BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
**HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ**

ĐÀO VĂN DƯỠNG

# NGHIÊN CỨU TỐI ƯU HÓA CHẾ ĐỘ CẮT KHI PHAY CAO TỐC THÉP HỢP KIM SAU NHIỆT LUYỆN TRÊN MÁY CNC

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT CƠ KHÍ**

**HÀ NỘI, 2022**

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
**HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ**

ĐÀO VĂN DƯỠNG

# NGHIÊN CỨU TỐI ƯU HÓA CHẾ ĐỘ CẮT KHI PHAY CAO TỐC THÉP HỢP KIM SAU NHIỆT LUYỆN TRÊN MÁY CNC

Chuyên ngành: Kỹ thuật Cơ khí

Mã số: 9.52.01.03

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ**

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1. TS Lại Anh Tuấn
2. TS Đỗ Tiến Lập

HÀ NỘI, 2022

# LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn chân thành gửi tới thầy **TS Lại Anh Tuấn** và thầy **TS Đỗ Tiến Lập** đã tận tình hướng dẫn, động viên và giúp đỡ nghiên cứu sinh trong suốt quá trình thực hiện với thời gian dài và hoàn thành luận án này.

Tác giả xin trân trọng gửi lời cảm ơn tới các thầy, đồng nghiệp, bạn bè đã và đang công tác trong bộ môn Chế tạo máy, Khoa Cơ khí, trong Trung tâm Công nghệ thuộc Học viện Kỹ thuật Quân sự đã giúp đỡ và tạo điều kiện thuận lợi cho nghiên cứu sinh trong quá trình thực hiện luận án.

Cuối cùng, tác giả xin bày tỏ lòng biết ơn, tình yêu thương tới gia đình đã luôn bên cạnh ủng hộ, động viên trong suốt thời gian thực hiện và hoàn thành luận án.

# LỜI CAM ĐOAN

Tác giả xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi, các kết quả trình bày trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác, các thông tin trích dẫn trong luận án này đều được ghi rõ nguồn gốc.

*Hà Nội, ngày  tháng  năm 2022*

**Đào Văn Dưỡng**

# DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CHỮ VIẾT TẮT THƯỜNG DÙNG

| Ký hiệu | Đơn vị | Đại lượng |
|---|---|---|
| CNC | | Máy điều khiển số |
| HSM | | Gia công cao tốc |
| CAD | | Thiết kế có sự hỗ trợ của máy tính |
| CAM | | Gia công có sự hỗ trợ của máy tính |
| EDM | | Gia công bằng tia lửa điện |
| $F_x, F_y, F_z$ | N | Lực cắt trên các trục OX, OY và OZ |
| $E_T, E_1, E_2, E_3$ | $kWh$ | Năng lượng tổng, cơ bản, chạy không và năng lượng cắt gọt |
| $E_{Total}$ , $E_{cut}, E_{\text{air}}$ | $kWh$ | Năng lượng tổng khi gia công, năng lượng cắt gọt, năng lượng khi không cắt |
| $E_{Spindle}$, $E_{\text{feed}}, E_{cool}$ | $kWh$ | Năng lượng tiêu thụ khi quay trục chính, chạy dao và làm mát |
| $E_{fix}$ , $E_{axes}$ | $kWh$ | Năng lượng tiêu thụ cố định, năng lượng tiêu thụ trên các trục |
| $E_{tool-changer}$ | $kWh$ | Năng lượng tiêu thụ khi thay dao |
| $E_{axis-chillers}$ | $kWh$ | Năng lượng làm lạnh các trục |
| $E_{Spindle-chiller}$ | $kWh$ | Năng lượng làm lạnh trục chính |
| $E_{Chip-conveyor}$ | $kWh$ | Năng lượng tiêu thụ khi tải phoi |
| $E_{pallet-clamp}$, $E_{cb}$ | $kWh$ | Năng lượng gá kẹp và năng lượng tiêu thụ cơ bản |
| $P_{cb}$, $P_{cg}$ | $kW$ | Công suất tiêu thụ cơ bản và công suất cắt gọt |
| $t_{cb}$, $t_{cg}$ | $h$ (giờ) | Thời gian máy chạy trong giai đoạn cơ bản, và thời gian cắt gọt |

| | | |
|---|---|---|
| $P_x, P_y, P_z$ | $kW$ | Công suất tiêu thụ của các trục X, Y, Z |
| $n_{dc}$ | Vòng/phút | Tốc độ động cơ truyền động trục chính |
| $u_{ts}$ | | Tỉ số truyền động trục chính |
| $f_{dc}, f_{dc\max}$ | Hz | Tần số và tần số lớn nhất của động cơ |
| $\omega$ | rad/s | Vân tốc góc |
| $T_{tt}$ | Nm | Mô men xoắn trục chính |
| $J_{tt}, J_{rotor}, J_{ms}$ | $kg.m^2$ | Mô men quán tính trục chính, rô to động cơ và mô men quán tính hệ thống truyền động trục chính |
| $t, t_{\min}, t_{\max}, t_0$ | $mm$ | Chiều sâu cắt, chiều sâu cắt nhỏ nhất, lớn nhất, chiều sâu cắt ở mức cơ bản |
| $a_p$ | $mm$ | Bước dao ngang |
| $F, F_{\min}, F_{\max}, F_0$ | $mm/ph$ | Tốc độ chạy dao, nhỏ nhất và lớn nhất, tốc độ chạy dao ở mức cơ bản |
| $V_c, V_{\min}, V_{\max}, V_0$ | $m/ph$ | Tốc độ cắt, nhỏ nhất và lớn nhất, tốc độ cắt ở mức cơ bản |
| $n, n_{\min}, n_{\max}, n_0$ | $vg/ph$ | Tốc độ trục chính, nhỏ nhất và lớn nhất, tốc độ trục chính ở mức cơ bản |
| $MRR$ | $m^3/ph$ | Tốc độ bóc tách vật liệu |
| $x_1$ | $mm$ | Biến số ứng với chiều sâu cắt |
| $x_2$ | $mm/ph$ | Biến số ứng với tốc độ chạy dao |
| $x_3$ | $vg/ph$ | Biến số ứng với tốc độ trục chính |
| $Y_{DK}, Y_{ss}$ | $mm$ | Hàm toán học về đường kính và sai số kích thước |
| $Y_{nham}$ | µm | Hàm toán học mô tả độ nhám bề mặt |

| | | |
|---|---|---|
| $Y_{NL}$ | $kWh$ | Hàm toán học mô tả độ năng lượng tiêu thụ |
| $b_0, b_j$ | | Các hệ số của phương trình hồi quy |
| $S_{th}, S_{tt}$ | | Phương sai tái hiện và phương sai tương thích |
| $\Delta t$ | $mm$ | Khoảng biến thiên của chiều sâu cắt |
| $\Delta F$ | $mm/ph$ | Khoảng biến thiên của tốc độ chạy dao |
| $\Delta V$ | $m/ph$ | Khoảng biến thiên của tốc độ cắt |
| $\Delta n$ | $vg/ph$ | Khoảng biến thiên của số vòng quay trục chính |
| $\alpha$ | | Hệ số khoảng cách mở rộng tính từ tâm thí nghiệm trong lý thuyết thực nghiệm trực giao |
| $\phi(x, \mathrm{w})$ | | Hàm đa mục tiêu tổng theo phương pháp trọng số |
| $\mathrm{w}_i$ | | Trọng số đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng hàm mục tiêu thành phần |
| $\overline{f}_i(x)$ | | Hàm mục tiêu thứ i đã chuẩn hóa |
| $x^*$ | | Nghiệm hàm đa mục tiêu (nghiệm Pareto) |
| ES,es | $mm$ | Giá trị dung sai kích thước (giới hạn trên và giới hạn dưới) |
| *Lsaiso* | % | Giá trị sai số cho từng giá trị hàm mục tiêu trong mạng trí tuệ nhân tạo |
| *Tsaiso* | % | Giá trị sai số tổng trong mạng trí tuệ nhân tạo |

