cạnh cắt (j) với $\theta_B=47.18^\circ$, có chiều dày lớp cắt cục bộ lớn nhất $t^j=0.05$ (mm), phù hợp với kết quả được dự đoán từ mô hình toán $t^j=0.05$ (mm). So với quá trình cắt thực (Hình 4.6), kết quả từ mô hình toán cho thấy độ chính xác cao. So sánh với các mô hình toán hình học đã công bố trước đó [87], [104], [105], mô hình đề xuất mô tả đúng bản chất quá trình tiện cứng (đã mô hình hóa lưỡi cắt bán kính mũi dao gồm lưỡi cắt chính và lưỡi cắt phụ), đồng thời không bị hạn chế về số phần tử xấp xỉ.





Hình 4.6 Quá trình cắt thực trong tiện cứng với $K_r = 84^\circ$, $\gamma_o = -6.03^\circ$, $\lambda_s = -6^\circ$, $r = 0.8$ mm, $d_w = 0.2$ mm và $f = 0.08$ mm/vòng:

(a) Thông số hình học dao; (b) Độ dày lớp cắt cục bộ của phần tử cạnh cắt (j)

4.4 Kết luận

Nghiên cứu đã phát triển một mô hình toán hình học mới cho quá trình tiện cứng. So với các mô hình hiện có, mô hình mới mô tả chính xác hơn bản chất của quá trình tiện cứng nhờ việc xấp xỉ bán kính mũi dao thành lưỡi cắt chính và lưỡi cắt phụ mà không bị giới hạn về số lượng phần tử. Các thông số công nghệ đầu vào, bao gồm thông số hình học dao và chế độ cắt, đều được tích hợp trong mô hình. Dựa trên mô hình này, có thể xác định vị trí cắt gọt trên bán kính mũi dao, các thông số hình học góc dao cục bộ, cùng với chiều dày lớp cắt cục bộ của các phần tử cạnh cắt bán kính mũi dao. Đây là những thông số quan trọng giúp phân tích, đánh giá và tối ưu hóa quá trình tiện cứng.

Chương 5:

QUÁ TRÌNH THỰC NGHIỆM TIỆN CỨNG

5.1 Giới thiệu chung

Nghiên cứu thực nghiệm quá trình tiện cứng được tiến hành nhằm phân tích ảnh hưởng của các thông số hình học góc dao, bao gồm góc nghiêng dao, góc trước và góc nâng dao, đến các thông số đầu ra như độ nhám bề mặt, độ mòn dao và lực cắt. Đồng thời, dựa trên kết quả thực nghiệm, nghiên cứu xây dựng mô hình toán thể hiện mối quan hệ giữa độ nhám bề mặt, độ mòn dao và lực cắt với các thông số hình học góc dao trong quá trình tiện cứng.

5.2 Thiết bị - dụng cụ - thông số thí nghiệm

5.2.1 Thiết bị thí nghiệm

Thí nghiệm tiện cứng được thực hiện trên máy tiện CNC BOEHRINGER DUS-400ti (Hình 5.1), với công suất trục chính 11 kW và dải tốc độ từ 2 đến 3000 vòng/phút. Thiết bị có độ chính xác là 1/1000 mm.

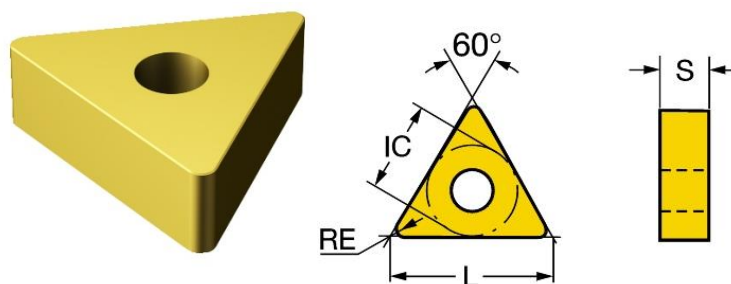


Hình 5.1 Máy tiện CNC BOEHRINGER DUS-400ti

5.2.2 Dụng cụ cắt

Trong quá trình gia công vật liệu cứng, dụng cụ cắt phải chịu điều kiện cơ - nhiệt khắc nghiệt. Do có khả năng chịu mài mòn và ổn định hóa học vượt trội, vật liệu CBN và gốm thường được ưu tiên sử dụng. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này, dụng cụ cắt gốm được lựa chọn nhờ lợi thế kinh tế so với CBN. Các thông số hình học dao được xác định dựa trên kết quả từ các nghiên cứu tiền cứng trước đây và khuyến nghị của nhà sản xuất (thông qua phần mềm chọn dao của Sandvik).

Dụng cụ cắt sử dụng trong các thí nghiệm là mảnh dao tiêu chuẩn ISO TNGA160408S01525 6050, làm từ hợp kim gốm hỗn hợp (70% Al₂O₃ và 30% TiC) phủ PVD-TiN (Hình 5.2), gá trên cán dao tiêu chuẩn ISO PTG NR 1616H 16 (Hình 5.3). Các đặc tính của mảnh dao và cán dao được trình bày trong Bảng 5.1 và Bảng 5.2. Khi gắn mảnh dao lên cán dao, góc trước $\gamma_0 = -6^\circ$; góc nâng $\lambda_s = -6^\circ$ và góc nghiêng dao $K_r = 91^\circ$.

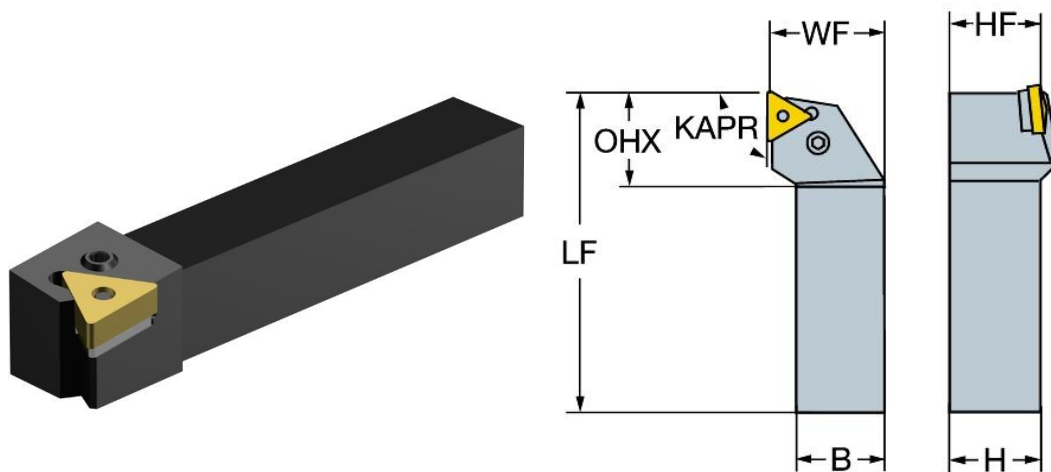


Hình 5.2 Mảnh dao cắt TNGA160404S01525 6050 [106]

Bảng 5.1 Thông số mảnh dao TNGA160404S01525 6050 [106]

Đường kính vòng tròn nội tiếp - Inscribed circle diameter (IC)	9.525 mm
Mã hình dạng mảnh dao - Insert shape code (SC)	T
Chiều dài cạnh cắt - Cutting edge effective length (LE)	15.5418 mm
Bán kính góc - Corner radius (RE)	0.7938 mm
Wiper - Wiper edge property (WEP)	Không
Độ rộng vát cạnh cắt - Face land width (BN)	0.15 mm
Góc vát - Face land angle (GB)	25°

Chiều cắt - Hand (HAND)	Trái, phải
Mã vật liệu - Grade (GRADE)	6050
Lớp phủ - Coating (COATING)	PVD TiN
Độ dày mảnh dao - Insert thickness (S)	4.763 mm
Góc sau chính - Clearance angle major (AN)	0°
Khối lượng - Weight of item (WT)	0.0036 kg



Hình 5.3 Cán dao PTG NR 1616H 16 [106]

Bảng 5.2 Thông số cán dao PTG NR 1616H 16 [106]

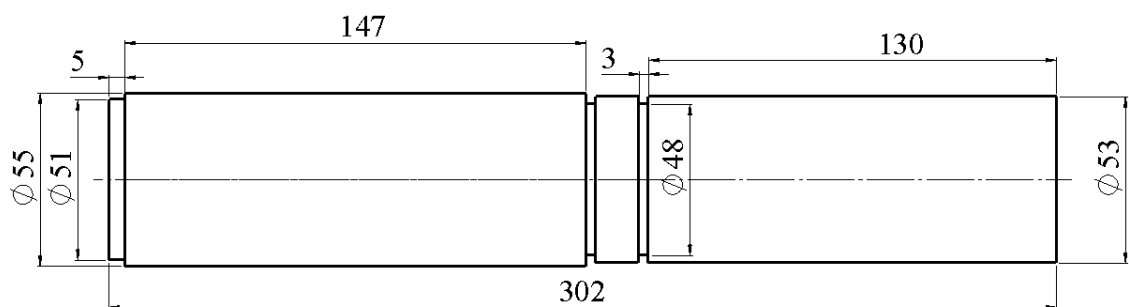
Góc nghiêng chính - Tool cutting edge angle (KAPR)	91°
Kích thước cán dao - Rectangular shank -metric	16 x 16
Chiều cán dao - Hand (HAND)	Phải
Dài - Functional length (LF)	100 mm
Rộng - Functional width (WF)	20 mm
Cao - Functional height (HF)	16 mm
Góc trước - Orthogonal rake angle (GAMO)	-6°
Góc nâng - Inclination angle (LAMS)	-6°
Mô-men xoắn - Torque (TQ)	2 Nm
Vật liệu - Body material code (BMC)	Thép
Khối lượng - Weight of item (WT)	0.224 kg

5.2.3 Mẫu thí nghiệm

Mẫu thí nghiệm sử dụng thép AISI 1055 được tôi cứng 52 ± 1 HRC (Hình 5.4). Quá trình xử lý nhiệt như sau: bước đầu, mẫu thí nghiệm được nung nóng đến 850°C và giữ nhiệt trong 1h, sau đó tôi trong dầu. Tiếp theo, mẫu được ram trong 2h ở nhiệt độ 250°C và làm nguội trong môi trường không khí tĩnh. Độ cứng của mẫu được kiểm tra bằng thiết bị đo độ cứng AFFRI 250 MRS (Rockwell Tester). Thép AISI 1055 ứng dụng rộng rãi trong chế tạo chi tiết máy (trục, bánh răng, lò xo...). Thông số kích thước của mẫu thí nghiệm như Hình 5.5 và các thông tin cơ bản của thép AISI 1055 trong Bảng 5.3 và Bảng 5.4.



Hình 5.4 Mẫu thí nghiệm



Hình 5.5 Kích thước mẫu thí nghiệm

Bảng 5.3 Thành phần hóa học của thép AISI 1055 (thép C55 theo TCVN) [107]

Loại thép	C	Fe	Mn	P	S
AISI 1055	0.5-0.6 %	98.41-98.9 %	0.60-0.90 %	≤0.040 %	≤0.050 %

Bảng 5.4 Thuộc tính vật lý, cơ học thép AISI 1055 [107]

Thuộc tính	Hệ mét
Khối lượng riêng	7.85 g/cm ³
Độ bền kéo	660 MPa
Giới hạn chảy	560 MPa
Mo-dun đàn hồi	190-210 GPa
Mo-dun trượt	80 GPa
Hệ số Poisson	0.27-0.30
Độ giãn dài giới hạn (ở 50 mm)	10%
Độ cứng Brinell	197

5.2.4 Thông số thí nghiệm

Dựa trên phân tích tổng quan các công trình nghiên cứu về tiện cứng, các thông số hình học góc dao thường sử dụng gồm: góc nghiêng dao K_r trong khoảng 60° đến 91° ; góc trước dao γ_0 là -6° và góc nâng dao λ_s là -6° . Từ đó, nghiên cứu lựa chọn ba thông số hình học chính: góc nghiêng dao, góc trước dao và góc nâng dao. Khoảng giá trị cụ thể như sau:

- Góc nghiêng dao: $60^\circ \leq K_r \leq 90^\circ$
- Góc trước dao: $-2^\circ \leq \gamma_0 \leq -10^\circ$
- Góc nâng dao: $-2^\circ \leq \lambda_s \leq -10^\circ$

5.2.5 Thông số chế độ cắt

Chế độ cắt được cố định, lựa chọn dựa trên tham khảo từ các nghiên cứu tiện cứng, kết hợp với dữ liệu từ nhà sản xuất. Thông số chế độ cắt cụ thể được thể hiện trong Bảng 5.5.

Bảng 5.5 Thông số chế độ cắt được cố định trong thí nghiệm

Vận tốc cắt v (m/phút)	Bước tiến dao f (mm/vòng)	Chiều sâu cắt d_w (mm)
120	0.08	0.2

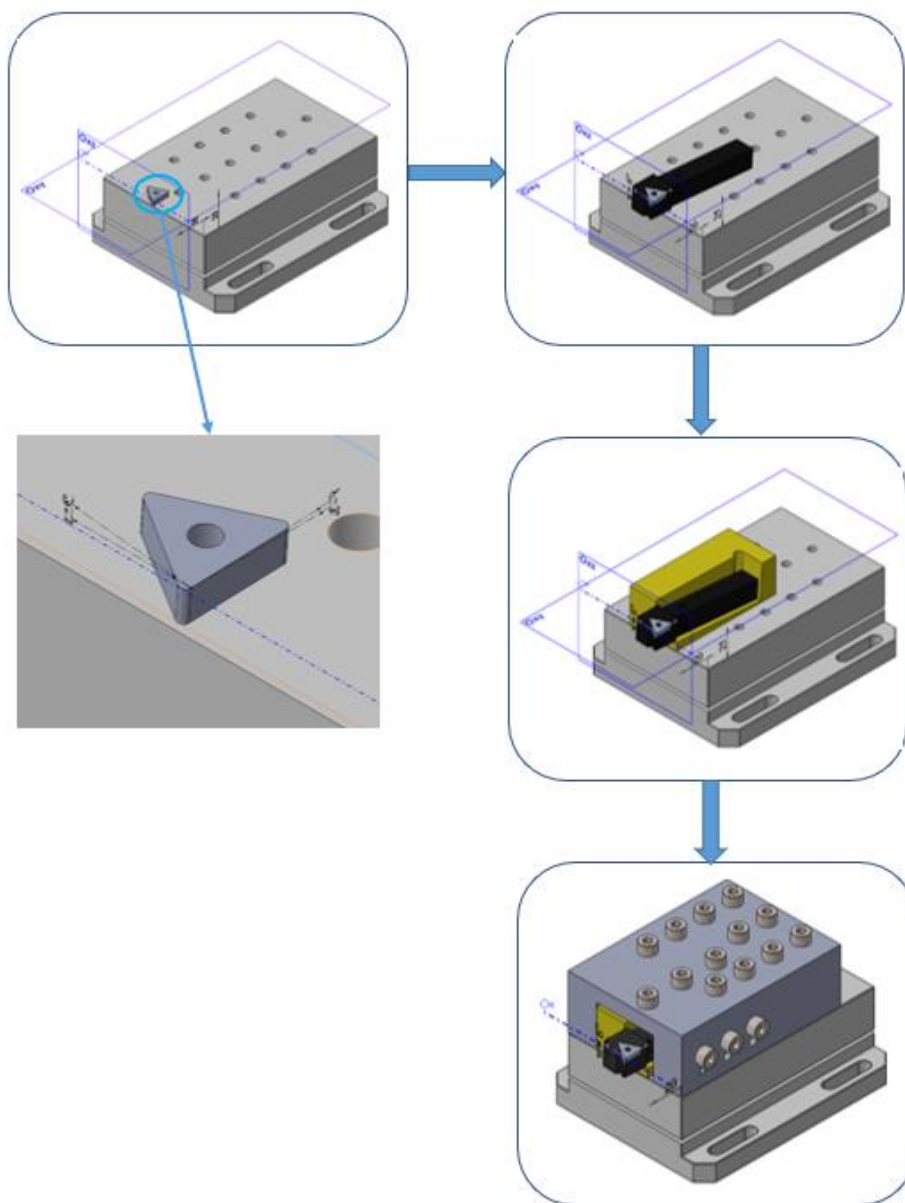
5.3 Thiết kế - chế tạo hệ thống đồ gá thay đổi góc dao

Để thay đổi các thông số hình học góc dao, nghiên cứu đã phát triển một hệ thống đồ gá chuyên dụng, được thiết kế riêng cho từng thí nghiệm. Hệ thống đồ gá được chế tạo và kiểm tra bằng các máy móc và thiết bị hiện đại, có độ chính xác cao để đảm bảo độ tin cậy của các góc dao.

Hệ thống này được thiết kế trên phần mềm SolidWorks (Hình 5.6), chế tạo trên máy phay 5 trục DMG MORI DMU65 mono BLOCK và kiểm tra bằng máy đo tọa độ (CMM) Hexagon GLOBAL Classic như Hình 5.7. Sau đó, các chi tiết được xử lý nhiệt bằng phương pháp tôi chân không để nâng cao độ bền.