# DANH MỤC HÌNH VẼ

*Hình 1. 1. Vùng tốc độ cắt cho một số loại vật liệu [19]* ..... 10
*Hình 1. 2. Một số đặc điểm chính của gia công cao tốc [20]* ..... 11
*Hình 1. 3. Các quy trình gia công trong chế tạo khuôn [30]* ..... 12
*Hình 1. 4.* Các chi tiết hàng không bằng hợp kim nhôm ..... 14
*Hình 1. 5.* Động cơ hàng không làm bằng hợp kim titan ..... 14
*Hình 1. 6.* Gia công khuôn mẫu cao tốc ..... 14
*Hình 1. 7. Đồ thị mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ $v, f, a_r$ tới lực $F_x$ [8]* ..... 18
*Hình 1. 8. Đồ thị mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ $v, f, a_p$ tới độ nhám bề mặt [8]* ..... 18
*Hình 1. 9. Đồ thị mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ $v, f, a_p$ tới rung động theo phương X [8]* ..... 18
*Hình 1. 10. Đồ thị mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ $v, f, a_p$ tới lực $F_y$ với dao phay ngón [9]* ..... 19
*Hình 1. 11. Đồ thị mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ $v, f, a_p$ tới độ mòn dụng cụ với dao phay ngón [9]* ..... 20
*Hình 1. 12. Đồ thị mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ $v, f, a_p$ tới độ mòn dụng cụ với dao phay cầu [9]* ..... 20
*Hình 1. 13. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới lực cắt [58]* ..... 22
*Hình 1. 14. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới nhiệt cắt [99]* ..... 23
*Hình 1. 15. Mật độ phổ công suất tại ổ đỡ trục chính [59]* ..... 25
*Hình 1. 16. Đánh giá mòn dao theo vận tốc cắt và thời gian gia công [51]* .. 26
*Hình 1. 17. Kích thước và hướng co rút phoi dạng răng cưa [27]* ..... 27
*Hình 1. 18. Mối quan hệ giữa độ dày phoi với nhiệt cắt và vận tốc cắt [95].* 28
*Hình 1. 19. Giá trị độ nhám và vận tốc cắt [83]* ..... 30
*Hình 1. 20. Sai lệch kích thước với các kiểu làm mát khác nhau [44]* ..... 31
*Hình 1.21. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới công suất tiêu hao khi gia công tiện [47]* ..... 33
*Hình 1.22. Khuôn mẫu được chế tạo từ thép SKD11* ..... 36

*Hình 2. 1. Các giai đoạn của quá trình gia công trên máy CNC [120]* ..... 40
*Hình 2. 2. Các kiểu đường chạy dao* ..... 44

*Hình 2. 3. Mô hình hệ truyền động chạy dao trên máy phay CNC [127]* ..... 45
*Hình 2. 4. Mô hình tính toán khi phay cao tốc* ..... 54
*Hình 2. 5. Độ chính xác gia công* ..... 60

*Hình 3. 1. Mô hình phay thực nghiệm* ..... 76
*Hình 3. 2. Chiến lược phay hốc tròn trên Unigraphic (NX)* ..... 77
*Hình 3. 3. Sơ đồ phay thực nghiệm* ..... 78
*Hình 3. 4. Phôi thép hợp kim SKD11 sau nhiệt luyện* ..... 78
*Hình 3. 5. Thiết bị nhiệt luyện Turbo-IPSEN/Đức* ..... 79
*Hình 3. 6. Máy đo độ cứng FR-1E/Hard Machine* ..... 80
*Hình 3. 7. Trung tâm gia công DMG-DMC1450V* ..... 81
*Hình 3. 8. Dao phay cao tốc YG SGN09080H [139]* ..... 81
*Hình 3. 9. Chế độ cắt tham khảo theo Nhà sản xuất YG [139]* ..... 82
*Hình 3. 10. Thiết bị đo năng lượng MAVOWATT [140]* ..... 83
*Hình 3. 11. Thiết bị đo điện áp và dòng tổng hiệu dụng [141]* ..... 83
*Hình 3. 12. Thiết bị đo độ nhám [142] và máy đo CMM [143]* ..... 84
*Hình 3. 13. Vị trí các lỗ gia công* ..... 85
*Hình 3. 14. Thiết lập ma trận thực nghiệm Box-Wilson (CCD)* ..... 94
*Hình 3. 15. Thông tin cơ bản về mô hình thực nghiệm* ..... 94
*Hình 3. 16. Chọn mô hình toán học cho phương trình hồi quy* ..... 94
*Hình 3. 17. Kết quả phân tích sai lệch chuẩn và số bậc tự do* ..... 94
*Hình 3. 18. Đồ thị 2D về phân bố sai lệch chuẩn của mô hình* ..... 95
*Hình 3. 19. Đồ thị 3D phân bố sai lệch chuẩn của mô hình* ..... 95
*Hình 3. 20. Kết quả phân tích ANOVA* ..... 95
*Hình 3. 21. Các hệ số của phương trình hồi quy* ..... 95
*Hình 3. 22. Thiết lập ma trận thực nghiệm Box-Wilson (CCD)* ..... 96
*Hình 3. 23. Thông tin cơ bản về mô hình thực nghiệm* ..... 96
*Hình 3. 24. Kết quả phân tích ANOVA* ..... 97
*Hình 3. 25. Các hệ số của phương trình hồi quy sai số kích thước* ..... 97
*Hình 3. 26. Thiết lập ma trận thực nghiệm Box-Wilson (CCD)* ..... 98
*Hình 3. 27. Thông tin cơ bản về mô hình thực nghiệm* ..... 98
*Hình 3. 28. Kết quả phân tích ANOVA* ..... 98
*Hình 3. 29. Các hệ số của phương trình hồi quy độ nhám bề mặt* ..... 98
*Hình 3. 30. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt* ..... 99
*Hình 3. 31. Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao* ..... 99

*Hình 3. 32. Ảnh hưởng của vận tốc cắt*..... 99

*Hình 4. 1. Sơ đồ thuật toán di truyền*..... 104
*Hình 4. 2. Giá trị năng lượng tối ưu trong thuật toán PSO*..... 108
*Hình 4. 3. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao*..... 109
*Hình 4. 4. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ cắt* ..... 110
*Hình 4. 5. Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao và tốc độ cắt*..... 111
*Hình 4. 6. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao*..... 114
*Hình 4. 7. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ cắt* ..... 115
*Hình 4. 8. Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao và tốc độ cắt*..... 116
*Hình 4. 9. Giá trị độ nhám tối ưu*..... 117
*Hình 4. 10. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao*..... 118
*Hình 4. 11. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ cắt* ..... 119
*Hình 4. 12. Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao và tốc độ cắt*..... 120
*Hình 4. 13. Mô hình nghiệm tối ưu đa mục tiêu* ..... 121
*Hình 4. 14. Ví dụ về đường biên Pareto* ..... 123
*Hình 4. 15. Kết quả tối ưu đa mục tiêu cho TH1* ..... 126
*Hình 4. 16. Kết quả tối ưu đa mục tiêu cho TH2* ..... 127
*Hình 4. 17. Kết quả tối ưu đa mục tiêu cho TH3* ..... 129
*Hình 4. 18. Mô hình mạng nơ ron*..... 133
*Hình 4. 19. Mô hình mạng tổng thể* ..... 133
*Hình 4. 20. Kết quả huấn luyện mạng nơ ron*..... 135
*Hình 4. 21. Kết quả huấn luyện mạng nơ ron (b)* ..... 135
*Hình 4. 22. Kết quả đánh giá sai số bình phương cực tiểu* ..... 136
*Hình 4. 23. Tỉ lệ phân chia dữ liệu và sai số trong huấn luyện mạng*..... 136
*Hình 4. 24. Phân bố dữ liệu giữa đầu ra của mạng và dữ liệu đích* ..... 137
*Hình 4. 25. So sánh dữ liệu hàm mục tiêu từ mạng nơ ron và dữ liệu đích* . 138

# DANH MỤC BẢNG BIỂU

*Bảng 1. 1. So sánh vận tốc cắt gia công truyền thống và gia công cao tốc (m/phút) [30]* ..... 13

*Bảng 2. 1. Ma trận thực nghiệm* ..... 70
*Bảng 2. 2. Ma trận thực nghiệm sau khi đổi biến* ..... 71

*Bảng 3. 1. Thành phần hóa học của phôi thép hợp kim SKD11* ..... 79
*Bảng 3. 2. Miền giới hạn thông số công nghệ cho Bài toán thực nghiệm số 1* ..... 87
*Bảng 3. 3. Miền giới hạn  thông số cắt thực nghiệm cho bài toán 2* ..... 88
*Bảng 3. 4. Thông số công nghệ khi phay thô* ..... 89
*Bảng 3. 5. Thông số công nghệ khi phay tinh* ..... 90
*Bảng 3. 6. Kết quả thực nghiệm* ..... 91