Quá trình thiết kế hệ thống đồ gá dựa trên hệ tiêu chuẩn “T-hand-S”, bao gồm các bước sau: Bước 1- Định vị lưỡi cắt chính song song với mặt phẳng cơ sở P_r và tạo một góc nghiêng dao K_r với trục x (trục máy), điều chỉnh góc trước và góc nâng dao. Sau đó, định vị cố định vị trí mũi dao (điểm trên dao cắt gần trục máy nhất) ở vị trí cách mặt trên hệ thống đồ gá (mặt phẳng cơ sở) theo tiêu chuẩn gá đặt dao là 25 mm và mặt đầu là 20 mm. Bước 2- Lắp ghép cán dao với mảnh dao. Bước 3- Lắp ghép miếng chêm dao với cán dao. Bước 4- Hoàn tất hệ thống đồ gá.

Các chi tiết của đồ gá được chế tạo từ thép làm khuôn SKD11, vốn có ưu điểm dễ gia công, độ cứng cao sau quá trình tôi và khả năng chịu mài mòn tốt.



Hình 5.6 Quá trình thiết kế hệ thống đồ gá thay đổi góc dao



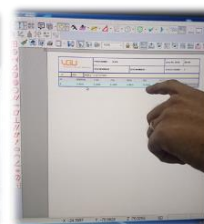
Chuẩn bị phôi



Gia công



Kiểm tra kích thước



Hình 5.7 Quá trình gia công hệ thống đồ gá thay đổi góc dao

5.4 Phân tích lựa chọn phương pháp quy hoạch thực nghiệm

Phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) là tập hợp các kỹ thuật toán học và thống kê để phát triển, cải thiện và tối ưu hóa các quá trình. Ngoài ra, RSM còn có vai trò quan trọng trong thiết kế, phát triển và xây dựng các sản phẩm mới cũng như cải tiến các thiết kế sản phẩm hiện có [108]. Thông qua các thiết kế thí nghiệm như Box-Behnken và Central Composite Design (CCD), kết hợp với phân tích phương sai (ANOVA) và tối ưu hóa đa mục tiêu bằng hàm mong muốn (Desirability Function Approach - DFA), RSM đã trở thành phương pháp hiệu quả và phổ biến nhất để thiết kế thí nghiệm, xây dựng mô hình toán học, phân tích và tối ưu hóa quá trình. Số lượng thí nghiệm có thể được duy trì ở mức vừa phải nhưng vẫn đảm bảo đạt được mục tiêu nghiên cứu.

Mô hình toán học bậc hai được xây dựng từ kết quả thí nghiệm được biểu diễn như sau:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i X_i + \sum_{i=1}^3 a_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j}^3 a_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (5.1)$$

Trong đó, Y là đáp ứng đầu ra của quá trình tiện cứng, bao gồm lực cắt, độ nhám bề mặt và độ mòn dao. Các hệ số a_0 , a_i , a_{ii} và a_{ij} là hằng số, hệ số tuyến tính, bậc hai và hệ số tương tác, tương ứng. X_i là các biến số đầu vào tương ứng như góc nghiêng dao (κ_r), góc trước (γ_s) và góc nâng dao (λ_o). ε là sai số ngẫu nhiên của thí nghiệm.

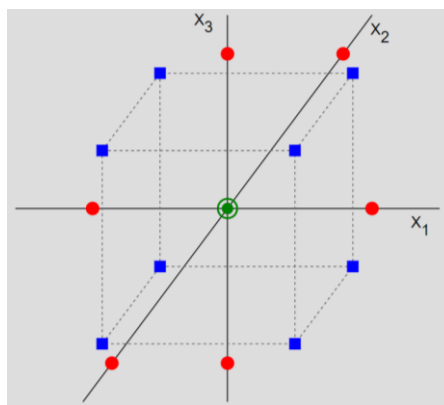
Thiết kế thí nghiệm hỗn hợp đối xứng (CCD) là phương pháp thiết kế thí nghiệm theo hướng xây dựng bề mặt đáp ứng phổ biến nhất để thiết lập mô hình toán bậc 2 cho các đáp ứng đầu ra của quá trình với các điểm tâm, các điểm trục hay điểm sao. Sử dụng các điểm trục là cách hiệu quả để xác định các hệ số của đa thức bậc hai, giúp nâng cao độ chính xác của mô hình [109].

Một thí nghiệm khảo sát ảnh hưởng của k yếu tố theo phương pháp này là sự kết hợp của ba nhóm nghiệm thức, được minh họa trên Hình 5.8:

- Nhóm nghiệm thức kết hợp yếu tố: Có thể là kết hợp đầy đủ 2^k hay kết hợp giảm 2^{k-p} , trong đó mỗi yếu tố được thử ở hai mức (mức thấp và mức cao). Nếu có k yếu tố và kết hợp đầy đủ, sẽ có 2^k nghiệm thức thuộc nhóm này (hình vuông xanh trên Hình 5.8).
- Nhóm nghiệm thức “sao” (hay nghiệm thức trục): các nghiệm thức này thường được ký hiệu là “*”, có giá trị của $(k-1)$ yếu tố là giá trị tâm, yếu tố còn lại có giá trị đã được mã hóa là $-\alpha$ hay α với $\alpha \geq 1$. Như vậy sẽ có $2k$ nghiệm thức thuộc nhóm này (vòng tròn đỏ trên Hình 5.8). Giá trị α còn được gọi là giá trị trục, giá trị “sao”, hay còn gọi là cánh tay đòn.
- Nghiệm thức tâm: giá trị của tất cả các yếu tố đều ở mức tâm (vòng tròn xanh lá cây trên Hình 5.8).

Trong khi thực hiện thí nghiệm, các nghiệm thức thuộc nhóm 1 và 2 đều không cần lặp lại, riêng nghiệm thức tâm được lặp lại n lần.

Như vậy, một thí nghiệm thiết kế theo phương pháp CCD để khảo sát ảnh hưởng của k yếu tố sẽ gồm $2^k + 2k + 1$ nghiệm thức. Nếu chỉ lặp lại ở nghiệm thức tâm n lần, tổng số đơn vị thí nghiệm là $2^k + 2k + n$ (khi dùng kết hợp đủ).



Hình 5.8 Minh họa thiết kế thí nghiệm phối hợp có tâm ba yếu tố [110]

Để đảm bảo tính trực giao (orthogonality) và tính quay được (rotatability) của thiết kế, giá trị α được chọn mặc định theo công thức $\alpha = 2^{k/4} = 2^{3/4} = 1.682$. Giá trị tâm được chọn như sau: góc nghiêng dao $\kappa_r = 75^\circ$, góc trước dao $\gamma_o = -6^\circ$, góc nâng dao $\lambda_s = -6^\circ$, dựa trên cơ sở tổng quan các nghiên cứu về tiện cứng và thông số góc

dao tiêu chuẩn của nhà sản xuất. Các thí nghiệm trong nghiên cứu được thiết kế theo phương pháp CCD, ma trận mã hóa được thể hiện trong Bảng 5.6 và 5.7

Bảng 5.6 Thiết kế thí nghiệm dựa trên CCD

Thông số góc dao	Đơn vị	Mức				
		$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Góc nghiêng dao (κ_r)	Độ ($^{\circ}$)	60	66	75	84	90
Góc trước dao (γ_o)	Độ ($^{\circ}$)	-2	-3.6	-6	-8.4	-10
Góc nâng dao (λ_s)	Độ ($^{\circ}$)	-2	-3.6	-6	-8.4	-10

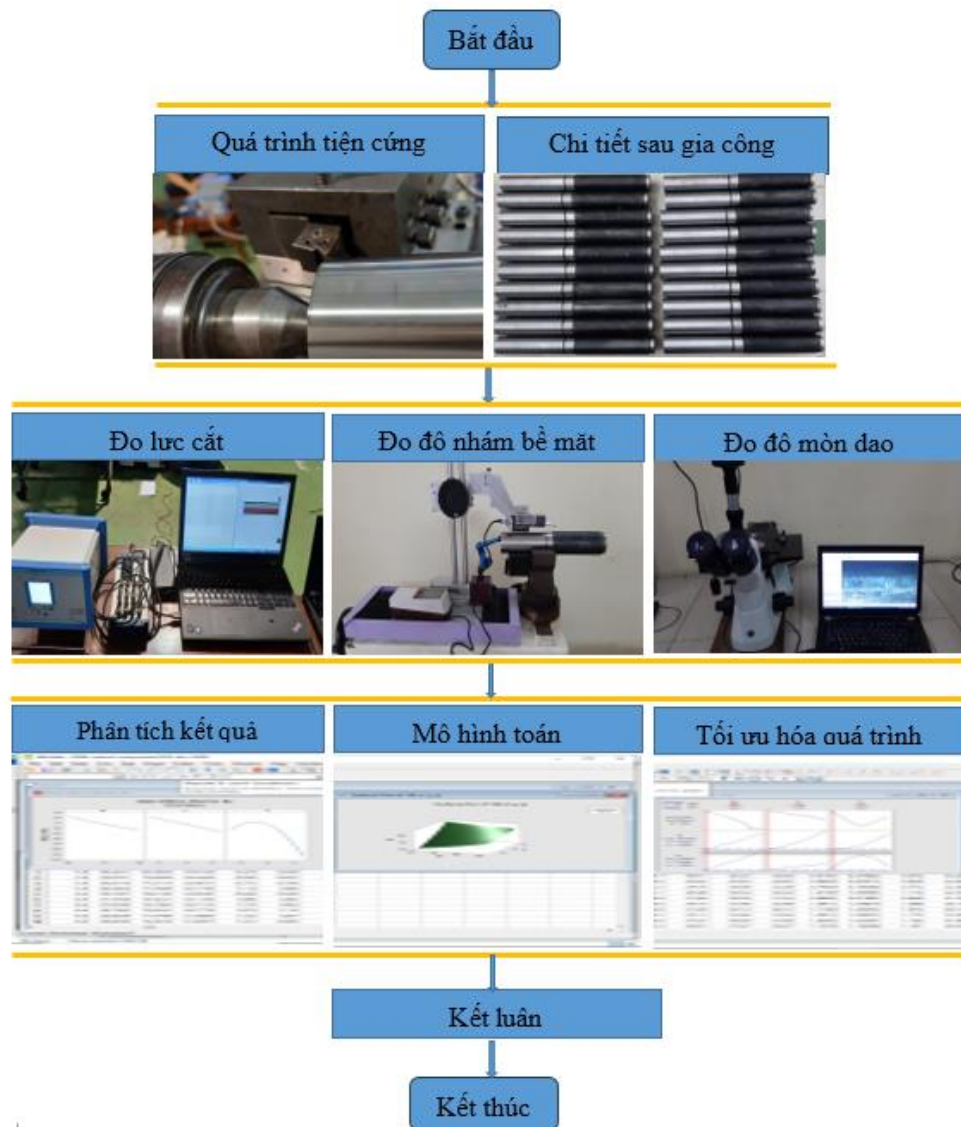
Bảng 5.7 Ma trận mã hóa thông số thí nghiệm

Thí nghiệm	Yếu tố			Thí nghiệm	Yếu tố		
	$K_r (^{\circ})$	$\gamma_o (^{\circ})$	$\lambda_s (^{\circ})$		$K_r (^{\circ})$	$\gamma_o (^{\circ})$	$\lambda_s (^{\circ})$
1	+1	-1	-1	11	0	$-\alpha$	0
2	-1	-1	-1	12	0	$+\alpha$	0
3	+1	+1	-1	13	0	0	$-\alpha$
4	-1	+1	-1	14	0	0	$+\alpha$
5	+1	-1	+1	15	0	0	0
6	-1	-1	+1	16	0	0	0
7	+1	+1	+1	17	0	0	0
8	-1	+1	+1	18	0	0	0
9	$+\alpha$	0	0	19	0	0	0
10	$-\alpha$	0	0	20	0	0	0

5.5 Quá trình thực nghiệm

Sơ đồ thực nghiệm được trình bày trong Hình 5.9. Các thí nghiệm tiện cứng được thực hiện trên máy tiện CNC BOEHRINGER DUS-400ti. Chi tiết được định vị và kẹp chặt trên mâm cặp 3 chấu tự định tâm kết hợp với mũi tâm quay, nhằm đảm bảo độ chính xác về vị trí và độ cứng vững trong quá trình gia công. Lực cắt được đo

trực tiếp trong quá trình tiện. Sau khi gia công, tiến hành đo độ nhám bề mặt chi tiết gia công và độ mòn dao. Dữ liệu thu thập được xử lý và phân tích, từ đó xây dựng mô hình toán thể hiện mối quan hệ giữa độ nhám bề mặt, độ mòn dao và lực cắt với các thông số hình học góc dao, đồng thời tiến hành tối ưu hóa các thông số góc dao cho quá trình tiện cứng.



Hình 5.9 Sơ đồ thực nghiệm

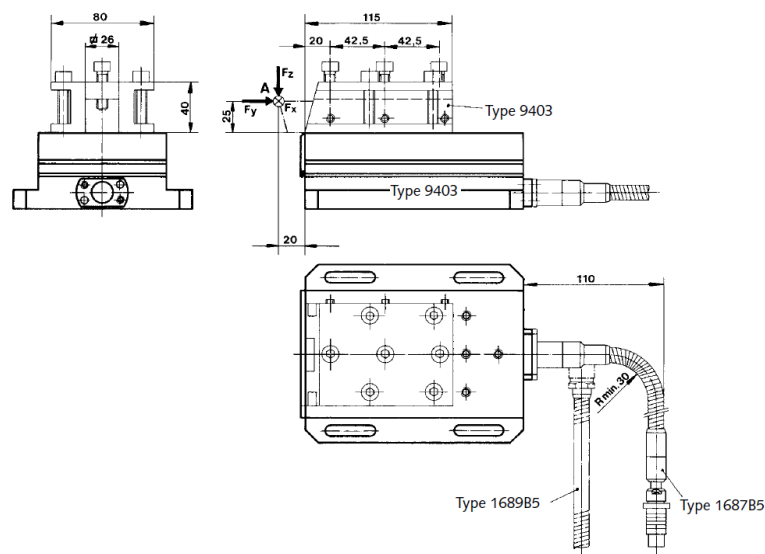
5.5.1 Đo lực cắt

Để đo lực cắt, nghiên cứu sử dụng cảm biến đo lực đa thành phần (Multicomponent Dynamometer) Kistler Type 9257B (Hình 5.10), có khả năng đo ba

thành phần lực trực giao. Thiết bị có độ nhạy lần lượt là - 7.955 pC/N, - 7.95 pC/N và - 3.715 pC/N đối với trục x, trục y và trục z trong phạm vi hiệu chuẩn 0-500 N. Chi tiết về phương pháp lắp hệ thống đo lực được thể hiện trong Hình 5.11 và mô tả trong Bảng 5.8.

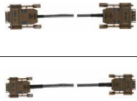
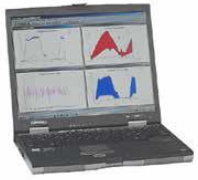


Hình 5.10 Cảm biến đo lực Kistler Type 9257B [111]



Hình 5.11 Kích thước lắp ráp cảm biến đo lực trong quá trình tiện [111]

Bảng 5.8 Chuỗi thiết bị được sử dụng khi đo lực [111]

					
Cảm biến lực	Cáp nối	Amplifier	Cáp nối	USB DAQ	Máy tính với phần mềm DynoWare

Lực cắt được đo theo ba hướng, bao gồm lực dọc trục (F_x), lực hướng kính (F_y) và lực tiếp tuyến (F_z) bằng lực kế Kistler Type 9257B. Tín hiệu đo từ cảm biến đo lực được khuếch đại bằng Amplifier và truyền đến máy tính qua thiết bị USB DAQ. Dữ liệu được xử lý bằng phần mềm Dynoware. Tần suất lấy mẫu trong thí nghiệm là 1 kHz. Quá trình đo lực minh họa ở Hình 5.12 và kết quả thể hiện trong Bảng 5.9.



Hình 5.12 Đo lực cắt trong tiện cứng

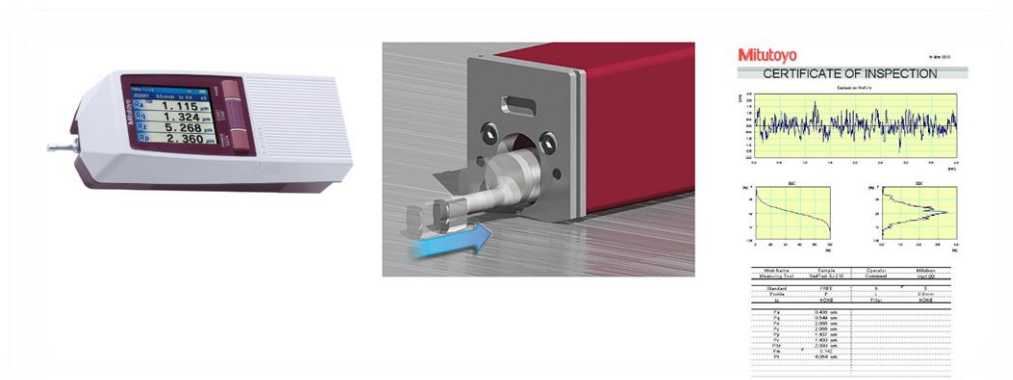
Bảng 5.9 Kết quả đo lực dựa trên thiết kế thí nghiệm CCD.