*Bảng 4. 1. Thông số thuật toán PSO* ..... 107
*Bảng 4. 2. Thông số thuật toán GA* ..... 113
Bảng 4. 3. Thông số thuật toán PSO ..... 117
*Bảng 4. 4. Thông số thuật toán GA* ..... 125
*Bảng 4. 5. Bộ các thông số tối ưu đa mục tiêu cho TH1* ..... 126
*Bảng 4. 6. Bộ các thông số tối ưu đa mục tiêu cho TH2* ..... 128
*Bảng 4. 7. Bộ các thông số tối ưu đa mục tiêu cho TH3* ..... 128
*Bảng 4. 8. Thông số các mạng nơ ron và điều kiện biên* ..... 132
*Bảng 4. 9. Bảng giá trị hàm mục tiêu giữa giá trị đặt (dữ liệu đích) và giá trị dự đoán từ mạng nơ ron* ..... 138
*Bảng 4. 10. Giá trị các thông số công nghệ dự đoán tương ứng* ..... 140

# MỤC LỤC

**LỜI NÓI ĐẦU**

**LỜI CẢM ƠN**

**LỜI CAM ĐOAN**

**DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VIẾT TẮT**

**DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ**

**DANH MỤC BẢNG BIỂU**

**MỤC LỤC**

**MỞ ĐẦU ..... 1**

**CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ GIA CÔNG CAO TỐC ..... 10**

**1.1. Tổng quan về gia công cao tốc** ..... 10

***1.1.1. Định nghĩa gia công cao tốc*** ..... 10

***1.1.2. So sánh gia công thông thường và gia công cao tốc*** ..... 11

***1.1.3. Ứng dụng của gia công cao tốc*** ..... 13

***1.1.4. Hạn chế của gia công cao tốc*** ..... 15

**1.2. Tổng quan nghiên cứu trong và ngoài nước về vấn đề cần quan tâm của luận án.** ..... 15

***1.2.1. Các nghiên cứu trong nước*** ..... 17

***1.2.2. Các nghiên cứu ngoài nước*** ..... 21

***1.2.3. Bài toán tối ưu trong gia công cao tốc*** ..... 34

***1.2.4. Vấn đề gia công cao tốc vật liệu cứng và thép hợp kim SKD11*** ..... 35

**1.3. Một số đánh giá và xác định vấn đề nghiên cứu của luận án** ..... 37

**Kết luận chương 1** ..... 38

**CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT KHI PHAY CAO TỐC VÀ PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM ..... 39**

**2.1. Mô hình tính toán năng lượng tiêu thụ khi gia công phay trên máy CNC** 39

***2.1.1. Mô hình tính toán tổng quát*** ..... 39

***2.1.2. Tính toán năng lượng tiêu thụ không tải*** ..... 42

*2.1.3. Tính toán công suất quay trục chính* ....48
*2.1.4. Tính toán công suất cắt gọt* ....53
*2.1.5. Tính toán thời gian di chuyển không tải*....54
*2.1.6. Tính toán thời gian cắt gọt* ....55
*2.1.7. Các điều kiện trong bài toán thực nghiệm*....56
*2.1.8. Xác định bài toán về năng lượng tiêu thụ*....56
*2.2. Vấn đề về nhám bề mặt khi gia công phay trên máy CNC*....57
**2.3. Vấn đề về độ chính xác kích thước khi gia công** ....59
**2.4. Bài toán tối ưu đơn mục tiêu và đa mục tiêu**....62
**2.5. Bài toán thực nghiệm**....63
*2.5.1. Phương pháp bình phương cực tiểu* ....63
*2.5.2. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm*....64
*2.5.3. Phương pháp thực nghiệm quy hoạch trực giao cấp II*....69
**Kết luận chương 2** ....73
**CHƯƠNG 3. THỰC NGHIỆM PHAY CAO TỐC THÉP HỢP KIM SAU NHIỆT LUYỆN....75**
**3.1. Bài toán thực nghiệm phay cao tốc thép sau nhiệt luyện** ....75
*3.1.1. Mục tiêu và bài toán thực thực nghiệm* ....75
*3.1.2. Mô hình thực nghiệm* ....77
*3.1.2. Các bước tiến hành thực nghiệm* ....84
*3.1.3. Thu thập kết quả thực nghiệm* ....91
**3.2. Xử lý kết quả thực nghiệm** ....92
*3.2.1. Phương trình hồi quy ứng với năng lượng tiêu thụ khi gia công thô* ....92
*3.2.2. Phương trình hồi quy ứng với đường kính lỗ*....96
*3.2.3. Phương trình hồi quy ứng với độ nhám thành lỗ* ....97
**3.3. Đánh giá sơ bộ ảnh hưởng của các thông số công nghệ**....98
**Kết luận Chương 3** ....100
**CHƯƠNG 4. TỐI ƯU HÓA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ KHI PHAY CAO TỐC THÉP HỢP KIM SAU NHIỆT LUYỆN ....102**
**4.1. Các phương pháp tối ưu hóa**....102

*4.1.1. Thuật toán di truyền (GA)* ....103
*4.1.2. Thuật toán bầy đàn (PSO)* ....104
**4.2. Tối ưu hóa đơn mục tiêu**....107
*4.2.1. Tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ khi phay thô cao tốc*....107
*4.2.2. Nâng cao độ chính xác kích thước khi phay tinh cao tốc*....112
*4.2.3. Tối ưu hóa độ nhám bề mặt khi phay tinh cao tốc*....116
**4.3. Tối ưu hóa đa mục tiêu** ....120
*4.3.1. Phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu*....120
*4.3.2. Tối ưu hóa đa mục tiêu khi phay tinh cao tốc thép hợp kim sau nhiệt luyện* ....124
**4.4. Đề xuất ứng dụng mạng trí tuệ nhân tạo trong xác định vùng thông số công nghệ khả thi** ....129
*4.4.1. Bài toán thuận*....130
*4.4.2. Bài toán ngược* ....131
**4.4.3.** ***Lập bộ dữ liệu để huấn luyện mạng trí tuệ nhân tạo*** ....132
**4.4.4.** ***Xây dựng cấu trúc mạng và huấn luyện mạng nơ ron*** ....132
**4.4.5.** ***Đánh giá độ tin cậy của mạng nơ ron***....134
**4.4.6. Dự đoán thông số công nghệ cho các hàm mục tiêu** ....134
**Kết luận chương 4** ....141
**KẾT LUẬN CHUNG ....143**
**CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ ....145**
**TÀI LIỆU THAM KHẢO ....147**
**Tiếng Việt**....147
**Tiếng Anh**....148
**PHỤ LỤC ....164**

# MỞ ĐẦU

Ngày nay trong thời đại công nghiệp 4.0, việc cạnh tranh trên thị trường ở mọi lĩnh vực ngày càng khốc liệt và thể hiện trên nhiều mặt thông qua các chuỗi cung ứng và chuỗi giá trị, đặc biệt là trong công nghiệp sản xuất. Điều đó dẫn tới sự thiết lập nhiều tiêu chuẩn mới trong gia công. Yêu cầu về tiến độ thời gian và hiệu quả kinh tế ngày càng cao. Đây chính là động lực cho sự phát triển của nhiều quá trình sản xuất và sản phẩm kĩ thuật mới. Gia công cao tốc chính là một trong các giải pháp được ưu tiên lựa chọn hàng đầu trong khoảng 10 năm trở lại đây.

Sự phát triển ngày càng nhanh chóng của công nghệ vật liệu làm cho việc gia công chi tiết trở nên ngày càng khó khăn. Việc tìm kiếm giải pháp gia công mới cho các vật liệu mới là vô cùng cần thiết và gặp nhiều trở ngại. Ngành công nghiệp không gian đòi hỏi các loại vật liệu bền nhiệt, hợp kim thép không gỉ, hợp kim nhôm, titan vừa nhẹ vừa bền... Ngành công nghiệp ô tô đòi hỏi các loại vật liệu lưỡng kim, composit, kim loại gắn kết với graphit và nhôm. Ngành công nghiệp chế tạo khuôn mẫu lại yêu cầu chủ yếu về gia công từ thô đến tinh các vật liệu có độ cứng rất cao. Mặt khác, yêu cầu về chất lượng của sản phẩm ngày càng cao và gia công cao tốc đảm bảo rất tốt điều này. Sản phẩm sau gia công gần như không phải sửa nguội. Đây là điểm rất quan trọng trong chế tạo khuôn mẫu với các hình dáng hình học dạng 3D phức tạp. Một trong những yếu tố cạnh tranh chính để tiêu thụ được sản phẩm là tính mới lạ. Vòng đời trung bình của một mẫu xe mới là khoảng 3 năm, máy tính khoảng 1,5 năm và điện thoại khoảng 3 tháng. Đòi hỏi tiên quyết cho sự phát triển chính là sự thay đổi nhanh về thiết kế và thời gian rất ngắn để đưa ra thị trường sản phẩm mới đó. Gia công cao tốc (High Speed Machining - HSM) chính là giải pháp kĩ thuật phù hợp.