STT	κ_r (°)	γ_o (°)	λ_s (°)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F (N)
1	84	-3.6	-3.6	47.19	134.92	90.91	169.40
2	66	-3.6	-3.6	45.52	123.68	84.44	156.52
3	84	-8.4	-3.6	47.11	122.86	86.24	157.33
4	66	-8.4	-3.6	46.02	118.23	83.28	151.76
5	84	-3.6	-8.4	45.47	122.67	85.13	156.08
6	66	-3.6	-8.4	41.67	116.44	82.68	148.76
7	84	-8.4	-8.4	43.28	117.09	83.17	150.00
8	66	-8.4	-8.4	42.70	119.69	82.76	151.65
9	90	-6.0	-6.0	46.00	119.87	84.80	153.87
10	60	-6.0	-6.0	41.64	117.28	81.14	148.56
11	75	-2.0	-6.0	39.19	128.71	86.89	160.16
12	75	-10.0	-6.0	43.07	116.37	81.79	148.62

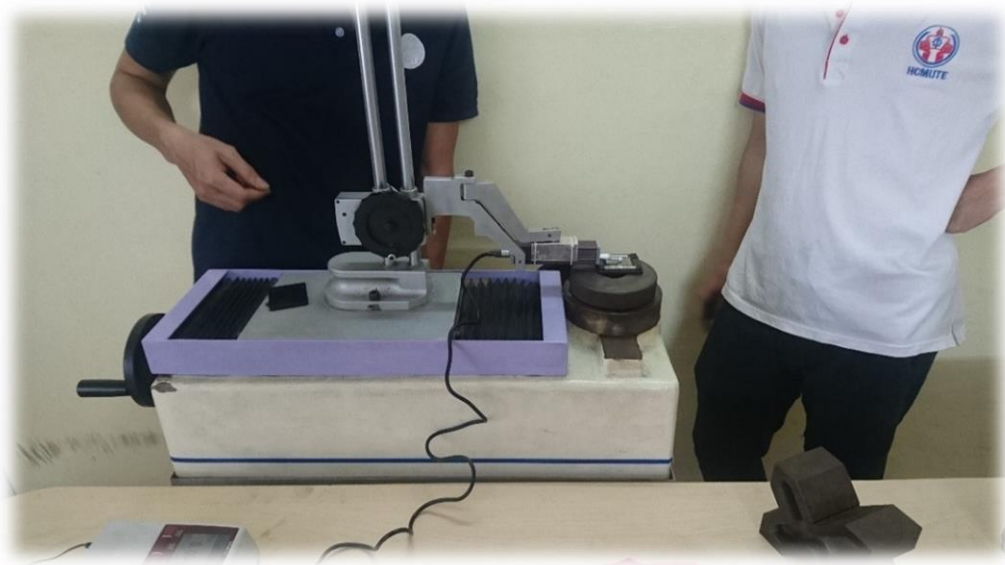
13	75	-6.0	-2.0	50.69	139.00	92.28	174.38
14	75	-6.0	-10.0	48.26	125.33	87.47	160.27
15	75	-6.0	-6.0	50.67	118.66	87.13	155.69
16	75	-6.0	-6.0	51.75	119.92	85.59	156.16
17	75	-6.0	-6.0	50.72	120.02	87.02	156.68
18	75	-6.0	-6.0	52.91	118.47	86.88	156.15
19	75	-6.0	-6.0	52.07	118.44	85.11	154.86
20	75	-6.0	-6.0	50.83	118.56	85.45	154.73

5.5.2 Đo độ nhám bề mặt (R_a)

Trong thí nghiệm, độ nhám bề mặt được đo bằng thiết bị MITUTOYO SJ-210 (Hình 5.13), với độ chính xác 1/1000 μm . Thiết bị có thể phân tích độ nhám theo nhiều tiêu chuẩn quốc tế (EN ISO, VDA, ANSI, JIS). Kết quả thu được sau khi đo gồm kết quả tính toán, hồ sơ đánh giá và đường cong biên độ [112]. Chiều dài đo là 4 mm, cut-off 0.8 mm. Thiết bị được ca-líp cẩn thận trước khi đo (Hình 5.14).



Hình 5.13 Hệ thống đo độ nhám bề mặt MITUTOYO SJ-210 178-390 [112]



Hình 5.14 Ca-líp thiết bị đo độ nhám

Quá trình đo được thực hiện tại 3 vị trí khác nhau trên một đường tròn, cách nhau 120° như Hình 5.15. Kết quả cuối cùng của mỗi thí nghiệm là giá trị trung bình của 3 phép đo, được thể hiện trong Bảng 5.10.



Hình 5.15 Đo độ nhám bề mặt mẫu thí nghiệm

Bảng 5.10 Kết quả thí nghiệm độ nhám bề mặt dựa trên thiết kế CCD

STT	κ_r (°)	γ_o (°)	λ_s (°)	Ra (μm)
1	84	-3.6	-3.6	0.279
2	66	-3.6	-3.6	0.730
3	84	-8.4	-3.6	0.594
4	66	-8.4	-3.6	0.866
5	84	-3.6	-8.4	0.720
6	66	-3.6	-8.4	0.899
7	84	-8.4	-8.4	1.004
8	66	-8.4	-8.4	0.890
9	90	-6.0	-6.0	0.836
10	60	-6.0	-6.0	0.995
11	75	-2.0	-6.0	0.766
12	75	-10.0	-6.0	1.020
13	75	-6.0	-2.0	0.252
14	75	-6.0	-10.0	0.767
15	75	-6.0	-6.0	0.870
16	75	-6.0	-6.0	0.853
17	75	-6.0	-6.0	0.852
18	75	-6.0	-6.0	0.906
19	75	-6.0	-6.0	0.919
20	75	-6.0	-6.0	0.876

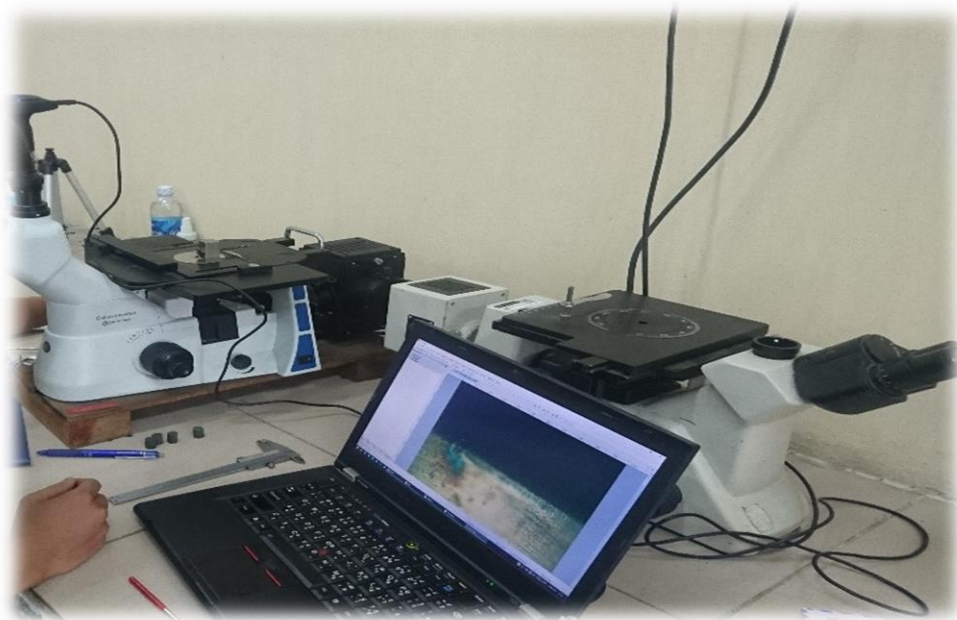
5.5.3 Đo độ mòn dao (VB)

Độ mòn dao được đo bằng kính hiển vi Oxion Inverso (Hình 5.16) tích hợp phần mềm Amscope, với độ chính xác 1/100 μm . Kính hiển vi trang bị đèn halogen 50W, bộ lọc phân cực và màu, phù hợp cho nhiều ứng dụng đo lường [113].



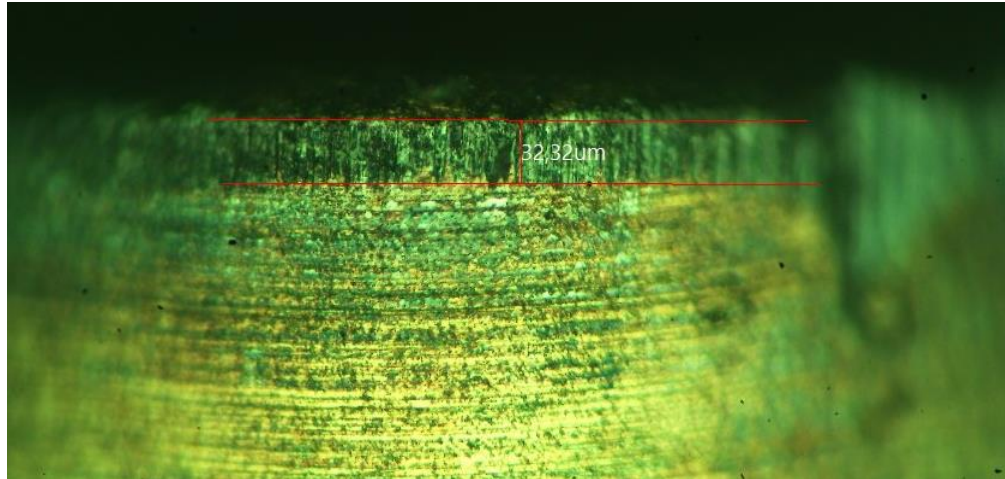
Hình 5.16 Kính hiển vi Oxion Inverso materials science [113]

Quá trình đo mòn dao được thực hiện theo tiêu chuẩn ISO 3685:1993 (Hình 5.17). Trước khi đo, thiết bị đo được ca-líp một cách kỹ lưỡng. Các dạng mòn dao quan sát được trong nghiên cứu bao gồm mòn dao mặt trước, mòn mặt sau và mòn rãnh khía (dạng chữ V).



Hình 5.17 Quá trình đo mòn dao

Mòn cơ học do ma sát giữa mặt sau dao và chi tiết gia công là cơ chế mòn chính trong nghiên cứu này. Như minh họa ở Hình 5.18, các rãnh mòn định hướng dọc theo hướng cắt do các hạt cứng (martensite) trong vật liệu gây ra, tương tự kết quả nghiên cứu của Das [16] và Pavel [114]. Do chiều sâu cắt nhỏ (0.2mm) và bán kính mũi dao lớn (0.8mm), quá trình mòn chỉ xảy ra ở bán kính mũi dao. Kết quả đo mòn mặt sau được thể hiện trong Bảng 5.11.



Hình 5.18 Mòn mặt sau trong thí nghiệm số 17: $\gamma_o = -6^\circ$, $\lambda_s = -6^\circ$ và $K_r = 75^\circ$

Bảng 5.11 Kết quả thí nghiệm đo độ mòn dao dựa trên thiết kế CCD

STT	κ_r ($^\circ$)	γ_o ($^\circ$)	λ_s ($^\circ$)	VB (μm)
1	84	-3.6	-3.6	44.04
2	66	-3.6	-3.6	44.82
3	84	-8.4	-3.6	35.98
4	66	-8.4	-3.6	32.24
5	84	-3.6	-8.4	31.24
6	66	-3.6	-8.4	32.00
7	84	-8.4	-8.4	30.12
8	66	-8.4	-8.4	23.54
9	90	-6.0	-6.0	37.80
10	60	-6.0	-6.0	29.27

11	75	-2.0	-6.0	42.11
12	75	-10.0	-6.0	27.70
13	75	-6.0	-2.0	50.26
14	75	-6.0	-10.0	22.20
15	75	-6.0	-6.0	31.85
16	75	-6.0	-6.0	32.01
17	75	-6.0	-6.0	32.33
18	75	-6.0	-6.0	32.93
19	75	-6.0	-6.0	31.63
20	75	-6.0	-6.0	31.92

5.6 Kết luận

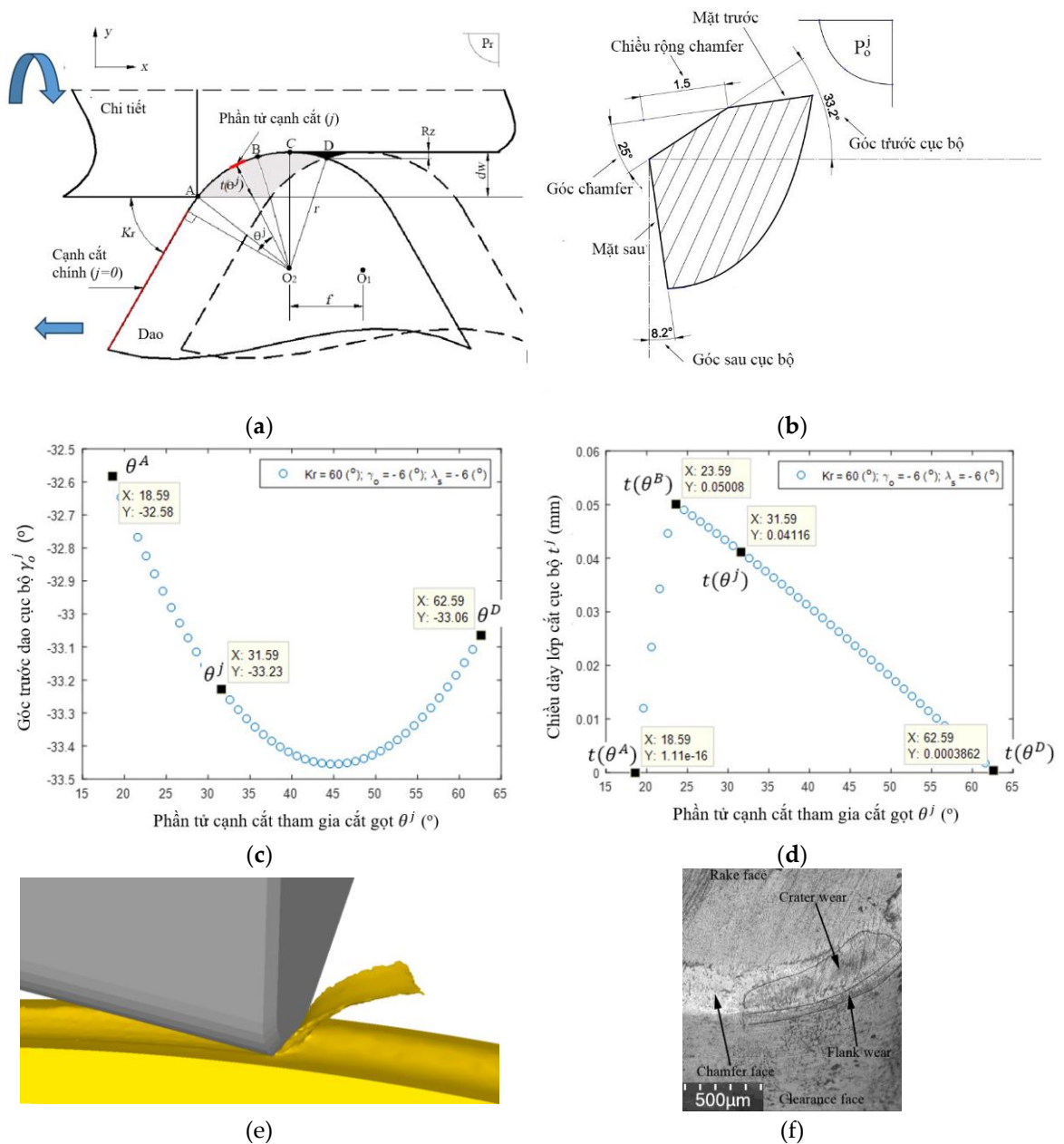
Nghiên cứu đã phát triển phương pháp thiết kế hệ thống đồ gá nhằm điều chỉnh các góc dao cho mảnh dao tiêu chuẩn, đồng thời phân tích và lựa chọn phương pháp quy hoạch thực nghiệm thích hợp. Nội dung nghiên cứu trình bày chi tiết quá trình thực nghiệm tiện cứng, gồm lựa chọn thông số công nghệ (vật liệu dao, hình học dao, chế độ cắt), đo lực cắt, độ mòn dao và độ nhám bề mặt. Các kết quả này sẽ là cơ sở cho việc xây dựng mô hình toán và tối ưu hóa thông số góc dao trong quá trình tiện cứng.

Chương 6:

PHÂN TÍCH KẾT QUẢ VÀ TỐI ƯU HÓA QUÁ TRÌNH TIỆN CỨNG

6.1 Phân tích mô hình toán hình học quá trình tiện cứng

Tiện cứng là một quá trình gia công tinh với tốc độ cắt cao, bước tiến dao nhỏ và chiều sâu cắt không vượt quá 0.2 mm [115], [116], [117], [5]. Dựa trên phân tích mô hình toán hình học quá trình tiện cứng, có thể thấy rằng quá trình cắt chỉ giới hạn ở bán kính mũi dao, như Hình 6.1.



Hình 6.1 Phân tích quá trình tiện cứng cho thí nghiệm số 10:

- (a) Sơ đồ nguyên lý; (b) Thông số hình học dao của phần tử cạnh cắt j tại $\theta^j=31.59^\circ$; (c) Góc trước dao cục bộ; (d) Chiều dày lớp cắt cục bộ; (e) Quá trình cắt dựa trên mô phỏng FEM; (f) Kết quả mòn dao thực nghiệm

Tại mỗi điểm cắt, các thông số hình học dao và chiều dày lớp cắt đều thay đổi (Hình 6.1 (c, d)). Do chiều dày lớp cắt rất nhỏ, sự tiếp xúc giữa phoi và dao chỉ ở mặt vát (chamfer) của cạnh cắt, dẫn đến góc trước cục bộ trở nên rất lớn. Từ Hình 6.1 (d), quá trình cắt diễn ra từ $\theta^A = 18.59^\circ$ đến $\theta^D = 62.59^\circ$. Tại phần tử cạnh cắt $\theta^B = 23.59^\circ$, chiều dày lớp cắt lớn nhất $t(\theta^B) = 0.05$ (mm). Bảng 6.1 thể hiện góc trước trung bình của các phần tử cạnh cắt bán kính mũi dao tham gia quá trình cắt.

Bảng 6.1 Góc trước trung bình của các phần tử bán kính mũi dao tham gia cắt dựa trên thiết kế thí nghiệm CCD

STT	K_r (°)	γ_o (°)	λ_s (°)	γ_{ave} (°)
1	84	-3.6	-3.6	-29.7
2	66	-3.6	-3.6	-30
3	84	-8.4	-3.6	-31.7
4	66	-8.4	-3.6	-33.2
5	84	-3.6	-8.4	-33.9
6	66	-3.6	-8.4	-33.3
7	84	-8.4	-8.4	-35.9
8	66	-8.4	-8.4	-36.5
9	90	-6.0	-6.0	-32.4
10	60	-6.0	-6.0	-33.2
11	75	-2.0	-6.0	-30.9
12	75	-10.0	-6.0	-35.3
13	75	-6.0	-2.0	-29.9
14	75	-6.0	-10.0	-36.3

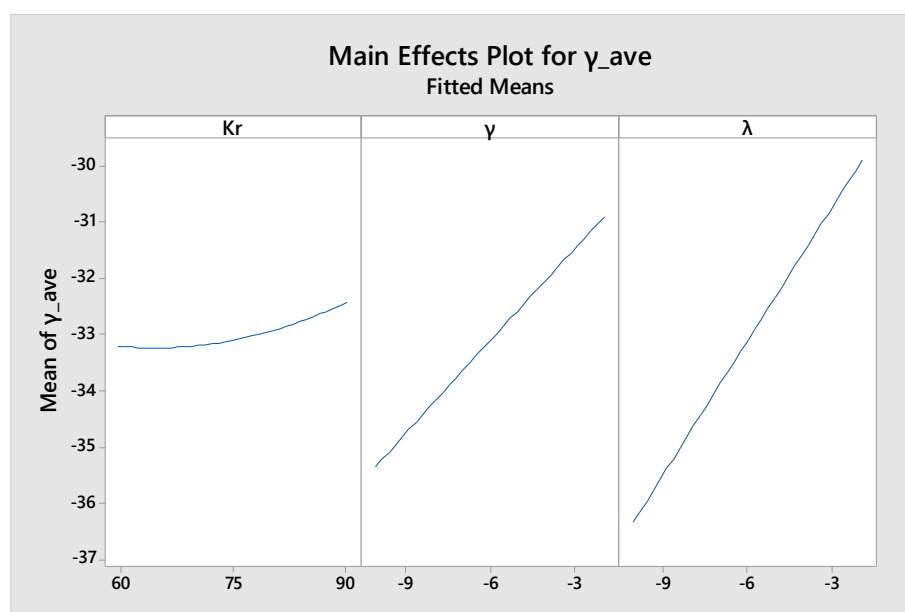
15	75	-6.0	-6.0	-33.1
16	75	-6.0	-6.0	-33.1
17	75	-6.0	-6.0	-33.1
18	75	-6.0	-6.0	-33.1
19	75	-6.0	-6.0	-33.1
20	75	-6.0	-6.0	-33.1

Để đánh giá ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến góc trước trung bình trong quá trình tiện cứng, phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) đã được áp dụng. Đây là một phương pháp thống kê được sử dụng để phân tích và đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào đến các đáp ứng đầu ra trong quá trình kỹ thuật. Phân tích được tiến hành với mức độ tin cậy 95%. Khi giá trị P nhỏ hơn 0.05, mô hình được xem là có ý nghĩa thống kê ở mức tin cậy 95%. Một hệ số quan trọng khác là hệ số tương quan R^2 , thể hiện mức độ phù hợp của mô hình toán với dữ liệu thực nghiệm. Giá trị R^2 càng cao thì mô hình càng tương thích với dữ liệu, phản ánh khả năng dự đoán chính xác của mô hình. Bảng 6.2 trình bày kết quả phân tích ANOVA cho góc trước trung bình.

Bảng 6.2 Phân tích ANOVA cho góc trước trung bình (γ_{ave})

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	73.7959	99.98%	73.7959	8.1995	6783.94	0.000
Linear	3	72.5213	98.26%	72.5213	24.1738	20000.32	0.000
K_r	1	0.7243	0.98%	0.7243	0.7243	599.22	0.000
γ_o	1	23.1987	31.43%	23.1987	23.1987	19193.58	0.000
λ_s	1	48.5984	65.84%	48.5984	48.5984	40208.15	0.000
Square	3	0.1496	0.20%	0.1496	0.0499	41.26	0.000
$K_r * K_r$	1	0.1483	0.20%	0.1426	0.1426	118.01	0.000
$\gamma_o * \gamma_o$	1	0.0006	0.00%	0.0007	0.0007	0.60	0.458
$\lambda_s * \lambda_s$	1	0.0007	0.00%	0.0007	0.0007	0.60	0.458
2-Way Interaction	3	1.1250	1.52%	1.1250	0.3750	310.26	0.000

$K_r * \gamma_o$	1	0.7200	0.98%	0.7200	0.7200	595.70	0.000
$K_r * \lambda_s$	1	0.4050	0.55%	0.4050	0.4050	335.08	0.000
$\gamma_o * \lambda_s$	1	0.0000	0.00%	0.0000	0.0000	0.00	1.000
Error	10	0.0121	0.02%	0.0121	0.0012		
Lack-of-Fit	5	0.0121	0.02%	0.0121	0.0024		
Pure Error	5	0.0000	0.00%	0.0000	0.0000		
Total	19	73.8080	100.00%				



Hình 6.2 Ảnh hưởng của các nhân tố đầu vào đến góc trước trung bình (γ_{ave})

Từ Bảng 6.2, kết quả cho thấy nhân tố ảnh hưởng lớn nhất là góc nâng dao với 65.84%, tiếp theo là góc trước, đóng góp 31.43%. Góc nghiêng dao chỉ chiếm 0.98% tác động đến góc trước trung bình. Ảnh hưởng tương tác của các thông số góc dao đến góc trước trung bình là không đáng kể. Do đó, để tối ưu hóa quá trình tiện cứng, nên tập trung điều chỉnh góc nâng dao và góc trước. Góc nghiêng dao có thể bỏ qua do ảnh hưởng không đáng kể.

Đồ thị ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến góc trước trung bình được trình bày trong Hình 6.2. Khi tăng góc trước và góc nâng dao âm, làm tăng góc trước trung bình của các phần tử cạnh cắt tại bán kính mũi dao tham gia quá trình cắt.

6.2 Phân tích kết quả thực nghiệm quá trình tiện cứng

Các kết quả thực nghiệm được trình bày trong Bảng 6.3.

Bảng 6.3 Các kết quả thực nghiệm dựa trên thiết kế thí nghiệm CCD

STT	κ_r (°)	γ_o (°)	λ_s (°)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F (N)	Ra (μm)	VB (μm)
1	84	-3.6	-3.6	47.19	134.92	90.91	169.40	0.279	44.04
2	66	-3.6	-3.6	45.52	123.68	84.44	156.52	0.730	44.82
3	84	-8.4	-3.6	47.11	122.86	86.24	157.33	0.594	35.98
4	66	-8.4	-3.6	46.02	118.23	83.28	151.76	0.866	32.24
5	84	-3.6	-8.4	45.47	122.67	85.13	156.08	0.720	31.24
6	66	-3.6	-8.4	41.67	116.44	82.68	148.76	0.899	32.00
7	84	-8.4	-8.4	43.28	117.09	83.17	150.00	1.004	30.12
8	66	-8.4	-8.4	42.70	119.69	82.76	151.65	0.890	23.54
9	90	-6.0	-6.0	46.00	119.87	84.80	153.87	0.836	37.80
10	60	-6.0	-6.0	41.64	117.28	81.14	148.56	0.995	29.27
11	75	-2.0	-6.0	39.19	128.71	86.89	160.16	0.766	42.11
12	75	-10.0	-6.0	43.07	116.37	81.79	148.62	1.020	27.70
13	75	-6.0	-2.0	50.69	139.00	92.28	174.38	0.252	50.26
14	75	-6.0	-10.0	48.26	125.33	87.47	160.27	0.767	22.20
15	75	-6.0	-6.0	50.67	118.66	87.13	155.69	0.870	31.85
16	75	-6.0	-6.0	51.75	119.92	85.59	156.16	0.853	32.01
17	75	-6.0	-6.0	50.72	120.02	87.02	156.68	0.852	32.33
18	75	-6.0	-6.0	52.91	118.47	86.88	156.15	0.906	32.93
19	75	-6.0	-6.0	52.07	118.44	85.11	154.86	0.919	31.63
20	75	-6.0	-6.0	50.83	118.56	85.45	154.73	0.876	31.92

6.2.1 Phân tích và mô hình toán độ nhám bề mặt

Từ Bảng 6.4, phân tích cho thấy góc nâng dao có ảnh hưởng lớn nhất đến độ nhám bề mặt với 32.54%, tiếp theo là góc trước và góc nghiêng với 11.88% và 9.97%,

tương ứng. Các tương tác $\kappa_r * \lambda_s$, và $\kappa_r * \gamma_o$ có ảnh hưởng đáng kể đến độ nhám bề mặt với 6.6 % và 3.39%, tương ứng.

Bảng 6.4 Phân tích ANOVA cho độ nhám bề mặt (R_a)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	0.803015	97.89%	0.803015	0.089224	51.49	0.000
Linear	3	0.446212	54.39%	0.446212	0.148737	85.83	0.000
K_r	1	0.081797	9.97%	0.081797	0.081797	47.20	0.000
γ_o	1	0.097448	11.88%	0.097448	0.097448	56.23	0.000
λ_s	1	0.266966	32.54%	0.266966	0.266966	154.06	0.000
Square	3	0.270963	33.03%	0.270963	0.090321	52.12	0.000
$K_r * K_r$	1	0.006131	0.75%	0.001256	0.001256	0.72	0.415
$\gamma_o * \gamma_o$	1	0.002692	0.33%	0.000026	0.000026	0.02	0.905
$\lambda_s * \lambda_s$	1	0.262140	31.95%	0.262140	0.262140	151.27	0.000
2-Way	3	0.085840	10.46%	0.085840	0.028613	16.51	0.000
Interaction							
$K_r * \gamma_o$	1	0.027848	3.39%	0.027848	0.027848	16.07	0.002
$K_r * \lambda_s$	1	0.054120	6.60%	0.054120	0.054120	31.23	0.000
$\gamma_o * \lambda_s$	1	0.003872	0.47%	0.003872	0.003872	2.23	0.166
Error	10	0.017329	2.11%	0.017329	0.001733		
Lack-of-Fit	5	0.013506	1.65%	0.013506	0.002701	3.53	0.096
Pure Error	5	0.003823	0.47%	0.003823	0.000765		
Total	19	0.820344	100.00%				

Ảnh hưởng chính và tương tác của các thông số góc dao đến độ nhám bề mặt được thể hiện trong Hình 6.3. Khi góc trước và góc nâng dao tăng theo hướng âm, độ nhám bề mặt tăng. Tuy nhiên, nếu góc nâng dao tăng vượt qua một giới hạn nhất định ($\lambda_s = -8.1^\circ$) như Hình 6.3(a), độ nhám sẽ giảm. Đây là một phát hiện mới và đáng chú ý trong nghiên cứu về tiện cứng.

Hiện tượng trên có thể giải thích như sau: khi góc nâng dao và góc trước âm tăng, dẫn đến tăng góc trước cục bộ theo hướng âm và góc sau cục bộ tương ứng, trong đó sự tăng do góc nâng dao chiếm ưu thế (điều này đã được phân tích trong mô

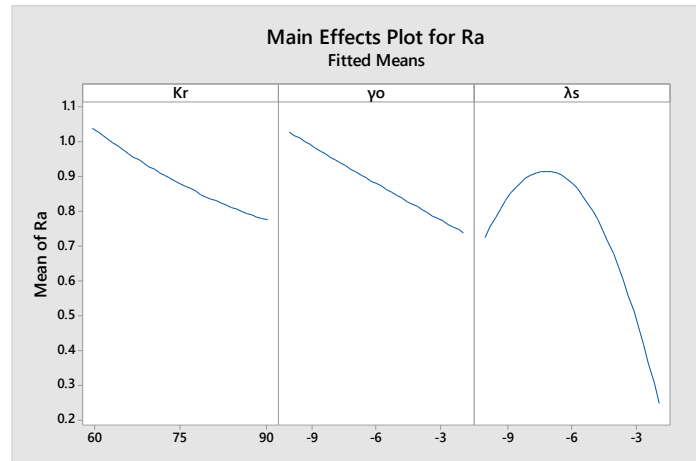
hình toán hình học quá trình tiện cứng ở trên). Góc trước cục bộ âm tăng làm tăng chiều dài tiếp xúc giữa phoi và mặt trước dao, đồng thời tăng tỷ số nén phoi (chip compression ratio - CCR), gây rung động và làm độ nhám bề mặt tăng. Kết quả này tương tự nghiên cứu của Singh và cộng sự [23]. Tuy nhiên, Singh và cộng sự chỉ thay đổi góc trước cục bộ bằng cách sử dụng các mảnh dao có góc vát (chamfer) khác nhau. Ngược lại, việc tăng góc sau cục bộ làm giảm diện tích tiếp xúc giữa mặt sau dao và bề mặt vừa gia công, giảm ma sát do hiện tượng đàn hồi (spring-back) của vật liệu gia công [103], do đó giảm rung động và cải thiện độ nhám bề mặt, tương tự như nghiên cứu của Senthikumar [118]. Đến một giới hạn nào đó, tác động tích cực do tăng góc sau cục bộ lớn hơn tác động tiêu cực do tăng góc trước cục bộ, khiến độ nhám bề mặt giảm. Nói cách khác, với các góc dao tối ưu, quá trình cắt trở nên dễ dàng hơn.

Độ nhám cũng giảm khi góc nghiêng dao tăng, kết quả này phù hợp với nghiên cứu của Sharma [26] và Zerti [62]. Nguyên nhân là khi thay đổi góc nghiêng từ 60° đến 90° sẽ thay đổi vị trí cắt trên bán kính mũi dao, đồng thời giảm góc trước cục bộ của các phần tử cạnh cắt như phân tích ở trên, dẫn đến giảm độ nhám bề mặt. Tuy nhiên, Neseli và cộng sự [25] lại cho thấy góc nghiêng dao và độ nhám bề mặt có cùng xu hướng tăng. Sự khác biệt này có thể do quá trình cắt diễn ra ở bán kính mũi dao hoặc ở cạnh cắt chính.

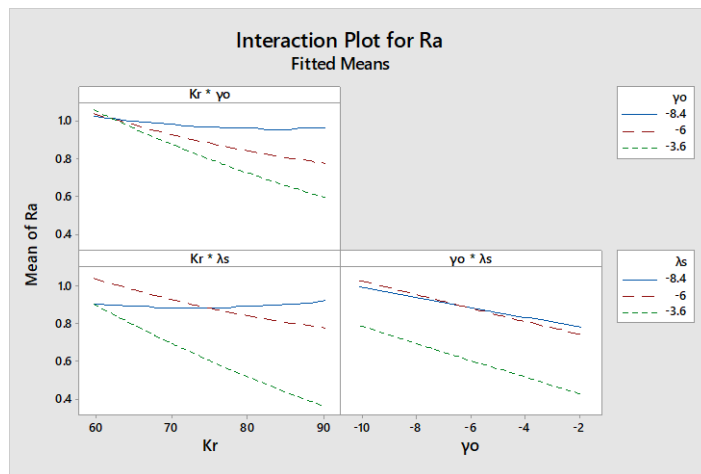
Mô hình toán mối quan hệ giữa độ nhám bề mặt với các thông số góc dao như sau:

$$Ra = 3.581 - 0.0654 \kappa_r + 0.1495 \gamma_o - 0.0806 \lambda_s + 0.000117 \kappa_r^2 + 0.00024 \gamma_o^2 - 0.02373 \lambda_s^2 - 0.002731 \kappa_r \gamma_o - 0.003808 \kappa_r \lambda_s - 0.00382 \gamma_o \lambda_s \quad (6.1)$$

Hệ số tương quan R^2 của phương trình (6.1) là 97.89%, cho thấy mô hình có khả năng dự đoán chính xác cao. Hình 6.4 thể hiện bề mặt đáp ứng của độ nhám bề mặt với góc nghiêng và góc nâng dao, trong đó góc trước được giữ cố định.



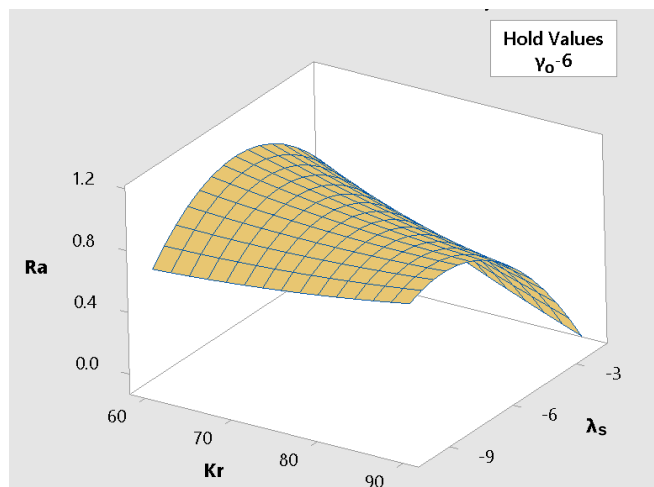
(a)



(b)

Hình 6.3 Ảnh hưởng của các nhân tố đầu vào đến độ nhám bề mặt (R_a):

(a) Ảnh hưởng chính; (b) Ảnh hưởng tương tác



Hình 6.4 Bề mặt đáp ứng của độ nhám bề mặt theo góc nghiêng và góc nâng dao

6.2.2 Phân tích và mô hình toán độ mòn dao

Từ Bảng 6.5, phân tích cho thấy góc nâng dao là nhân tố chính ảnh hưởng đến mòn dao với 60.06%, góc trước là 23.37% và góc nghiêng dao là 4.2%. Các yếu tố khác ảnh hưởng không đáng kể.