Trong vài năm đây, công nghệ in 3D phát triển mạnh mẽ, mang lại luồng gió mới cho công nghiệp sản xuất. Tuy nhiên, công nghệ in 3D kim loại vẫn còn đang rất mới mẻ, vẫn cần phải được nghiên cứu nhiều hơn trước khi đưa vào ứng dụng gia công cơ khí chính xác. Do vậy, gia công cao tốc vẫn chiếm vai trò chủ đạo. Hơn nữa, sự phát triển mạnh mẽ của các nhiều loại máy gia công điều khiển số (Computer Numerical Control – CNC) tốc độ cao; các loại dụng cụ cắt có thể gia công các vật liệu cứng, siêu cứng; hệ thống trục chính cứng vững, độ cân bằng cao; hệ điều khiển thông minh và sự phát triển mạnh của các phần mềm CAD/CAM (CAD - Computer Aided Design: thiết kế có sự trợ giúp của máy tính, CAM - Computer Aided Machining: gia công có sự trợ giúp của máy tính) với khả năng tích hợp và thích nghi cao đã mở đường cho nhiều loại hình gia công mới với nhiều giải pháp kĩ thuật mới. Trong đó, phương pháp gia công cao tốc được ứng dụng nhiều nhất.

Đánh giá như vậy để thấy rằng, mảng gia công tốc độ cao vẫn là lĩnh vực còn nhiều vấn đề cần giải quyết hiện nay, nhất là ở Việt Nam. Trạng thái gia công có sự khác biệt rõ ràng so với những gì chúng ta đã biết trước đó như lực cắt, nhiệt cắt, rung động, ma sát, mòn dao, độ chính xác, năng lượng tiêu thụ, …Theo đó, nghiên cứu nắm bắt và làm chủ được công nghệ gia công cao tốc phục vụ cho nền sản xuất trong nước vẫn cần phải được thực hiện mạnh mẽ hơn nữa.

**Tính cấp thiết của đề tài luận án**

Thách thức của ngành gia công sản xuất hiện đại luôn là nâng cao chất lượng sản phẩm, tăng năng suất và giảm chi phí chế tạo. Để giải quyết vấn đề này, các nhà sản xuất thường hướng đến thay đổi phương thức gia công sản xuất và phát triển sản phẩm với giá thành hợp lý. Trong bối cảnh đó, gia công cao tốc là một trong những công nghệ sản xuất hàng đầu được lựa chọn để phát triển trong nền sản xuất hiện nay. Các lĩnh vực chính sử dụng nhiều công nghệ

gia công cao tốc gồm: lĩnh vực gia công các chi tiết vật liệu nhôm trong sản xuất linh kiện ô tô, máy tính và thiết bị y tế do lĩnh vực này cần tốc độ loại bỏ vật liệu nhanh do quy trình công nghệ thường phức tạp và có nhiều nguyên công; lĩnh vực gia công các chi tiết nhôm dài và thành mỏng trong ngành sản xuất máy bay; cuối cùng là ngành công nghiệp sản xuất khuôn mẫu liên quan đến gia công các vật liệu cứng và siêu cứng.

Một trong những đặc điểm chính của công nghệ gia công cao tốc là thường sử dụng các trang thiết bị, máy móc hiện đại và gia công hiệu quả các loại vật liệu tiên tiến, khó gia công có đặc tính luyện kim đặc trưng như thép hợp kim cứng (thép C45 và SKD11 sau nhiệt luyện), hợp kim siêu cứng (hợp kim của Titan như TiAlN, TiCN, Ti6A14V, …). Độ cứng các loại vật liệu này thường nằm trong phạm vi từ 40 đến 60 HRC. Đây là vùng độ cứng mà các phương pháp gia công cắt gọt truyền thống khó có thể thực hiện được. Do đó, cần thiết phải nghiên cứu công nghệ gia công cao tốc cho vật liệu hợp kim cứng.

Trong gia công cao tốc, có rất nhiều yếu tố cần được xem xét như lực cắt, nhiệt cắt, rung động, mòn dụng cụ, nhám bề mặt, biến dạng, hình thái phoi, độ chính xác kích thước, năng lượng tiêu thụ. Trong số đó, chất lượng bề mặt, độ chính xác kích thước luôn là một trong các tiêu chí hàng đầu để đánh giá hiệu quả gia công và chất lượng sản phẩm. Chất lượng bề mặt tốt giúp cải thiện độ bền mỏi, khả năng chống ăn mòn và tuổi thọ của sản phẩm. Mặt khác, độ nhám và độ chính xác kích thước trong quá trình phay cao tốc sẽ có nhiều điểm khác biệt với gia công thông thường do sự biến đổi khác biệt trên bề mặt cứng của chi tiết trong quá trình gia công. Năng lượng tiêu thụ trong quá trình gia công nói chung và gia công cao tốc nói riêng chiếm một phần đáng kể trong chi phí sản xuất nên cần thiết phải được tính đến trong đánh giá tính kinh tế và nâng cao hiệu quả của cả quá trình.

Mặt khác, gia công cao tốc vật liệu cứng nói chung và gia công phay thép hợp kim cứng nói riêng có những lợi nhất định, đặc biệt lợi thế về khía cạnh kinh tế. Mỗi công nghệ mới được hình thành luôn ẩn đằng sau nó là lợi ích về kinh tế. Một trong những phương thức hiệu quả nhất để tăng tính kinh tế trong sản xuất đó là thay đổi trực tiếp các thành phần tạo nên tổng chi phí sản xuất. Quá trình phay cao tốc thép hợp kim cứng cũng có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến chi phí sản xuất. Trong đó, năng lượng tiêu thụ, thời gian gia công, chất lượng sản phẩm (độ chính xác kích thước, độ nhám bề mặt, …), tuổi bền dụng cụ cắt là những yếu tố ảnh hưởng trực tiếp nhất. Do đó, cần thiết phải xem xét đến các yếu tố này khi phay cao tốc thép hợp kim cứng.

Rất nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng, sự thay đổi của các thông số công nghệ trong quá trình cắt gọt như vận tốc cắt, tốc độ chạy dao, chiều sâu cắt, bề rộng cắt có ảnh hưởng rất lớn đến các hiện tượng vật lý khi cắt như lực cắt, nhiệt cắt, rung động, mài mòn và ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng sản phẩm cũng như chi phí chế tạo không chỉ trong gia công thông thường mà cả gia công cao tốc. Việc xây dựng mô hình toán học mô tả mối quan hệ của các yếu tố trên với các thông số công nghệ là vô cùng cần thiết và là cơ sở cho việc tối ưu hóa quá trình gia công, góp phần quyết định đến việc nâng cao chất lượng sản phẩm, giảm chi phí chế tạo và nâng cao năng suất.

Từ các vấn đề đã nêu ở trên, luận án đã lựa chọn đề tài nghiên cứu: "***Nghiên cứu tối ưu hóa chế độ cắt khi phay cao tốc thép hợp kim sau nhiệt luyện trên máy CNC***" với mục tiêu xây dựng mô hình toán học và tối ưu hóa các thông số công nghệ nhằm giảm năng lượng tiêu thụ khi phay thô và tinh, tăng độ chính xác kích thước và tăng độ nhám bề mặt khi phay tinh cao tốc thép SKD11 sau nhiệt luyện.

**Mục đích nghiên cứu của luận án**

Nghiên cứu tối ưu hóa chế độ công nghệ khi phay cao tốc thép hợp kim cứng trên máy CNC thông qua nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm.

**Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

Đối tượng nghiên cứu của luận án là phương pháp phay cao tốc cho thép SKD11 sau nhiệt luyện (độ cứng trên 55HRC).

Phạm vi nghiên cứu của luận án là phay cao tốc thô và tinh hốc tròn thép SKD11 sau nhiệt luyện (độ cứng 55 HRC) trên máy phay đứng cao tốc 3 trục của hãng DMG (thông số cụ thể của máy được thể hiện trong phụ lục 1). Dụng cụ cắt là dao phay ngón liền khối của hãng YG chuyên dùng cho gia công cao tốc thép sau nhiệt luyện. Đường kính phần cắt và đường kính cán dao là 8mm, số răng cắt là 4, góc nghiêng helix 35 độ và có phủ lớp TiAlN.

**Nội dung nghiên cứu của luận án**

Nghiên cứu cơ sở xây dựng mô hình toán học thể hiện ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới năng lượng tiêu thụ khi phay cao tốc thô, độ chính xác kích thước và độ nhám bề mặt khi phay tinh cao tốc thép SKD11 sau nhiệt luyện.

Nghiên cứu thực nghiệm xây dựng các mô hình toán học nêu trên.

Nghiên cứu cơ sở tối ưu hóa và giải bài toán tối ưu nhằm giảm năng lượng tiêu thụ khi phay thô cao tốc, nâng cao độ chính xác kích thước và độ nhám bề mặt khi phay tinh cao tốc thép SKD11 sau nhiệt luyện.

**Phương pháp nghiên cứu của luận án**

Phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với nghiên cứu thực nghiệm được sử dụng trong toàn bộ quá trình thực hiện luận án.

Nghiên cứu lý thuyết về quá trình gia công cao tốc thông qua việc tổng hợp và đánh giá kết quả các nghiên cứu đã được công bố trước đây.

Thường xuyên trao đổi, thảo luận và tiếp thu ý kiến của các nhà nghiên cứu, các chuyên gia trong các cơ sở đào tạo và sản xuất về vấn đề liên quan nhằm xác định mục tiêu, phương pháp nghiên cứu và triển khai thực nghiệm.

Thực nghiệm phay thô và tinh cao tốc thép SKD11 sau nhiệt luyện để lấy dữ liệu phục vụ xây dựng mô hình toán học. Lý thuyết và phần mềm quy hoạch thực nghiệm, xử lý số liệu được sử dụng trong các nhiệm vụ này.

Ứng dụng lý thuyết tối ưu (các thuật toán GA, PSO và mạng trí tuệ nhân tạo) để giải các bài toán tối ưu trong quá trình phay thô và tinh cao tốc thép SKD11 sau nhiệt luyện.

**Đóng góp mới của luận án**

Bổ sung kiến thức về mô hình, phương pháp và kết quả nghiên cứu thực nghiệm phay cao tốc thép SKD11 sau nhiệt luyện. Các kết quả cho phép phân tích, đánh giá sự ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến năng lượng tiêu hao, sai số gia công và nhám bề mặt và làm cơ sở để giải bài toán tối ưu hóa quá trình gia công.

Đã sử dụng phương pháp tối ưu hóa quá trình gia công đơn mục tiêu và đa mục tiêu về giảm năng lượng tiêu thụ, giảm sai số kích thước và độ nhám bề mặt trên cơ sở áp dụng giải thuật di truyền GA và giải thuật bầy đàn PSO khi phay thép SKD11 sau nhiệt luyện, góp phần làm phong phú thêm cơ sở lý thuyết của công nghệ gia công cao tốc.

Đã xây dựng được mô hình dự đoán các thông số công nghệ trong miền khả thi theo yêu cầu về độ chính xác gia công trên cơ sở mạng notron.

Đã giải bài toán tối ưu đơn mục tiêu, đa mục tiêu để xác định bộ thông số chế độ cắt phù hợp các mục tiêu đặt ra: tăng độ chính xác gia công, giảm mức tiêu thụ năng lượng và giảm độ nhám bề mặt gia công.

**Ý nghĩa khoa học**

Dựa trên kết quả nghiên cứu lý thuyết và thực nghiệm về quá trình phay thô và tinh cao tốc thép SKD11 sau nhiệt luyện, mô hình toán học thể hiện mối quan hệ của các thông số công nghệ với năng lượng tiêu thụ, độ nhám bề mặt và độ chính xác kích thước được xây dựng. Đây là cơ sở khoa học để nghiên cứu ảnh hưởng cũng như tối ưu hóa các thông số công nghệ tới các mục tiêu nêu trên.

Phương pháp nghiên cứu trong luận án có thể được sử dụng để xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới các chỉ tiêu khác nhau trong quá trình phay thô và tinh cao tốc thép SKD11 sau nhiệt luyện nói riêng và các vật liệu kim loại khác nói chung.

Mặt khác, phương án đề xuất sử dụng thuật toán trí tuệ nhân tạo có thể làm cơ sở để bắt đầu ứng dụng những thành quả của cách mạng công nghiệp 4.0 vào sản xuất cơ khí.

**Ý nghĩa thực tiễn**

Kết quả nghiên cứu có thể được sử dụng để giảm tối đa năng lượng tiêu thụ khi phay thô cao tốc, nâng cao độ chính xác kích thước và độ nhám bề mặt khi phay tinh cao tốc thép SKD11 sau nhiệt luyện, góp phần giảm chi phí năng lượng, thời gian gia công và nâng cao chất lượng gia công chi tiết.

**Cấu trúc luận án**

Luận án gồm phần Mở đầu, 04 chương, kết luận chung, tài liệu tham khảo và phụ lục.

**Chương 1.** ***Tổng quan về gia công cao tốc***

Chương này trình bày tổng quan về gia công cao tốc nói chung và phay cao tốc thép hợp kim cứng nói riêng. Tổng hợp và đánh giá cơ bản các kết quả nghiên cứu về gia công phay cao tốc thép hợp kim cứng đã được công bố trong và ngoài nước. Đánh giá cơ bản về ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới

một số chỉ tiêu trong quá trình phay cao tốc thép hợp kim cứng. Từ đó đưa ra các nhận định cần thiết để xác định cụ thể nội dung nghiên cứu của luận án.

**Chương 2.** ***Cơ sở lý thuyết khi phay cao tốc và phương pháp thực nghiệm***

Mô hình tính toán năng lượng tiêu thụ trên máy CNC, vấn đề về độ nhám bề mặt, độ chính xác kích thước và phương pháp thực nghiệm được xem xét cụ thể trong nội dung của chương. Việc phân tích các mô hình tính toán năng lượng tiêu thụ khi gia công trên máy CNC trong các công bố khoa học trước đây và thông qua đánh giá điều kiện sản xuất thực tế tại Việt Nam cho phép lựa chọn phương án nghiên cứu phù hợp của luận án. Việc xây dựng mô hình toán học mô tả mối quan hệ giữa các thông số công nghệ với năng lượng tiêu thụ, độ chính xác kích thước và độ nhám khi phay thô và tinh cao tốc thép hợp kim cứng được xác định rõ ràng. Cơ sở lý thuyết phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao cấp 2 được phân tích cụ thể.

**Chương 3.** ***Thực nghiệm phay cao tốc thép hợp kim sau nhiệt luyện***

Chương này tập trung mô tả hệ thống thực nghiệm, các bài toán thực nghiệm, kết quả thực nghiệm và xây dựng mô hình toán học thể hiện sự ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới năng lượng tiêu thụ, độ chính xác gia công và độ nhám bề mặt khi phay thô và tinh cao tốc thép SKD11 sau nhiệt luyện thông qua lý thuyết quy hoạch thực nghiệm, làm cơ sở cho việc giải bài toán tối ưu ở chương sau. Kết quả tính toán được kiểm chứng trên modul ANOVA của phần mềm DESIGN EXPERT 12.

**Chương 4.** ***Tối ưu hóa các thông số công nghệ khi phay cao tốc thép hợp kim sau nhiệt luyện.***

Chương cuối này trình bày thuật toán, phương pháp giải và kết quả bài toán tối ưu đơn mục tiêu và tối ưu đa mục tiêu năng lượng tiêu thụ khi phay

thô cao tốc, nâng cao độ chính xác kích thước và tối ưu độ nhám bề mặt khi phay tinh cao tốc thép SKD11 sau nhiệt luyện. Đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới các đại lượng. Đề xuất phương án sử dụng mạng trí tuệ nhân tạo trong việc dự đoán các thông số công nghệ khi có yêu cầu cho trước về độ chính xác kích thước dựa trên phương trình hồi quy.