Bảng 6.5 Phân tích ANOVA cho độ mòn dao (VB)

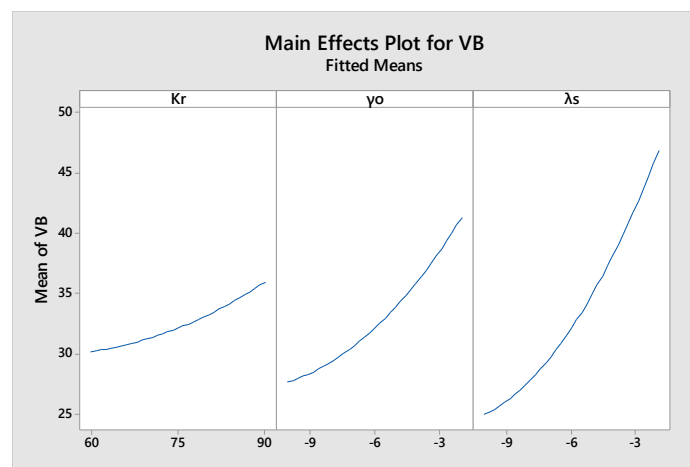
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	878.361	94.60%	878.361	97.596	19.45	0.000
Linear	3	813.702	87.63%	813.702	271.234	54.06	0.000
K_r	1	39.013	4.20%	39.013	39.013	7.78	0.019
γ_o	1	217.004	23.37%	217.004	217.004	43.25	0.000
λ_s	1	557.684	60.06%	557.684	557.684	111.15	0.000
Square	3	30.764	3.31%	30.764	10.255	2.04	0.172
$K_r * K_r$	1	0.314	0.03%	1.478	1.478	0.29	0.599
$\gamma_o * \gamma_o$	1	6.932	0.75%	9.382	9.382	1.87	0.201
$\lambda_s * \lambda_s$	1	23.518	2.53%	23.518	23.518	4.69	0.056
2-Way	3	33.895	3.65%	33.895	11.298	2.25	0.145
Interaction							
$K_r * \gamma_o$	1	17.582	1.89%	17.582	17.582	3.50	0.091
$K_r * \lambda_s$	1	1.022	0.11%	1.022	1.022	0.20	0.661
$\gamma_o * \lambda_s$	1	15.290	1.65%	15.290	15.290	3.05	0.111
Error	10	50.173	5.40%	50.173	5.017		
Lack-of-Fit	5	49.108	5.29%	49.108	9.822	46.12	0.000
Pure Error	5	1.065	0.11%	1.065	0.213		
Total	19	928.534	100.00%				

Như trong Hình 6.5, độ mòn dao giảm khi góc trước và góc nâng dao tăng theo hướng âm và góc nghiêng dao giảm từ 90° xuống 60°. Nguyên nhân của hiện tượng này là do tăng góc sau cục bộ khi giảm góc nghiêng dao, tăng góc trước và góc nâng dao như đã phân tích mô hình toán hình học ở trên. Việc tăng góc sau cục bộ làm giảm diện tích tiếp xúc và ma sát giữa mặt sau dao và bề mặt vừa gia công, do hiện

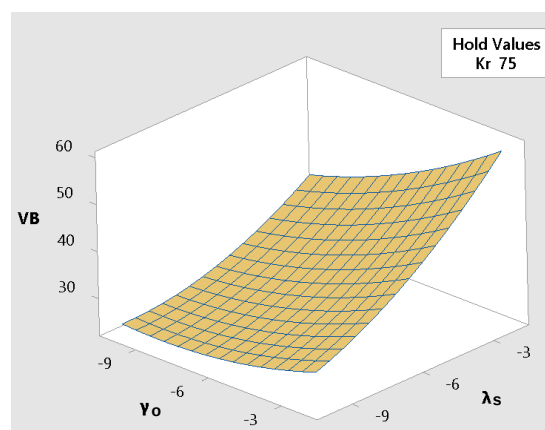
tượng đàn hồi (spring-back) của vật liệu phôi. Điều này dẫn đến giảm mòn mặt sau dao.

Mô hình toán mối quan hệ giữa độ mòn dao mặt sau với các yếu tố đầu vào được thể hiện qua phương trình (6.2), với hệ số tương quan $R^2=94.6\%$, cho thấy mức độ tương thích cao của mô hình. Hình 6.6 minh họa bề mặt đáp ứng của mòn dao với góc trước và góc nâng dao, trong đó góc nghiêng dao được giữ cố định.

$$VB = 126.8 - 0.92 \kappa_r + 9.96 \gamma_o + 8.05 \lambda_s + 0.00401 \kappa_r^2 + 0.142 \gamma_o^2 + 0.225 \lambda_s^2 - 0.0686 \kappa_r \gamma_o - 0.0166 \kappa_r \lambda_s + 0.240 \gamma_o \lambda_s \quad (6.2)$$



Hình 6.5 Ảnh hưởng chính của các nhân tố đầu vào đến độ mòn dao mặt sau (VB)



Hình 6.6 Bề mặt đáp ứng của độ mòn dao theo góc trước và góc nâng dao

Phân tích độ nhám bề mặt và độ mòn dao cho thấy xu hướng chung của ảnh hưởng các thông số góc dao đến độ nhám bề mặt và độ mòn dao trong quá trình tiện cứng là trái ngược nhau.

6.2.3 Phân tích và mô hình toán lực cắt

Từ Bảng 6.1 cho thấy lực hướng kính (F_y) là thành phần lực lớn nhất, tiếp theo là lực tiếp tuyến (F_z) và lực dọc trục (F_x) là thành phần lực nhỏ nhất, kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đó của Khamel [9], Azizi [119] và Bouacha [120]. Hiện tượng này có thể giải thích dựa trên phân tích hình học lưỡi cắt và đặc điểm quá trình tiện cứng. Do bán kính mũi dao lớn ($r = 0.8 \text{ mm}$) và chiều sâu cắt nhỏ ($d_w = 0.2 \text{ mm}$) nên quá trình cắt chỉ diễn ra tại bán kính mũi dao, dẫn đến lực hướng kính F_y có giá trị lớn hơn so với các lực khác. Trong tiện truyền thống lực tiếp tuyến lớn nhất [121]. Sự thay đổi lực cắt khi thay đổi các thông số góc dao trong nghiên cứu là không đáng kể ($F=148\text{-}174 \text{ N}$).

Bảng 6.6 cho thấy góc nâng dao ảnh hưởng lớn nhất đến lực cắt, chiếm 25.02%, tiếp theo là góc trước 14.26% và góc nghiêng dao 10.04%. Mặc dù có tương tác giữa các góc dao đến lực cắt, mức độ ảnh hưởng này không đáng kể (2.56 – 4.15%).

Hình 6.7 thể hiện ảnh hưởng của các thông số góc dao đến lực cắt, cho thấy lực cắt giảm khi góc nâng dao và góc trước tăng theo hướng âm. Tuy nhiên, khi góc nâng dao tăng vượt quá một giới hạn nhất định ($\lambda_s = -7.2^\circ$), lực cắt tăng. Dựa trên phân tích mô hình toán hình học quá trình tiện cứng, hiện tượng này có thể được giải thích như sau: khi tăng góc nâng dao và góc trước theo hướng âm dẫn đến tăng góc trước cục bộ âm và góc sau cục bộ tương ứng. Điều này dẫn đến lực pháp tuyến và lực ma sát mặt trước dao tăng, trong khi lực tác dụng trên mặt sau giảm, đạt đến trạng thái cân bằng tại $\lambda_s = -7.2^\circ$, tương ứng với lực cắt nhỏ nhất.

Phương trình hồi qui bậc hai mô tả mối quan hệ giữa các yếu tố đầu vào và lực cắt như sau:

$$F_x = -171.2 + 5.067 \kappa_r - 9.53 \gamma_o - 0.23 \lambda_s - 0.03249 \kappa_r^2 - 0.6250 \gamma_o^2 - 0.1034 \lambda_s^2 + 0.0220 \kappa_r \gamma_o - 0.0093 \kappa_r \lambda_s - 0.0344 \gamma_o \lambda_s \quad (R^2=95.43\%) \quad (6.3)$$

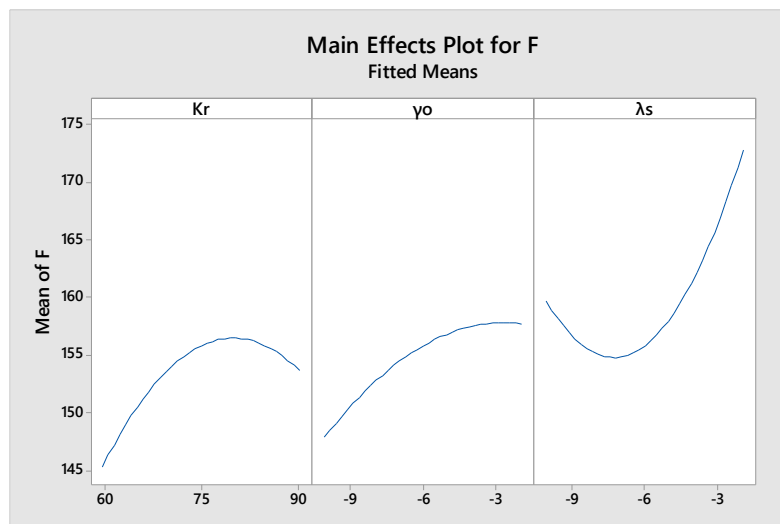
$$F_y = 35.1 + 2.62 \kappa_r - 2.16 \gamma_o + 6.64 \lambda_s - 0.00976 \kappa_r^2 + 0.111 \gamma_o^2 + 0.712 \lambda_s^2 + 0.0894 \kappa_r \gamma_o + 0.0708 \kappa_r \lambda_s + 0.329 \gamma_o \lambda_s \quad (R^2=93.19\%) \quad (6.4)$$

$$F_z = -39.0 + 3.071 \kappa_r - 3.18 \gamma_o + 0.61 \lambda_s - 0.01666 \kappa_r^2 - 0.1486 \gamma_o^2 + 0.1974 \lambda_s^2 + 0.0321 \kappa_r \gamma_o + 0.0381 \kappa_r \lambda_s + 0.0857 \gamma_o \lambda_s \quad (R^2=94.35\%) \quad (6.5)$$

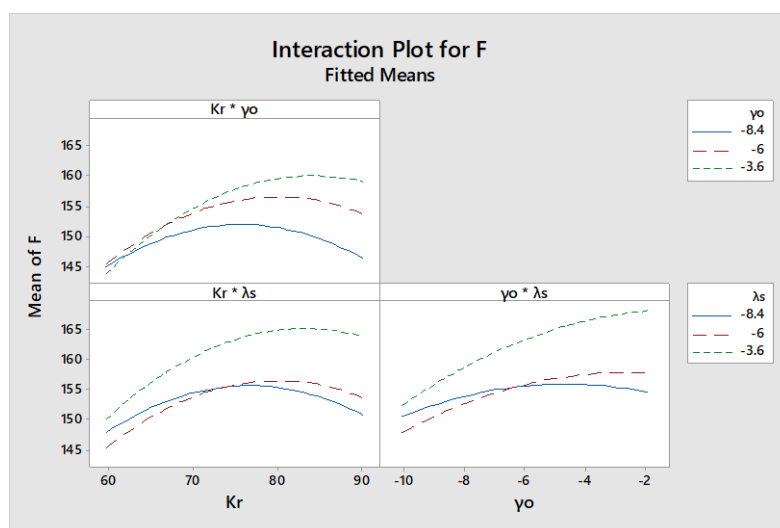
$$F = -48.3 + 5.325 \kappa_r - 6.26 \gamma_o + 5.36 \lambda_s - 0.02697 \kappa_r^2 - 0.1811 \gamma_o^2 + 0.6273 \lambda_s^2 + 0.0942 \kappa_r \gamma_o + 0.0739 \kappa_r \lambda_s + 0.296 \gamma_o \lambda_s \quad (R^2=95.52\%) \quad (6.6)$$

Bảng 6.6 Phân tích ANOVA cho lực cắt (F)

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	762.048	95.52%	762.048	84.672	23.70	0.000
Linear	3	393.520	49.33%	393.520	131.173	36.72	0.000
K_r	1	80.132	10.04%	80.132	80.132	22.43	0.001
γ_o	1	113.801	14.26%	113.801	113.801	31.86	0.000
λ_s	1	199.587	25.02%	199.587	199.587	55.87	0.000
Square	3	291.768	36.57%	291.768	97.256	27.22	0.000
$K_r * K_r$	1	81.986	10.28%	66.961	66.961	18.74	0.001
$\gamma_o * \gamma_o$	1	26.617	3.34%	15.262	15.262	4.27	0.066
$\lambda_s * \lambda_s$	1	183.165	22.96%	183.165	183.165	51.27	0.000
2-Way Interaction	3	76.761	9.62%	76.761	25.587	7.16	0.007
$K_r * \gamma_o$	1	33.120	4.15%	33.120	33.120	9.27	0.012
$K_r * \lambda_s$	1	20.408	2.56%	20.408	20.408	5.71	0.038
$\gamma_o * \lambda_s$	1	23.232	2.91%	23.232	23.232	6.50	0.029
Error	10	35.723	4.48%	35.723	3.572		
Lack-of-Fit	5	32.703	4.10%	32.703	6.541	10.83	0.010
Pure Error	5	3.021	0.38%	3.021	0.604		
Total	19	797.772	100.00%				



(a)

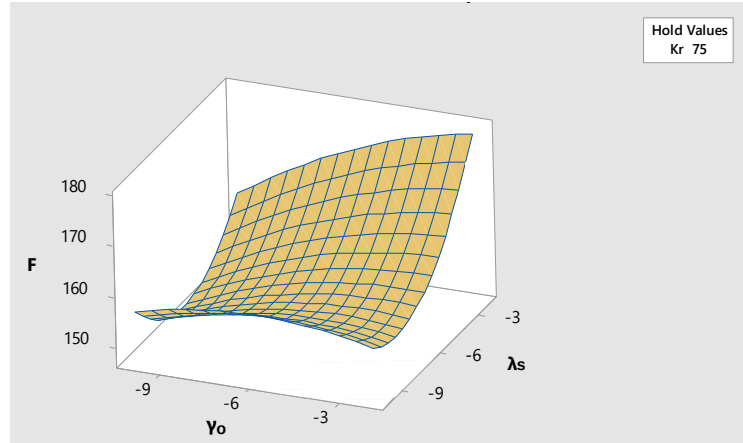


(b)

Hình 6.7 Ảnh hưởng của các nhân tố đầu vào đến lực cắt (F):

(a) Ảnh hưởng chính; (b) Ảnh hưởng tác

Hình 6.8 thể hiện bề mặt đáp ứng của lực cắt với góc trước và góc nâng dao, trong đó góc nghiêng được giữ cố định.

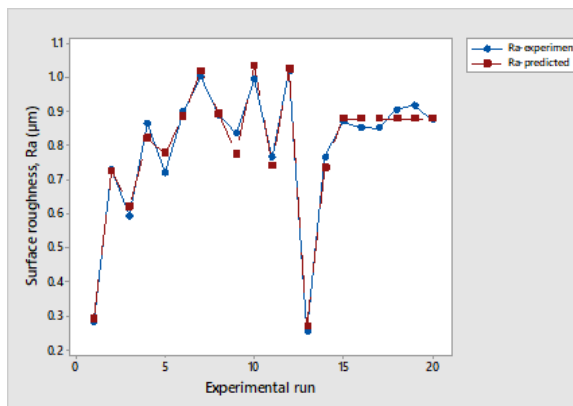


Hình 6.8 Bề mặt đáp ứng của lực cắt theo góc trước và góc nâng dao

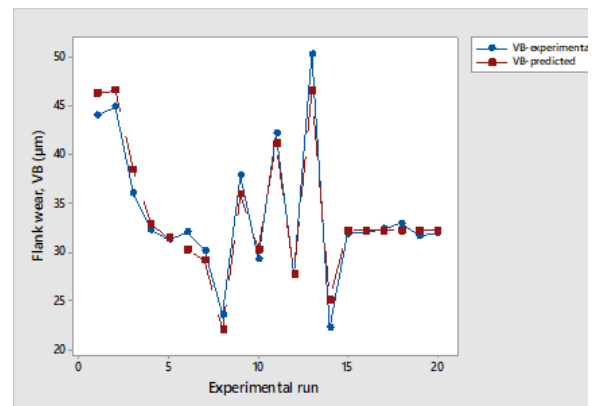
6.3 So sánh kết quả thực nghiệm và phương trình hồi qui.