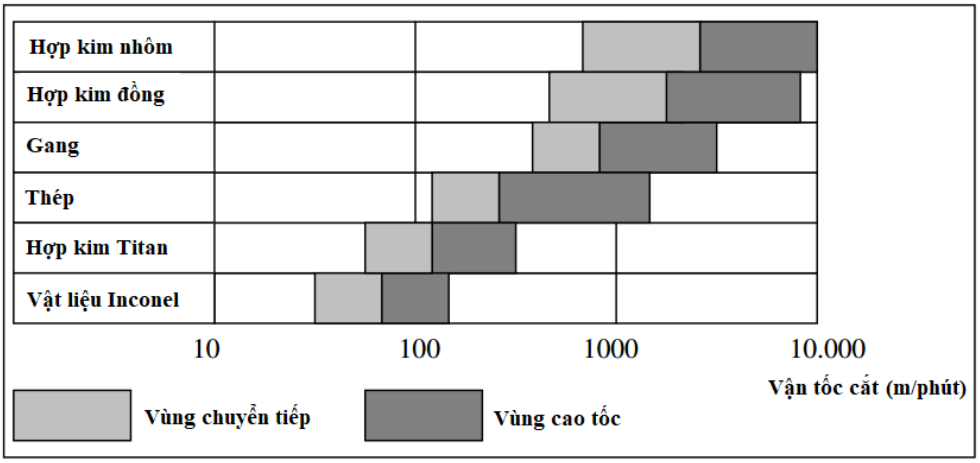
# CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ GIA CÔNG CAO TỐC

Nội dung của Chương tập trung vào trình bày tổng quan về gia công cao tốc nói chung và phay cao tốc thép hợp kim cứng nói riêng. Tổng hợp và đánh giá cơ bản các kết quả nghiên cứu về gia công phay cao tốc thép hợp kim cứng đã được công bố trong và ngoài nước. Đánh giá cơ bản về ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới một số chỉ tiêu trong quá trình phay cao tốc thép hợp kim cứng. Từ đó đưa ra các nhận định cần thiết để xác định cụ thể nội dung nghiên cứu của luận án.

## 1.1. Tổng quan về gia công cao tốc

### *1.1.1. Định nghĩa gia công cao tốc*

Theo nghiên cứu của C. Salomon [20], người đã nhận bằng sáng chế của Đức năm 1931 (số hiệu 523594) nghiên cứu về quá trình mòn dụng cụ, nhiệt cắt và tốc độ cắt tới hạn thì cho rằng gia công cao tốc là kiểu gia công có tốc độ cắt gấp 5 đến 10 lần gia công thông thường, nhiệt độ tại vùng cắt sẽ giảm do được truyền sang cho phoi. Gia công cao tốc được xem xét dựa vào các yếu tố sau: Gia công với tốc độ cắt cao, gia công với tốc độ chạy dao cao, gia công với tốc độ cắt cao và tốc độ chạy dao cao, gia công với hiệu suất cao.

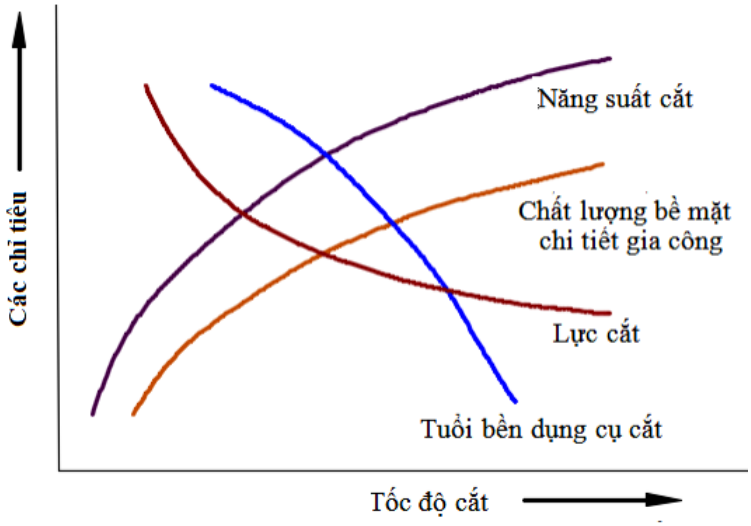



*Hình 1. 1. Vùng tốc độ cắt cho một số loại vật liệu [19]*

Về cơ bản, có thể cho rằng gia công cao tốc là công nghệ gia công mà ở đó sự kết hợp của tốc độ trục chính cao, lượng ăn dao lớn (high feed), hệ điều

khiển số (CNC) cao cấp, thiết bị gá dao ổn định, cân bằng; dụng cụ cắt đảm bảo và phần mềm CAD/CAM phù hợp ứng với một loại vật liệu cắt cụ thể. Gia công cao tốc cũng có thể áp dụng cho nhiều loại vật liệu khác nhau và định nghĩa gia công cao tốc cũng hoàn toàn phụ thuộc vào loại vật liệu gia công (hình 1.1).

Phương pháp gia công cao tốc có nhiều ưu điểm nổi trội khi tăng dần tốc độ cắt như năng suất cắt gọt tăng, chất lượng bề mặt tăng, lực cắt giảm. Tuy nhiên, càng tăng tốc độ cắt thì tuổi bền dụng cụ cắt càng giảm (hình 1.2)




*Hình 1. 2. Một số đặc điểm chính của gia công cao tốc [20]*

### *1.1.2. So sánh gia công thông thường và gia công cao tốc*

So với gia công truyền thống thì gia công cao tốc có những ưu điểm nổi bật. Gia công cao tốc có thể làm giảm thời gian gia công đến 50% và giảm đến 30-50% chi phí gia công, tùy trường hợp [88]. Ví dụ, ta có thể so sánh ba quy trình gia công khuôn mẫu điển hình (hình 1.3).

*a. Quy trình A: gia công thông thường*

(1) Phôi gia công chưa nhiệt luyện

(2) Gia công thô

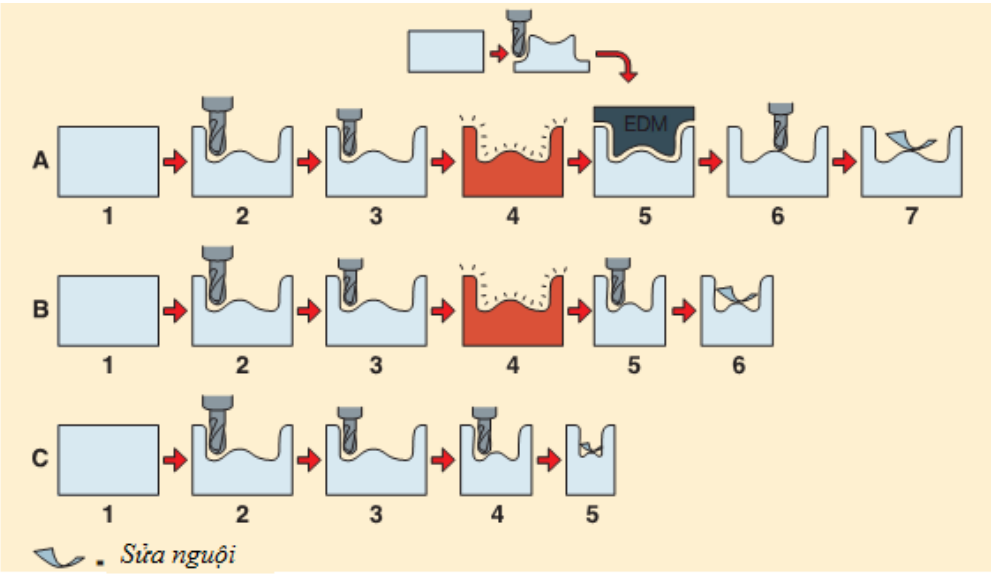
(3) Gia công bán tinh

(4) Nhiệt luyện đạt độ cứng theo yêu cầu

(5) Gia công tia lửa điện (EDM: Electrical Discharge Machining) các vị trí khó gia công (chiều sâu lớn, bán kính nhỏ hoặc khe nhỏ…). Tại nguyên công này phải mất thời gian và chi phí cho gia công điện cực

(6) Gia công tinh bề mặt sau nhiệt luyện

(7) Sửa nguội




*Hình 1. 3. Các quy trình gia công trong chế tạo khuôn [30]*

*b. Quy trình B: gia công bán cao tốc*

Dạng gia công này chỉ thay thế nguyên công (5) (EDM) bằng nguyên công tinh cao tốc. Sau đó sửa nguội. Dạng B giảm được 1 nguyên công so với dạng A.

*c. Quy trình C: gia công cao tốc*

Dạng này ngay từ đầu đã sử dụng phương pháp phay cao tốc từ nguyên công phay thô (2) đến nguyên công phay tinh bề mặt (4) với các dạng dao khác nhau. Điểm đặc biệt là ngay từ khi chế tạo phôi (1), nhà sản xuất đã nhiệt luyện ngay từ đầu nên giảm được 2 nguyên công gây mất thời gian và chi phí.

Trên thực tế, quy trình B thường áp dụng cho các chi tiết lớn, chiều sâu lớn. Quy trình C nên áp dụng cho các chi tiết không quá lớn và chiều sâu không lớn. Ngoài ra, gia công cao tốc đảm bảo hơn gia công thông thường ở tốc độ bóc

vật liệu cao, chất lượng bề mặt gia công tốt, độ chính xác cao, có khả năng gia công được các gân mỏng, thành mỏng và giảm việc tạo bavia, ít gây hư hại bề mặt gia công. Bảng 1 thể hiện thông số vận tốc cắt so sánh giữa gia công thông thường và gia công cao tốc.

*Bảng 1. 1. So sánh vận tốc cắt gia công truyền thống và gia công cao tốc (m/phút) [30]*

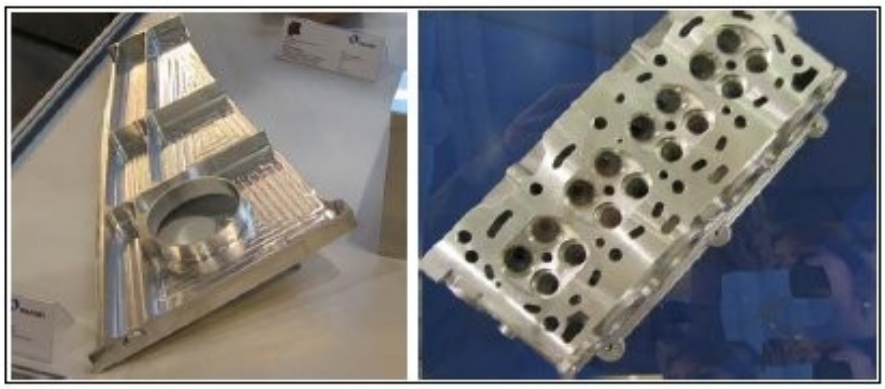
| **Vật liệu** | **Độ cứng (HB)** | **Gia công truyền thống (m/phút)** | **HSM thô (m/phút)** | **HSM tinh (m/phút)** |
|---|---|---|---|---|
| Thép 01.2 | 150 | <300 | >400 | <900 |
| Thép 02.1/2 | 330 | <200 | >250 | <600 |
| Thép 03.11 | 300 | <100 | >200 | <400 |
| Thép 03.11 | 390-480 | <80 | >150 | <350 |
| Thép 04 | 480-580 | <40 | >100 | <250 |
| GCl 08.1 | 180 | <300 | >500 | <3000 |
| Nhôm | 60-75 | <1000 | >2000 | <5000 |
| Non-Ferr | 100 | <300 | <1000 | <2000 |

### *1.1.3. Ứng dụng của gia công cao tốc*

Gia công cao tốc được chủ yếu trong các lĩnh vực công nghiệp chính như sau:

*a. Gia công linh kiện và thiết bị trong công nghiệp ô tô, y tế, máy tính, hàng không và vũ trụ.*

Trong các lĩnh vực này, hầu hết các linh kiện đều có vật liệu là hợp kim nhôm với các chi tiết dạng khung, sườn máy bay và các thiết bị nhẹ khác [56], [95] (hình 1.4) và hợp kim ti tan trong lĩnh vực hàng không, vũ trụ [40], [46], [52] (hình 1.5).

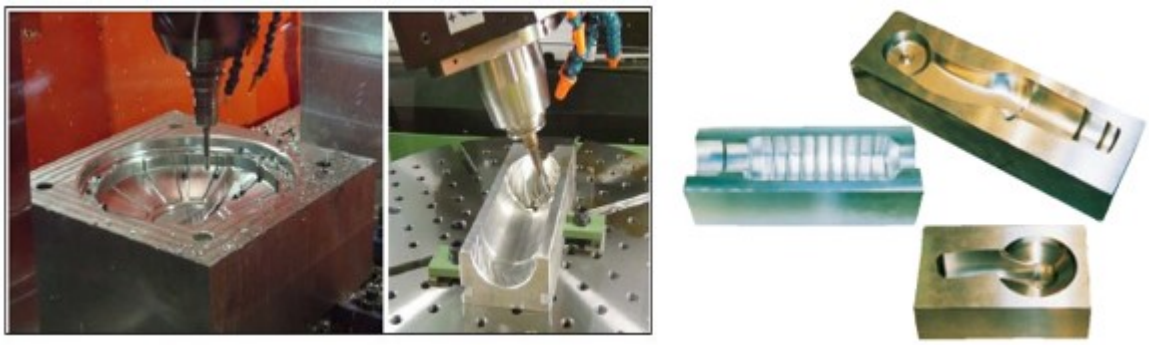


*Hình 1. 4.* Các chi tiết hàng không bằng hợp kim nhôm

*Hình 1. 5.* Động cơ hàng không làm bằng hợp kim titan

*b. Công nghiệp chế tạo khuôn mẫu*

Gia công khuôn mẫu là một trong những công việc điển hình của ngành cơ khí chế tạo. Gia công cao tốc có thể ứng dụng trong khuôn mẫu từ gia công thô, bán tinh và tinh đảm bảo tiết kiệm thời gian, độ chính xác rất cao, chất lượng bề mặt gia công cao đến mức có thể không cần gia công sửa nguội [62].



*Hình 1. 6.* Gia công khuôn mẫu cao tốc

Mặt khác, với các bộ khuôn đòi hỏi độ chính xác cao, nhà sản xuất thường phải nhiệt luyện phôi trước khi gia công nhằm làm tăng độ chính xác sau gia công. Gia công cao tốc là lựa chọn hàng đầu để đảm bảo duy trì được việc gia công khuôn có độ cứng cao (hình 1.6).

Ngoài các ứng dụng chính kể trên, gia công cao tốc còn được ứng dụng gia công ở nhiều khía cạnh khác như gia công các cực, điện cực có độ cứng rất cao hoặc thành rất mỏng dùng cho công nghệ gia công bằng tia lửa điện. Gia công các thiết bị y tế siêu nhỏ, siêu mỏng, các bộ phận máy tính, các loại cánh động cơ máy bay, tên lửa, tàu thủy…

### *1.1.4. Hạn chế của gia công cao tốc*

Gia công cao tốc cũng có những hạn chế nhất định. Vấn đề đầu tiên chính là hệ thống công nghệ với những yêu cầu cao về máy, dụng cụ cắt, hệ điều khiển, … Quá trình gia công bằng phương pháp này thì các chuyển động luôn có gia tốc lớn, việc tăng tốc và giảm tốc cũng như việc khởi động hay dừng các trục sẽ gây mòn cho các thanh dẫn hướng, các ổ trục, ổ bi…Chi phí cho việc sửa chữa, thay thế sẽ rất lớn. Yêu cầu cao về kiến thức lập trình, nắm bắt tính công nghệ khi gia công cao tốc. Quy trình công nghệ phải rất chuẩn. Vì là phương pháp gia công có thể áp dụng cho nhiều loại vật liệu khác nhau, độ cứng khác nhau với nhiều dải thông số khác nhau nên cần có rất nhiều thử nghiệm để đảm bảo tính công nghệ khi khai thác công nghệ gia công cao tốc. Đặc biệt, do đây là loại hình gia công ở tốc độ rất cao nên khi đã xuất hiện lỗi dù phần cứng hay phần mềm đều gây nguy hại rất lớn.

## 1.2. Tổng quan nghiên cứu trong và ngoài nước về vấn đề cần quan tâm của luận án.

Như đã trình bày ở Phần mở đầu, vấn đề quan tâm nghiên cứu của luận án được tập trung chủ yếu vào năng lượng tiêu thụ khi phay thô cao tốc thép hợp kim cứng, độ chính xác kích thước, độ nhám bề mặt khi gia công tinh thép hợp kim cứng. Xây dựng mô hình toán học mô tả mối quan hệ giữa các thông số

công nghệ với các yếu tố nêu trên là nhiệm vụ quan trọng hàng đầu. Tối ưu hóa các thông số công nghệ đối với các hàm mục tiêu dựa trên mô hình toán học là mục tiêu cuối cùng của luận án. Tuy nhiên, trước hết ta cần xem xét tổng quan các công trình nghiên cứu về công nghệ gia công cao tốc **hợp kim cứng** trong và ngoài nước nhằm xác định rõ những nội dung đã, đang và sẽ tiếp tục được giải quyết.