So sánh các kết quả thực nghiệm và các giá trị dự đoán từ phương trình hồi qui về độ nhám bề mặt, mòn dao và lực cắt dựa trên phương pháp RSM được thể hiện trong Hình 6.9. Kết quả cho thấy giá trị dự đoán từ các phương trình hồi quy rất gần với giá trị đo được trong thực nghiệm.

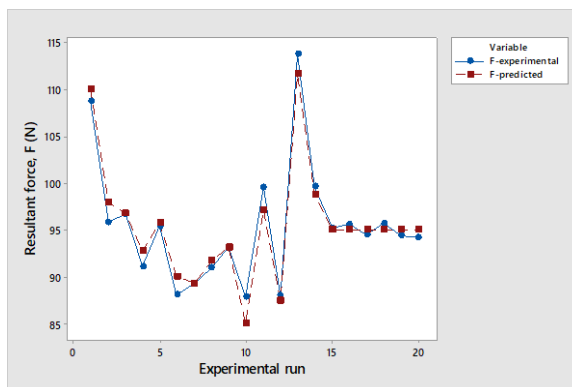
Phương trình hồi qui độ nhám bề mặt (6.1), độ mòn dao (6.2) và lực cắt (6.6) có hệ tương quan R^2 lần lượt là 97.89%; 94.6% và 95.43% tương ứng. Điều này chứng tỏ mô hình toán khá tương thích với kết quả thực nghiệm. Trong phân tích thống kê, khi $R^2 > 50\%$, mô hình được xem là tương thích. Giá trị R^2 càng cao thì mối quan hệ giữa biến độc lập (đầu vào) và đáp ứng đầu ra (đầu ra) càng chặt chẽ. Trong nghiên cứu thường chọn $R^2 > 90\%$.



(a)



(b)



(c)

Hình 6.9 So sánh kết quả thí nghiệm và dự đoán từ phương trình hồi qui:

(a) Độ nhám bề mặt; (b) Độ mòn dao; (c) Lực cắt

6.4 Tối ưu hóa quá trình tiện cứng

6.4.1 Giới thiệu phương pháp tối ưu

Trong giai đoạn khảo sát ban đầu, thông thường chỉ xác định giá trị tối ưu của các yếu tố đối với một đáp ứng cụ thể. Tuy nhiên, trong thực tế, thường cần tìm một tập hợp giá trị yếu tố có thể cân bằng giữa nhiều đáp ứng khác nhau. Điều này dẫn đến tình huống mà giá trị tốt nhất của các yếu tố cho đáp ứng Y_1 có thể không phải là giá trị tốt nhất cho đáp ứng Y_2 . Để giải quyết vấn đề này, một số phương pháp đã được đề xuất. Một trong số đó là phương pháp sử dụng hàm mục tiêu (Desirability Function Approach - DFA) do Derringer và Suich đề xuất.

Phương pháp tối ưu hóa DFA là một phương pháp hiệu quả và phổ biến trong kỹ thuật tối ưu hóa đa mục tiêu. Hàm mục tiêu được định nghĩa như sau:

Trước tiên, ta cần chuyển đổi mỗi đáp ứng Y_i thành một hàm mục tiêu d_i , là một hàm số có giá trị trong khoảng từ 0 tới 1 (từ ít mong muốn nhất đến mong muốn nhất, tương ứng).

- $d_i = 0$ nếu đáp ứng nằm ngoài vùng có thể chấp nhận được.
- $d_i = 1$ nếu đáp ứng đạt mục tiêu.

- khi d_i tăng, mức độ đáp ứng yêu cầu tăng dần, sự chênh lệch giữa đáp ứng Y và mục tiêu giảm dần.

Sau đó, các biến thiết kế được chọn để tối đa hóa mức độ mong muốn tổng thể

$$D = \left(\prod_{i=1}^n d_i \right)^{1/n} \quad (6.7)$$

Nếu mục tiêu là tối đa hóa đáp ứng đầu ra Y_i , thì hàm mục tiêu d_i như sau:

$$d_i = \begin{cases} 0 & \text{khi } Y_i < \text{Low}_i \\ \left(\frac{Y_i - \text{Low}_i}{\text{High}_i - \text{Low}_i} \right)^r & \text{khi } \text{Low}_i \leq Y_i \leq \text{High}_i \\ 1 & \text{khi } Y_i > \text{High}_i \end{cases} \quad (6.8)$$

Nếu mục tiêu là tối thiểu hóa đáp ứng đầu ra Y_i , thì hàm mục tiêu d_i như sau:

$$d_i = \begin{cases} 1 & \text{khi } Y_i < \text{Low}_i \\ \left(\frac{\text{High}_i - Y_i}{\text{High}_i - \text{Low}_i} \right)^r & \text{khi } \text{Low}_i \leq Y_i \leq \text{High}_i \\ 0 & \text{khi } Y_i > \text{High}_i \end{cases} \quad (6.9)$$

Nếu mục tiêu là mong muốn cụ thể (T_i) nào đó, thì hàm mục tiêu d_i như sau:

$$d_i = \begin{cases} 0 & \text{khi } Y_i < \text{Low}_i \\ \left(\frac{Y_i - \text{Low}_i}{T_i - \text{Low}_i} \right)^r & \text{khi } \text{Low}_i \leq Y_i < T_i \\ \left(\frac{\text{High}_i - Y_i}{\text{High}_i - T_i} \right)^r & \text{khi } T_i \leq Y_i \leq \text{High}_i \\ 0 & \text{khi } Y_i > \text{High}_i \end{cases} \quad (6.10)$$

Trong đó n là số đáp ứng đầu ra và r là trọng số, giá trị mặc định $r = 1$.

6.4.2 Phát biểu bài toán tối ưu

Do độ nhám bề mặt và độ mòn dao là hai đặc tính quan trọng nhất trong quá trình tiện cứng, trong khi lực cắt nhỏ không mang nhiều ý nghĩa về tối ưu năng lượng, nên trong nghiên cứu này, việc tối ưu chỉ tập trung vào các thông số hình học góc dao đối với độ nhám bề mặt và độ mòn dao.

a. Bài toán 1

Một trong những mục tiêu chính của nghiên cứu là tối ưu các thông số góc dao nhằm đạt được độ nhám bề mặt thấp nhất có thể, một yếu tố quan trọng trong quá trình tiện cứng. Do đó, phương trình (6.9) được áp dụng.

Trong đó, đáp ứng đầu ra Y_i là độ nhám bề mặt (Ra), với $n = 1$ (số đáp ứng đầu ra).

Mô hình toán đáp ứng đầu ra Y_i là độ nhám bề mặt theo công thức (6.1) như sau:

$$Ra = 3.581 - 0.0654 \kappa_r + 0.1495 \gamma_o - 0.0806 \lambda_s + 0.000117 \kappa_r^2 + 0.00024 \gamma_o^2 - 0.02373 \lambda_s^2 - 0.002731 \kappa_r \gamma_o - 0.003808 \kappa_r \lambda_s - 0.00382 \gamma_o \lambda_s$$

Ràng buộc bài toán:

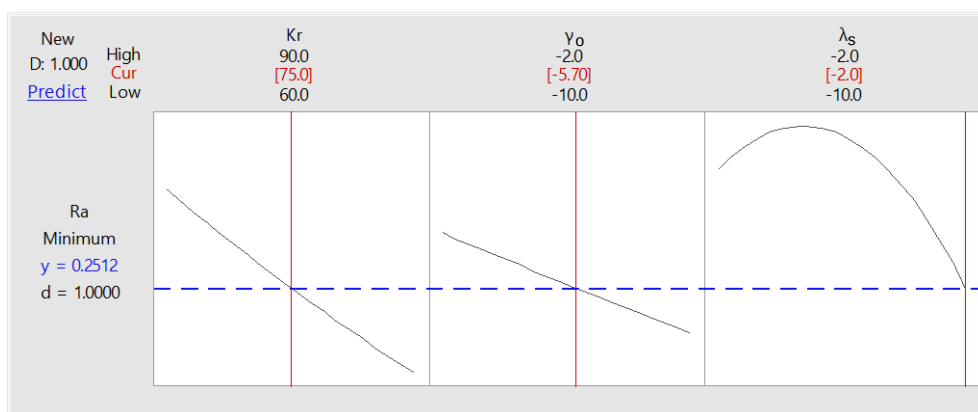
$$0.25 \mu\text{m} < Ra < 1.6 \mu\text{m}$$

$$60^\circ \leq \kappa_r \leq 90^\circ$$

$$-2^\circ \leq \gamma_o \leq -10^\circ$$

$$-2^\circ \leq \lambda_s \leq -10^\circ$$

Áp dụng phương trình (6.9), ta có kết quả tối ưu như Hình 6.10 và Bảng 6.7. Bảng 6.7 chỉ ra các kết quả tối ưu cho độ nhám bề mặt. Thông số góc dao tối ưu là $\kappa_r = 75^\circ$, $\gamma_o = -5.7^\circ$ và $\lambda_s = -2^\circ$. Độ nhám bề mặt nhỏ nhất đạt được là $Ra = 0.252 \mu\text{m}$.



Hình 6.10 Tối ưu hóa độ nhám bề mặt (Ra)

Bảng 6.7 Kết quả tối ưu cho độ nhám bề mặt

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Ra	Minimum		0.252	1.02	1	1
			Ra	Composite		
Solution			K _r	γ _o	λ _s	Fit
						Desirability
1			75	-5.7	-2	0.252000
						1.00000

b. Bài toán 2

Một mục tiêu quan trọng khác của nghiên cứu là tối ưu hóa các thông số góc dao nhằm đạt được đồng thời độ nhám bề mặt và độ mòn dao mong muốn trong tiện cứng. Do đó, phương trình (6.10) được sử dụng.

Trong đó, đáp ứng đầu ra Y_i là độ nhám bề mặt (Ra) và độ mòn dao (VB), với $n=2$. Mô hình toán đáp ứng đầu ra Y_i là độ nhám bề mặt và độ mòn dao theo công thức (6.1) và (6.2) như sau:

$$Ra = 3.581 - 0.0654 \kappa_r + 0.1495 \gamma_o - 0.0806 \lambda_s + 0.000117 \kappa_r^2 + 0.00024 \gamma_o^2 - 0.02373 \lambda_s^2 - 0.002731 \kappa_r \gamma_o - 0.003808 \kappa_r \lambda_s - 0.00382 \gamma_o \lambda_s$$

$$VB = 126.8 - 0.92 \kappa_r + 9.96 \gamma_o + 8.05 \lambda_s + 0.00401 \kappa_r^2 + 0.142 \gamma_o^2 + 0.225 \lambda_s^2 - 0.0686 \kappa_r \gamma_o - 0.0166 \kappa_r \lambda_s + 0.240 \gamma_o \lambda_s$$

Ràng buộc bài toán:

$$0.25 \mu\text{m} < Ra < 1.6 \mu\text{m},$$

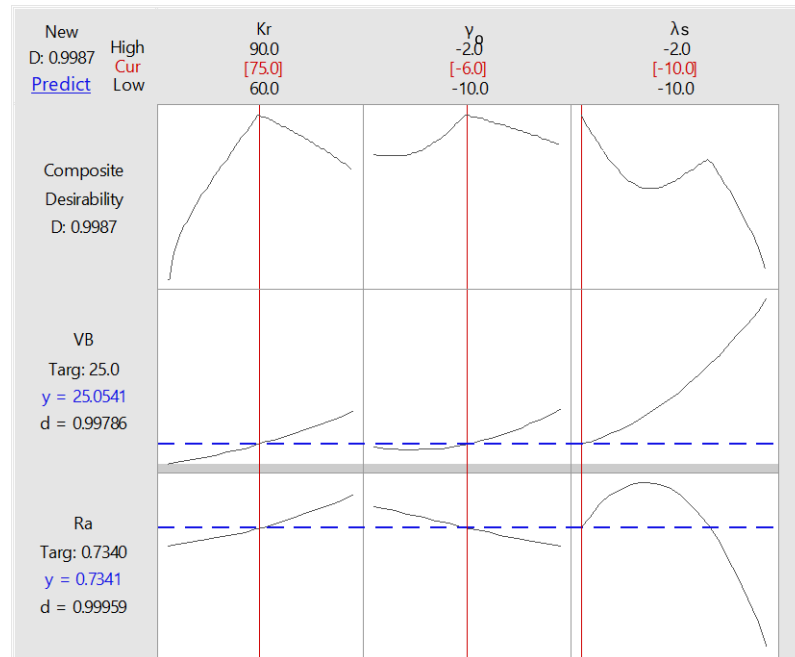
$$0 \mu\text{m} < VB < 0.3 \mu\text{m}$$

$$60^\circ \leq \kappa_r \leq 90^\circ$$

$$-2^\circ \leq \gamma_o \leq -10^\circ$$

$$-2^\circ \leq \lambda_s \leq -10^\circ$$

Áp dụng phương trình (6.10), ta có kết quả tối ưu như Hình 6.11 và Bảng 6.8. Bảng 6.8 trình bày kết quả tối ưu cho độ nhám bề mặt và độ mòn dao. Thông số góc tối ưu: $\kappa_r = 75^\circ$, $\gamma_o = -6^\circ$ và $\lambda_s = -10^\circ$. Các giá trị độ nhám bề mặt và độ mòn dao tối ưu đạt được là $Ra = 0.767\mu\text{m}$ và $VB = 22.2\mu\text{m}$.



Hình 6.11 Tối ưu hóa đồng thời độ nhám bề mặt và độ mòn dao

Bảng 6.8 Kết quả tối ưu cho độ nhám bề mặt và độ mòn dao

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Ra	Target	0.252	0.734	1.020	1	1
VB	Target	22.200	25.000	50.260	1	1

	Ra			VB		Composite
Solution	K _r	γ _o	λ _s	Fit	Fit	Desirability
1	75	-6	-10	0.734000	25.0000	1.00000

c. Bài toán 3

Một mục tiêu khác của nghiên cứu là tối ưu các thông số góc dao để đạt đồng thời độ nhám bề mặt và độ mòn dao ở mức nhỏ nhất. Vì vậy, phương trình (6.9) được áp dụng.

Trong đó, đáp ứng đầu ra Y_i là độ nhám bề mặt (Ra) và độ mòn dao (VB) theo công thức (6.1) và (6.2), với $n = 2$.

Ràng buộc bài toán:

$$0.25 \mu\text{m} < Ra < 1.6 \mu\text{m}$$

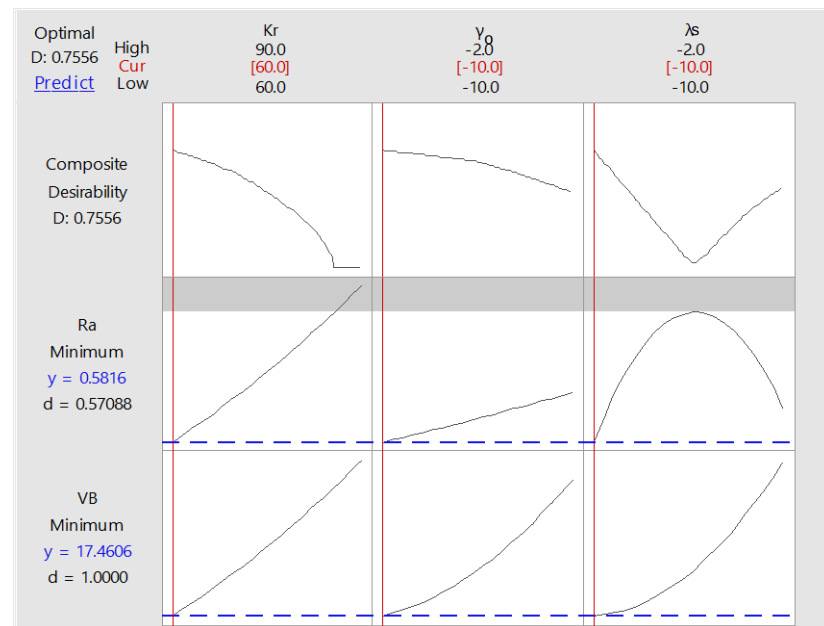
$$0 \mu\text{m} < VB < 0.3 \mu\text{m}$$

$$60^\circ \leq \kappa_r \leq 90^\circ$$

$$-2^\circ \leq \gamma_o \leq -10^\circ$$

$$-2^\circ \leq \lambda_s \leq -10^\circ$$

Áp dụng phương trình (6.9), ta có kết quả tối ưu như Hình 6.12 và Bảng 6.9. Bảng 6.9 chỉ ra các kết quả tối ưu cho độ mòn dao và độ nhám bề mặt. Thông số góc dao tối ưu: $\kappa_r = 60^\circ$, $\gamma_s = -10^\circ$ và $\lambda_o = -10^\circ$. Giá trị độ nhám bề mặt và độ mòn dao tối ưu là $Ra = 0.582 \mu\text{m}$ và $VB = 17.5 \mu\text{m}$.



Hình 6.12 Tối ưu hóa đồng thời độ nhám bề mặt và độ mòn dao

Bảng 6.9 Kết quả tối ưu cho độ nhám bề mặt và độ mòn dao

Response	Goal	Lower	Target	Upper	Weight	Importance
Ra	Minimum		0.252	1.02	1	1
VB	Minimum		22.200	50.26	1	1

	Ra			VB		Composite
Solution	κ_r	γ_o	λ_s	Fit	Fit	Desirability
1	60	-10	-10	0.581563	17.4606	0.755567

6.4.3 So sánh góc dao tối ưu và góc dao tiêu chuẩn

Từ Bảng 6.10, kết quả thực nghiệm cho thấy với các góc dao tối ưu, độ nhám bề mặt và độ mòn dao giảm lần lượt 8.3% và 41.3% so với thông số góc dao tiêu chuẩn.

Bảng 6.10 So sánh kết quả thực nghiệm giữa góc dao tiêu chuẩn và góc dao tối ưu

		Thông số góc dao tiêu chuẩn	Thông số góc dao tối ưu	So sánh kết quả tối ưu
Đầu vào	K_r	91°	75°	
	γ_o	-6°	-6°	
	λ_s	-6°	-10°	
Đầu ra	R_a	$0.836\mu\text{m}$	$0.767\mu\text{m}$	↓ 8.3%
	VB	$37.8\mu\text{m}$	$22.2\mu\text{m}$	↓ 41.3%

6.5 Kết luận

Nghiên cứu đã phân tích được ảnh hưởng đồng thời của các thông số góc dao (góc nghiêng dao, góc trước và góc nâng dao) đến độ nhám bề mặt, độ mòn dao và lực cắt thông qua việc xem xét mô hình toán hình học quá trình tiện cứng kết hợp với kết quả thực nghiệm. Kết quả cho thấy vai trò của các thông số góc dao trong tiện cứng khác so với tiện truyền thống. Cụ thể, trong tiện cứng, góc nâng dao là thông số quan trọng nhất, trong khi trong tiện truyền thống, góc trước có ảnh hưởng nhiều nhất.

Ba bài toán tối ưu hóa trong sản xuất thực tế thông qua quy trình tiện cứng đã được giải quyết thành công. Với thông số góc dao tối ưu ($K_r = 75^\circ$, $\gamma_o = -6^\circ$, và $\lambda_s = -10^\circ$), kết quả thực nghiệm cho thấy quá trình tiện cứng được cải thiện đáng kể, với độ nhám bề mặt và độ mòn dao lần lượt giảm 8.3% và 41.3% so với thông số góc dao tiêu chuẩn của nhà sản xuất ($K_r = 91^\circ$, $\gamma_o = -6^\circ$ và $\lambda_s = -6^\circ$).

Chương 7:

KẾT LUẬN & KIẾN NGHỊ

7.1 Kết luận

Nghiên cứu đã phân tích được ảnh hưởng đồng thời của các thông số hình học góc dao, bao gồm góc nghiêng dao κ_r , góc trước γ_o và đặc biệt là góc nâng dao λ_s đến các đặc tính quan trọng nhất của quá trình tiện cứng như độ nhám bề mặt, độ mòn dao và lực cắt. Dựa trên phân tích kết quả thí nghiệm và mô hình toán, có thể rút ra các kết luận chính sau:

- Trong tiện cứng, do bước tiến và chiều sâu cắt nhỏ, quá trình cắt chỉ diễn ra tại bán kính mũi dao. Góc nâng dao là yếu tố chính ảnh hưởng đến góc trước cục bộ trung bình với 65.84%, tiếp theo là góc trước, đóng góp 31.43%, và góc nghiêng dao chỉ chiếm 0.98%. Do đó, để tối ưu hóa quá trình tiện cứng, nên tập trung điều chỉnh góc nâng dao và góc trước. Góc nghiêng dao có thể bỏ qua do ảnh hưởng không đáng kể. Khi tăng góc trước và góc nâng dao âm, làm tăng góc trước cục bộ của các phần tử cạnh cắt bán kính mũi dao tham gia quá trình cắt.
- Vai trò của các thông số hình học góc dao là khác nhau giữa tiện cứng và tiện truyền thống. Trong tiện cứng, góc nâng dao là góc có ảnh hưởng nhiều nhất đến độ nhám bề mặt, độ mòn dao và lực cắt, tiếp theo là góc trước và góc nghiêng dao. Ngược lại, trong tiện truyền thống, góc trước là thông số có ảnh hưởng lớn nhất.
- Độ nhám bề mặt tăng khi góc trước và góc nâng dao tăng theo hướng âm. Tuy nhiên, nếu góc nâng dao tăng qua một giới hạn xác định, độ nhám bề mặt sẽ giảm. Đây là một phát hiện mới và có ý nghĩa quan trọng trong nghiên cứu tiện cứng. Từ kết quả này, nên áp dụng góc nâng dao âm lớn ($\lambda_s = -10^\circ$) để giảm đồng thời độ nhám bề mặt và độ mòn dao.
- Độ mòn dao giảm khi tăng góc trước và góc nâng dao theo hướng âm.
- Ảnh hưởng tương tác giữa các thông số góc dao là không đáng kể.

- Lực hướng kính (F_y) là thành phần lực lớn nhất, tiếp theo là lực tiếp tuyến (F_z) và lực dọc trục (F_x) là thành phần lực nhỏ nhất. Khác với tiện truyền thống, lực tiếp tuyến là thành phần lực lớn nhất.
- Các mô hình toán thực nghiệm về độ mòn dao, độ nhám bề mặt và lực cắt đã được xây dựng.
- Với thông số góc dao tối ưu ($K_r = 75^\circ$, $\gamma_o = -6^\circ$, và $\lambda_s = -10^\circ$), kết quả thực nghiệm cho thấy độ nhám bề mặt và độ mòn dao giảm lần lượt 8.3% và 41.3% so với thông số góc dao tiêu chuẩn của nhà sản xuất ($K_r = 91^\circ$, $\gamma_o = -6^\circ$ và $\lambda_s = -6^\circ$).

Phương pháp thiết kế hệ thống đồ gá được đề xuất mang lại một giải pháp hiệu quả để thay đổi thông số hình học góc dao cho các mảnh dao tiêu chuẩn, nhằm cải thiện quá trình tiện cứng.

Một mô hình toán hình học mới về quá trình tiện cứng đã được xây dựng, mô tả chính xác bản chất của quá trình này. Kết quả phân tích của mô hình toán hình học phù hợp với kết quả thực nghiệm. Mô hình được đề xuất có thể được kết hợp với các công thức và mô hình toán học khác để tính toán lực cắt, nhiệt cắt và độ mòn dao cục bộ cho mỗi phần tử cạnh cắt và toàn bộ quá trình. Ngoài ra, mô hình còn có thể áp dụng cho nghiên cứu tiện các vật liệu khó gia công khác.

7.2 Hướng phát triển

Trên cơ sở các kết quả nghiên cứu đã đạt được, các hướng nghiên cứu tiếp theo có thể mở rộng như sau:

- Tiện cứng với các loại vật liệu cứng khác như AISI 52100, AISI D2, AISI H13...
- Tiện cứng bằng các dụng cụ cắt khác, ví dụ như PCBN.
- Nghiên cứu ảnh hưởng tổng hợp của thông số hình học dao và chế độ cắt đến lực cắt, nhiệt cắt, độ mòn dao và độ nhám bề mặt.

DANH MỤC CÁC BÀI BÁO ĐÃ CÔNG BỐ

1. Le Hieu Giang, Mai Duc Dai and Pham Minh Duc. Investigation of Effects of Tool Geometry Parameters on Cutting Forces, Temperature and Tool Wear in Turning Using Finite Element Method and Taguchi's Technique. International Journal of Mechanical Engineering and Applications, 2016.
2. Pham Minh Duc, Le Hieu Giang, Mai Duc Dai and Do Tien Sy. An experimental study on the effect of tool geometry on tool wear and surface roughness in hard turning. Advances in Mechanical Engineering (SCIE), 2020.
3. Pham Minh Duc, Mai Duc Dai and Le Hieu Giang. Modeling and Optimizing the Effects of Insert Angles on Hard Turning Performance. Mathematical Problems in Engineering (SCIE), 2021.
4. Pham Minh Duc and Le Hieu Giang. Enhancing Hard Turning Performance: The Crucial Role of Cutting Parameters and Tool Geometry. International Journal of Engineering Trends and Technology (Scopus), 2025.
5. Pham Minh Duc, Le Hieu Giang and Van Thuc Nguyen. Analyzing Cutting Temperature in Hard Turning Technique with Standard Inserts through Both Simulation and Experimental Investigations. Applied Sciences (SCIE), 2025.
6. Van Thuc Nguyen, Nguyen Quang Hien, Pham Minh Duc, Tran Duy Nam, Van Huong Hoang and Van Thanh Tien Nguyen. Atomistic Insight into the Effects of Collision Angle on the Characteristics of Cu-Ta Joining by Explosive Welding. Metals (SCIE), 2025.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] J.P. Davim, *Machining of Hard Materials*, Verlag London Limited: Springer, 2011.
- [2] A.E. Diniz, A. Oliveira, "Hard Turning of Interrupted Surfaces using CBN Tool," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 195, p. 275–281, 2008.
- [3] W. Grezesik , "Influence of tool wear on surface roughness in HT using differently shaped ceramic tools," *Wear*, vol. 265, pp. 327-335, 2008.
- [4] A. Ebrahimi, M.M. Moshksar, "Evaluation of machinability in turning of micro-alloyed and quenched-tempered steels: tool wear, statistical analysis, chip morphology," *Journal of Material Processing Technology*, vol. 209, p. 910–921, 2009.
- [5] G. Bartarya, S. K. Choudhury, "State of the art in hard turning," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 53, pp. 1-14, 2012.
- [6] M.A. Yallese, K. Chaoui, N. Zeghib, L. Boulanouar, J. Rigal , "Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool," *Journal of Material Processing Technology*, vol. 209, p. 1092–1104, 2009.
- [7] H. Việt, "Ảnh hưởng của một số thông số chế độ cắt đến độ nhám bề mặt gia công trên máy tiện," *Tạp chí khoa học và công nghiệp lâm nghiệp*, 2016.
- [8] T.Q.D. Nguyễn, "Nghiên cứu quá trình tiện thép hợp kim qua tôi bằng dao PCBN," Đại học Thái Nguyên, 2012.
- [9] S. Khamel, N. Ouelaa, K. Bouacha, "Analysis and prediction of tool wear, surface roughness and cutting forces in hard turning with CBN tool," *J Mech Sci Technol*, vol. 26, pp. 3605-3616, 2012.

- [10] T.M.E. Hossainy, A.A.E. Zoghbyb, M.A. Badr, K.Y. Maalawi, M.F. Nasr, "Cutting Parameter Optimization when Machining Different Materials," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 1101-1114, 2010.
- [11] A. Davoudinejad, M.Y. Noordin, "Effect of cutting edge preparation on tool performance in hard-turning of DF-3 tool steel with ceramic tools," *J Mech Sci Technol*, vol. 28, pp. 4727-4736, 2014.
- [12] H. Aouici, M.A. Yallese, B. Fnides, "Modeling and optimization of hard turning of X38CrMoV5-1 steel with CBN tool: Machining parameters effects on flank wear and surface roughness," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 25, no. 11, p. 2843~2851, 2011.
- [13] J.T. Horng, N.M. Liu, K.T. Chiang, "Investigating the machinability evaluation of Hadfield steel in the hard turning with Al₂O₃/TiC mixed ceramic tool based on the response surface methodology," *journal of materials processing technology*, vol. 208, p. 532–541, 2008.
- [14] A. Khellaf, H. Aouici, S. Smaiah, "Comparative assessment of two ceramic cutting tools on surface roughness in hard turning of AISI H11 steel: including 2D and 3D surface topography," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 89, no. 1-4, pp. 333-354, 2016.
- [15] S.R. Dasa, A. Pandab, D. Dhupalb, "Hard turning of AISI 4340 steel using coated carbide insert: Surface roughness, tool wear, chip morphology and cost estimation," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, p. 6560–656, 2018.
- [16] S.R. Das, D. Dhupal, A. Kumar, "Study of surface roughness and flank wear in hard turning of AISI 4140 steel with coated ceramic inserts," *J Mech Sci Technol*, vol. 29, p. 4329–4340, 2015.
- [17] A. Laouissi, M.A. Yallese, A. Belbah, "Investigation, modeling, and optimization of cutting parameters in turning of gray cast iron using coated and

- uncoated silicon nitride ceramic tools. Based on ANN, RSM, and GA optimization," *Int J Adv Manuf Tech*, vol. 101, no. 1-4, pp. 523-548, 2018.
- [18] H. Bensouilah, H. Aouici, I. Meddour, "Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process," *Measurement*, vol. 82, pp. 1-18, 2016.
- [19] M.Y. Noordin, D. Kurniawan, Y.C. Tang, K. Muniswaran, "Feasibility of Mild Hard Turning of Stainless Steel using Coated Carbide Tool," *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, vol. 60, p. 853–863., 2012.
- [20] K. Boucha, M.A. Yallese, T.S. Khameh, S. Belhadi, "Analysis and optimization of hard turning operation using cubic boron nitride tool," *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, vol. 45, pp. 160-178, 2014.
- [21] H. Bensouilah, H. Aouici, I. Meddour, M.A. Yallese, T. Mabrouki, F. Girardin, "The Performance of coated and uncoated mixed ceramic tools in hard turning process," *Measurement*, vol. 82, p. 1–18, 2016.
- [22] A. Anand, A.K. Behera, S.R. Das, "An overview on economic machining of hardened steels by hard turning and its process variables," *Manufacturing Rev*, vol. 6, no. 4, 2019.
- [23] D. Singh, P.V. Rao, "Optimization of Tool Geometry and Cutting Parameters for Hard Turning," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 22, no. 1, pp. 15-21, 2007.
- [24] P. Cao, Z. Zhu, D. Buck, X. Guo, "Effect of rake angle on cutting performance during machining of stone-plastic composite material with polycrystalline diamond cutters," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 33, no. 1, pp. 351-356, 2019.

- [25] S. Neseli, S. Yaldız, E. Türkes, "Optimization of tool geometry parameters for turning operations based on the response surface methodology," *Measurement*, vol. 44, pp. 580-587, 2011.
- [26] V.S. Sharma, S. Dhiman, R. Sehgal, S.K. Sharma, "Estimation of cutting forces and SR for hard turning using neural networks," *J IntellManuf*, vol. 19, pp. 473-483, 2008.
- [27] O. Zerti, M. A. Yallese, R. Khettabi, K. Chaoui, T. Mabrouki, "Design optimization for minimum technological parameters when dry turning of AISI D3 steel using Taguchi method," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 89, no. 5-8, pp. 1915-1934, 2017.
- [28] V.D. Patel, A.H. Gandhi, "Analysis and modeling of surface roughness based on cutting parameters and tool nose radius in turning of AISI D2 steel using CBN tool," *Measurement*, vol. 138, pp. 34-38, 2019.
- [29] Y.K. Chou, H. Song, "Tool nose radius effects on finish hard turning," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 148, p. 259–268., 2004.
- [30] F. Kühn, C. Löpenhaus, J. Brimmers, F. Klocke, T. Bergs, "Analysis of the influence of the effective angles on the tool wear in gear hobbing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 108, pp. 2621-2632, 2020.
- [31] V. Sivaraman, S. Prakash , "Recent developments in turning hardened steels – A review," *Materials Science and Engineering* , vol. 197, 2017.
- [32] A.E. Diniz, A.D. Oliveira, "Hard Turning of Interrupted Surfaces using CBN Tool," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 195, p. 275–281, 2008.

- [33] T. Zhao, J.M. Zhou, V. Bushlya, "Effect of cutting edge radius on surface roughness and tool wear in hard turning of AISI 52100 steel," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 91, no. 9-12, p. 3611–3618, 2017.
- [34] J.D. Thiele, S.N. Melkote, "Effect of cutting edge geometry and workpiece hardness on surface generation in the finish hard turning of AISI 52100 steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 94, p. 216–226., 1999.
- [35] S.K. Harishaa, G.R. Rajkumara, V. Pawarb, M. Keshav, "Statistical Investigation of Tool Geometry for Minimization of Cutting Force in Turning of Hardened Steel," *Materials Today*, vol. 5, p. 11277–11282, 2018.
- [36] H. Saglam, F. Unsacar, S. Yaldiz, "Investigation of the effect of rake angle and approaching angle on main cutting force and tool tip temperature," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 46, no. 2, p. 132–141, 2006.
- [37] M. Gunay, I. Korkut, E. Aslan, U. Seker, "Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 166, pp. 44-49, 2005.
- [38] H. Xu, H. Zhou, Z. Ma, "The influence of tool rake surface geometry on the hard turning process of AISI52100 hardened steel," *Materials*, vol. 12, no. 9, p. 3096, 2019.
- [39] T. Mikołajczyka, H. Latosa , D.Y. Pimenovb, "Influence of the main cutting edge angle value on minimum uncut chip thickness during turning of C45 steel," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 57, pp. 254-362, 2020.
- [40] S. Saravanamurugan, B.S. Sundar, R.S. Pranav, "Optimization of cutting tool geometry and machining parameters in turning process," *Materials Today*, vol. 38, no. 5, pp. 3351-3357, 2021.

- [41] M. Xiao, K. Sato, S. Karube, T. Soutome, "The effect of tool nose radius in ultrasonic vibration cutting of hard metal," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, pp. 1375-1382., 2003.
- [42] J. Rech , A. Moisan , "Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels," *Int J Mach Tools Manuf*, vol. 43, no. 5, p. 543–550, 2003.
- [43] A.M. Abrão, D.K. Aspinwall, M.H.L. Wise, "Tool life and workpiece surface integrity evaluations when machining hardened AISI H13 and AISI E52100 steels with conventional ceramic and PCBN tool materials," *Society of Manufacturing Engineers*, pp. 1-7, 1995.
- [44] G.C. Benga, A.M. Abrão, "Turning of hardened 100Cr6 bearing steel with ceramic and PCBN cutting tools," *J Mater Process Technol*, vol. 143, pp. 237-241, 2003.
- [45] T. Özel, Y. Karpaz, L. Figueira, J.M. Davim , "Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts," *Journal of materials processing technology*, vol. 189, pp. 192-198., 2007.
- [46] Y. Altintas, Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations And Cnc Design, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2012.
- [47] H. Opitz, W. König, "On the wear of cutting tools," *Proceedings of the 8th International MTDR Conference*, pp.173–190., pp. 173-190, 1967.
- [48] S.Y. Luo, Y.S. Liao, Y.Y . Tsai, "Wear characteristics in turning highhardness alloy steel by ceramic and CBN tools," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 88, pp. 114-121, 1999.
- [49] M. Liu, J. Takagi, A. Tsukuda , "Effect of tool nose radius and tool wear on residual stressdistribution in hard turning of bearing steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 150, pp. 234-241., 2004.

- [50] J. Arsecularatne, L. Zhang, C. Montross, P. Mathew, "On machining of hardened AISI D2 steel with PCBN tools," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 171, pp. 244-252., 2006.
- [51] T. Özel, Y. Karpat, L. Figueira, J.P. Davim, "Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts," *Journal of materials processing technology*, vol. 189, pp. 192-198., 2007.
- [52] A. Panda, A.K. Sahoo, A.K. Rout, R. Kumar, R. Das, "Investigation of Flank Wear in Hard Turning of AISI 52100 Grade Steel Using Multilayer Coated Carbide and Mixed Ceramic Inserts," *Procedia Manufacturing*, vol. 20, p. 365–371., 2018.
- [53] R. Kumar, A. K. Sahoo, R.K. Das, A. Panda, P.C. Mishra, "Modelling of Flank wear, Surface roughness and Cutting Temperature in Sustainable Hard Turning of AISI D2 Steel," *Procedia Manufacturing*, vol. 20, p. 406–413, 2018.
- [54] A.K. Parida, K. Maity, "Modeling of machining parameters affecting flank wear and surface roughness in hot turning of Monel-400 using response surface methodology," *Measurement*, vol. 137, pp. 375-381, 2019.
- [55] S.A. Bagaber, A.R. Yusoff, "Multi-objective optimization of cutting parameters to minimize power consumption in dry turning of stainless steel 316," *J Clean Prod*, vol. 157, pp. 30-46, 2019.
- [56] R.A. Laghari, J. Li, M. Mia, "Effects of Turning Parameters and Parametric Optimization of the Cutting Forces in Machining SiCp/Al 45 wt% Composite," *Metals*, vol. 10, 2020.
- [57] A. Chabbi, M.A. Yallese, M. Nouioua, "Modeling and optimization of turning process parameters during the cutting of polymer (POM C) based on RSM, ANN, and DF methods," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 91, p. 2267–2290, 2017.

- [58] Z. Xiao, X. Liao, Z. Long, "Effect of cutting parameters on surface roughness using orthogonal array in hard turning of AISI 1045 steel with YT5 tool," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 93, no. 1-4, pp. 273-283, 2016.
- [59] A.J. Santhosh, A.D. Tura, I.T. Jinegra , "Optimization of CNC turning parameters using face centred CCD approach," *Results in Engineering* , vol. 11, 2021.
- [60] A. Aslan, "Optimization and analysis of process parameters for flank wear, cutting forces and vibration in turning of AISI 5140: A comprehensive study," *Measurement*, vol. 163, 2020.
- [61] M.W. Azizi, O. Keblouti, L. Boulanouar, M.A. Yallese, "Design Optimization in Hard Turning of E19 Alloy Steel by Analysing Surface Roughness, Tool Vibration and Productivity," *Struct. Eng. Mech.*, vol. 73, pp. 501-513, 2020.
- [62] A. Zerti, M.A. Yallese, I. Meddour, "Modeling and multi-objective optimization for minimizing surface roughness, cutting force, and power, and maximizing productivity for tempered stainless steel AISI 420 in turning operations," *Int J Adv Manuf Tech*, vol. 102, no. 1-4, pp. 135-157, 2019.
- [63] S. Arfaoui, F. Zemzemi, M. Dakhli, Z. Tourki, "Optimization of hard turning process parameters using the response," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019.
- [64] R. Suresh, S. Basavarajappa, G.L. Samuel, "Predictive modeling of cutting forces and tool wear in hard turning using response methodology," *Procedia Engineering*, vol. 38, pp. 73-81, 2012.
- [65] D. Singh, P. Rao, "A surface roughness prediction model for hard turning process.," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 32, pp. 1115-1124, 2007.

- [66] I. Meddour, M.A. Yallese, A. Khellaf, M. Elbah, "Prediction of surface roughness and cutting forces using RSM, ANN, and NSGA-II in finish turning of AISI 4140 hardened steel with mixed ceramic tool," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 97, p. 1931–1949, 2018.
- [67] A. A. Elsadek, A. M. Gaafer, S. S. Mohamed, "Prediction and optimization of cutting temperature on hard-turning of AISI H13 hot work steel," *SN Applied Sciences*, vol. 2, 2020.
- [68] L. Tang, Y. Sun, B. Li, J. Shen, G. Meng, "Wear performance and mechanisms of PCBN tool in dry hard turning of AISI D2 hardened steel," *Tribology International*, vol. 132, pp. 228-236, 2019.
- [69] D. Huddle , "New Hard Turning Tools and Techniques Offer a cost-effective Alternative to Grinding," *Tooling and Production Magazine.*, 2001.
- [70] Y. Huang, Y.K. Chou, S.Y. Liang, "CBN tool wear in hard turning: a survey on research progresses," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 35, pp. 443-453., 2007.
- [71] S.K. Choudhury, S. Chinchanihar, *Comprehensive Materials Finishing*, Elsevier, 2017.
- [72] M.C. Shaw, *Metal Cutting Principles*, New York (USA): Oxford University Press, 2005.
- [73] J.G. Lima, R.F. Avila, A.M. Abrao, "Turning of hardened AISI 4340 steel using coated carbide inserts," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 221, p. 1359–1366, 2007.
- [74] M. Kuruc, "Rotary Ultrasonic Machining. Application for Cutting Edge Preparation," *Springer: Berlin/Heidelberg, Germany*, 2021.

- [75] Y. Huang, Y K. Chou, S.Y. Liang, "CBN tool wear in hard turning: A survey on research progresses," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 35, pp. 443-456, 2007.
- [76] Y. S. Chou, Wear mechanisms of cubic boron nitride tools in precision turning of hardened steels., Purdue University., 1994.
- [77] C. Lahiff, S. Gordon, P. Phelan, "PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 23, pp. 638-644, 2007.
- [78] Y. Zhou, W. Fang, L. Shao, Y. Dai, J. Wang, X. Wang, J. Yuan, W. Guo, "Edge preparation methods for cutting tools: a review," *Frontiers of Mechanical Engineering* , vol. 18, 2023.
- [79] Nguyễn Quang Châu, Kỹ thuật tiện, NXB Thanh niên, 1999.
- [80] M.C. Shaw, A. Vyas , "The mechanism of chip formation with hard turning steel," *Ann CIRP*, vol. 47, no. 1, pp. 77-82, 1998.
- [81] M.A. Davies, Y. Chou, C.J. Evans, "On chip morphology, tool wear and cutting mechanics in finish hard turning," *Ann CIRP*, vol. 45, no. 1, p. 7782, 1996.
- [82] K. Nakayama, M. Arai, T. Kanda, "Machining characteristic of hard materials," *Manufacturing Technology*, vol. 37, pp. 89-92, 1988.
- [83] G. Poulachon, A. Moisan, I.S. Jawahir, "Tool-wear mechanisms in hard turning with polycrystalline cubic boron nitride tools.," *Wear*, vol. 250, pp. 576-586, 2001.
- [84] J.P. Davim, Machining, Verlag London: Springer, 2008.

- [85] H. k.Tönshoff, C. Arendt, A. R Ben, "Cutting of hardened steel.," *Ann CIRP*, vol. 49, no. 2, pp. 547-566, 2000.
- [86] G. Chryssolouris, "Turning of hardened steels using CBN tools," *Journal of Applied Metalworking*, vol. 2, pp. 100-106, 1982.
- [87] Z. Fu, X. Chen, J. Mao, and T. Xiong,, " An analytical force mode applied to three-dimensional turning based on a predictive machining theory," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 136, pp. 94-105, 2018.
- [88] H. Khlifi, L. Abdellaoui, W.B. Sai, "An equivalent geometry model for turning tool with nose and edge radii," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 103, pp. 4233-4251, 2019.
- [89] G. Zhang and C. Guo, "Modeling of Cutting Force Distribution on Tool Edge," *Procedia Manufacturing*, vol. 1, p. 454–465, 2015.
- [90] N.A. Abukhshim, P.T. Mativenga, M.A. Sheikh, "Heat generation and temperature prediction in metal cutting:A review and implications for high speed machining," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 46, p. 782–800, 2006.
- [91] G. Hao, Z. Liu , "The heat partition into cutting tool at tool-chip contact interface during cutting process: a review," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 108, p. 393–411, 2020.
- [92] G. Hao, A. Tang, Z. Zhang, H. Xing, N. Xu, R. Duan, "Finite Element Simulation of Orthogonal Cutting of H13-Hardened Steel to Evaluate the Influence of Coatings on Cutting Temperature," *Coatings*, vol. 14, 2024.
- [93] N. L. Bhirud, R. R. Gawande, "Measurement and prediction of cutting temperatures during dry milling: review and discussions," *J Brazilian Soc Mech Sci Eng*, vol. 39, p. 5135–5158, 2017.

- [94] H.K. Tönshoff, C. Arendt , A. R. Ben, "Cutting of hardened steel," *Ann CIRP*, vol. 49, no. 2, pp. 547-566, 2000.
- [95] J.Y. Wang, C.R Liu , " The effect of tool flank wear on the heat transfer, thermal damage and cutting mechanics in finish hard turning," *Ann CIRP*, vol. 48, no. 1, pp. 53-58, 1999.
- [96] J. A. Arsecularatne, L.C. Zhang, C. Montross, "Wear and tool life of tungsten carbide, PCBN and PCD cutting tools," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 46, pp. 482-491, 2006.
- [97] D.A. Stephenson, J.S. Agapiou, "Metal cutting operations in Metal Cutting Theory and Practice Theory and Practice," *Edition, Boca Raton, FL: Taylor and Francis Group*, pp. 17-70, 2006.
- [98] Y. C. C.J. Evans, "Tool wear mechanism in continuous cutting of hardened tool steels," *Wear*, vol. 212, p. 59–65, 1997.
- [99] Y. Huang, S. Y. Liang, "Modeling of CBN Tool Flank Wear Progression in Finish Hard Turning," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 126, pp. 98-106, 2004.
- [100] D. Singh, P.V. Rao, "Flank wear prediction of ceramic tools in hard turning," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 50, p. 479–493, 2010.
- [101] Y. Huang, T. G. Dawson, "Tool crater wear depth modeling in CBN hard turning," *Wear*, vol. 258, pp. 1455-1461, 2005.
- [102] ISO 3685, "Tool life testing with single-point turning tools," *ISO Standard*, 1993.
- [103] V.P. Astakhov, *Geometry of Single-point Turning Tools and Drills*, Springer, 2010.

- [104] L. Abdellaoui, W. Bouzid,, "Thermomechanical modeling of oblique turning in relation to tool-nose radius," *Machining Science And Technology*, vol. 20, no. 4, pp. 586-614, 2016.
- [105] A. Molinari, A. Moufki, "A new thermomechanical model of cutting applied to turning operations, Part I. Theory," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 45, pp. 166-180, 2005.
- [106] Sandvik, "Product Information," [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/pages/default.aspx>. [Accessed 2019].
- [107] AZoM, "AISI 1045 Medium Carbon Steel," AZoNetwork, 5 7 2012. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6130>.
- [108] D. C. Montgomery , Design and analysis of experiments, Wiley, 2017.
- [109] A.K. Das, S. Dewanjee, Computational Phytochemistr, Elsevier, 2018.
- [110] "Xdulieu," [Online]. Available: <https://www.xdulieu.com/thiet-ke-thi-nghiem/tn5-be-mat-dap-ung/index.html>.
- [111] Kistler, "Multicomponent Dynamometer," Kistler Group, [Online]. Available: www.kistler.com. [Accessed 2019].
- [112] "Mitutoyo Manual Data," Mitutoyo, 2019. [Online].
- [113] Euromex, "Oxion Inverso materials science," [Online]. Available: <https://www.euromex.com/en/products/applications/mechanics/mechanics-university-labs-applications/oxion-inverso-materials-science/>. [Accessed 2019].

- [114] R. Pavel, I. Marinescu, M. Deis, J. Pillar, "Effect of tool wear on surface finish for a case of continuous and interrupted hard turning," *J. of Materials Processing Technology*, vol. 170, pp. 341-349., 2005).
- [115] V. Dessoly, S. N. Melkote, C. Lesculier , "Modeling and verification of cutting tool temperature in rotary tool turning of hardened steels," *International Journal of Machine Tools and Manufacture* , vol. 44, p. 1463–1470, 2004.
- [116] A. E. Diniz, A. J. Oliveira , "Hard turning of interrupted surfaces using CBN tool," *Journal of Materials Processing Technology* , vol. 195, p. 275–281, 2008.
- [117] W. Grezesik, , "Influence of tool wear on surface roughness in HT using differently shaped ceramic tools," *Wear* , vol. 265, p. 327–335, 2008.
- [118] N. Senthilkumar, T. Tamizharasan, V. Anandakrishnan, "Experimental investigation and performance analysis of cemented carbide inserts of different geometries using Taguchi based grey relational analysis," *Measurement*, vol. 58, pp. 520-536, 2014.
- [119] M. W. Azizi, S. Belhadi, M. A. Yallese, "Surface roughness and cutting forces modeling for optimization of machining condition in finish hard turning of AISI 52100 steel," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, no. 12, pp. 4105-4114, 2012.
- [120] K. Bouacha, M. A. Yallese, S. Khamel, S. Belhadi, "Analysis and optimization of hard turning operation using cubic boron nitride tool," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 45, pp. 160-178, 2014.
- [121] Le Hieu Giang, Mai Duc Dai, Pham Minh Duc, "Investigation of Effects of Tool Geometry Parameters on Cutting Forces, Temperature and Tool Wear in Turning Using Finite Element Method and Taguchi's Technique," *nt J Mech Eng Appl*, vol. 4, pp. 109-114, 2016.

PHỤ LỤC

Bảng 1 Thông số máy CNC BOEHRINGER DUS-400ti

Chiều dài	3420 mm
Chiều rộng	1925 mm
Chiều cao	1600 mm
Trọng lượng	3000 kg
Tốc độ quay tối đa	3000 vòng/phút
Hành trình trục x	1000 mm
Hành trình trục y	420 mm
Trọng lượng phôi	500 kg
Điện năng tiêu thụ	57.5 kW
Nguồn điện	400 V
Bộ điều khiển	SINUMERIK 840D
Độ chính xác	1/1000

Bảng 2 Đặc tính thiết bị đo độ nhám bề mặt MITUTOYO SJ-210 178-390 [112]

Thuộc tính	Thông số
Lực đầu dò - Detector measuring force:	0.75 mN
Góc đầu kim - Stylus tip angle:	60°
Bán kính đầu kim - Stylus tip radius:	2 µm
Khối lượng - Mass:	500 g
Traverse:	17.5 mm, 5.6 mm [S-type]
Phạm vi đo - Measuring range:	16 mm, 4.8 mm [S-type]
Chiều dài cáp - Cable length:	1 m
Phạm vi - Range:	360 µm
Kim - Stylus:	Diamond Tip
Bán kính trượt - Skid radius:	40 mm

Lực đo - Measuring force:	0.75 mN
Nguồn - Power supply:	Qua AC adapter (DC 7.5 V 1.5 W)
Bán kính - Radius:	2 μm
Hệ đơn vị - Inch-Metric:	Metric

Bảng 3 Thông số của cảm biến đo lực Multicomponent Dynamometer Kistler Type 9257B [111]

Thuộc tính		Đơn vị	Thông số
Phạm vi - Range	Fx, Fy, Fz	kN	-5 ... 5
Fz for Fx and Fy ≤ 0.5 Fz	Fz	kN	-5 ... 10
Quá tải - Overload	Fx, Fy, Fz	kN	-7.5/7.5
Fz for Fx and Fy ≤ 0.5 Fz	Fz	kN	-7.5/15
Ngưỡng - Threshold		N	<0.01
Độ nhạy - Sensitivity	Fx, Fy	pC/N	≈ -7.5
	Fz	pC/N	≈ -3.7
Độ tuyến tính - Linearity, all ranges		%FSO	$\leq \pm 1$
Độ cứng - Rigidity	cx, cy	kN/ μm	>1
	cz	kN/ μm	>2
Tần số tự nhiên - Natural frequency	fn (x, y, z)	kHz	≈ 3.5
Tần số tự nhiên (có gắn đồ gá) - Natural frequency (mounted on flanges)	fn (x, y)	kHz	≈ 2.3
	fn(z)	kHz	≈ 3.5
Nhiệt độ hoạt động - Operating temperature range		$^{\circ}\text{C}$	0 ... 70
Điện dung - Capacitance	Fx, Fy, Fz	pF	≈ 220
Trở cách ly - Insulation resistance (20 $^{\circ}\text{C}$)		Ω	>1013
Trở cách ly đất - Ground insulation		Ω	>108
Chuẩn bảo vệ - Protection class EN60529		-	IP67
Khối lượng - Weight		kg	7.3
Diện tích kẹp - Clamping area		mm	100x170