Trong gia công cắt gọt kim loại, gia công vật liệu cứng nói chung và thép hợp kim cứng nói riêng luôn là vấn đề khó khăn, phức tạp bởi các hiện tượng vật lý của quá trình cắt cũng như yêu cầu gia công có nhiều khác biệt so với gia công cao tốc nhôm, hợp kim độ cứng thấp và trung bình (dưới 30HRC) hay gia công thông thường. Tuy nhiên, trên thực tế, nếu chúng ta nắm được những đặc điểm cơ bản và giải quyết các vấn đề một cách chính xác thì quá trình gia công cao tốc hợp kim cứng sẽ trở thành một quy trình có thể dự đoán được. Lúc này, vấn đề gia công cắt gọt vật liệu cứng sẽ trở nên thuận lợi hơn mà mang lại lợi nhuận cao về kinh tế.

Dễ nhận thấy, các loại hợp kim như hợp kim của Titan, thép hợp kim sau nhiệt luyện (độ cứng trên 40HRC) là các loại vật liệu khó cắt do có độ cứng cao, độ bền nhiệt cao, khả năng chống mài mòn hóa học cao. Nhiệt độ và ứng suất luôn cao tại vùng cắt trong quá trình gia công do dẫn nhiệt kém, gây ảnh hưởng đến mòn dao và hình thái phoi gia công, tăng chi phí gia công. Nói cách khác, khi đề cập đến vấn đề gia công cao tốc hợp kim cứng, ta thường quan tâm đến khả năng gia công chúng. Khả năng gia công (machinability) thể hiện mức độ dễ dàng của vật liệu được cắt gọt theo kết cấu được yêu cầu. Các yếu tố như lực cắt, nhiệt cắt, rung động, chất lượng bề mặt, mòn dao, năng lượng hao phí đều ảnh hưởng đến tính hoàn thiện của kết cấu nên có thể được coi là cơ sở để đánh giá khả năng gia công [23]. Quá trình gia công cao tốc hợp kim nhôm và hợp kim độ cứng thấp đã được rất nhiều công trình nghiên cứu xem xét và đề

cập bao gồm lực cắt, nhiệt cắt, rung động, độ nhám bề mặt, mòn dao, … Những công trình này được liệt kê và mô tả cụ thể trong các công trình như [7], [8], [9]. Tuy nhiên, gia công cao tốc hợp kim có độ cứng cao thì chưa có nhiều công trình tập trung nghiên cứu. Phần dưới đây đề cập một số công trình điển hình nghiên cứu về vấn đề nêu trên.

### *1.2.1. Các nghiên cứu trong nước*

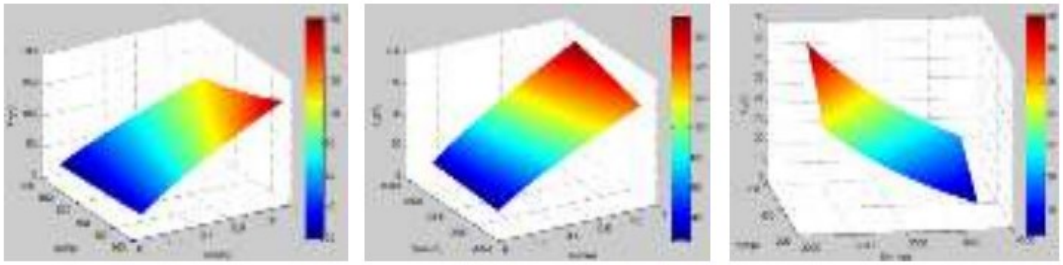
Các công trình nghiên cứu trong nước chủ yếu tập trung vào phân tích, đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới lực cắt, độ nhám bề mặt, mòn dao, rung động, hình thái phoi. Điển hình là các nghiên cứu trong [7], [8], [9].

Công trình [7] nghiên cứu tối ưu hóa các thông số công nghệ khi phay cao tốc thép C45 **chưa nhiệt luyện (16-24HRC)** thông qua xây dựng các hàm mục tiêu độ nhám bề mặt. Các mô hình toán học đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới lực cắt, rung động và lượng mòn dụng cụ cũng được xác định. Cụ thể: tác giả đã phân tích rõ mô hình tính toán lực cắt khi phay cao tốc bằng dao phay liền khối, vấn đề ổn định rung động, các dạng mòn và chỉ tiêu mòn dụng cụ. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm đã cho phép xây dựng được mô hình toán học mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ (vận tốc cắt $v$, tốc độ chạy dao $f$ và chiều sâu cắt $a_p$) tới lực cắt, độ nhám bề mặt, rung động và mòn dao. Kết quả thực nghiệm với lực cắt theo các phương $X(F_x)$, $Y(F_y)$, $Z(F_z)$ và tổng hợp $XY(F_{xy})$ (hình 1.6):

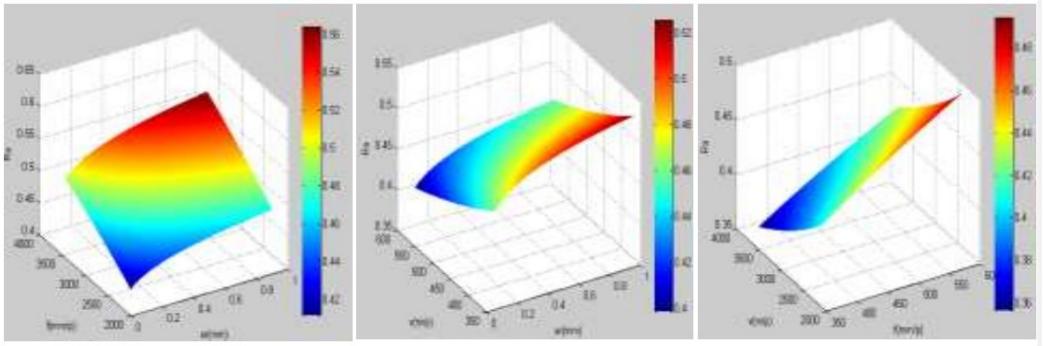
$$\begin{cases} F_x = 1791 v^{-0.5533} f^{0.2389} a_p^{0.5346}; F_y = 2163 v^{-0.5279} f^{0.2678} a_p^{0.5260} \\ F_y = 639 v^{-0.8292} f^{0.4368} a_p^{0.7617}; F_{xy} = 2735.2 v^{-0.545} f^{0.2608} a_p^{0.5277} \end{cases} \quad (1.1)$$

Dựa trên kết quả đánh giá của tác giả, chiều sâu cắt ảnh hưởng nhiều nhất tới lực cắt. Kết quả thực nghiệm với độ nhám bề mặt $R_a$ (hình 1.7):

$$R_a = 0.1441 v^{-0.3023} f^{0.3824} a_p^{0.0572} \quad (1.2)$$



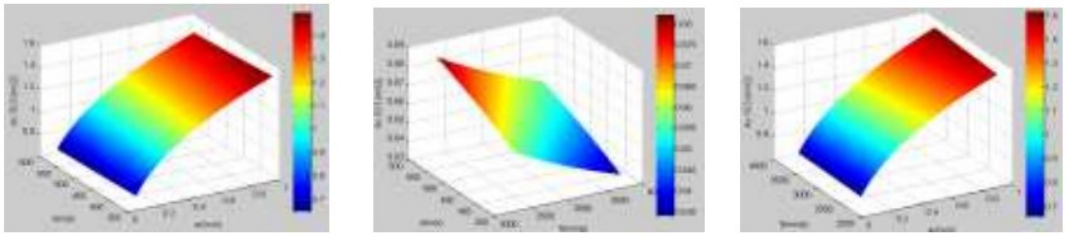
*Hình 1. 7. Đồ thị mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ $v, f, a_r$ tới lực $F_x$ [8]*



*Hình 1. 8. Đồ thị mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ $v, f, a_p$ tới độ nhám bề mặt [8]*

Tác giả đánh giá, vận tốc cắt ảnh hưởng nhiều nhất đến độ nhám bề mặt. Kết quả thực nghiệm với rung động theo các phương $X(A_x)$, $Y(A_y)$ và tổng hợp $XY(A_{xy})$ (hình 1.9):

$$\begin{cases} A_x = 1.316 v^{-0.0793} f^{0.0741} a_p^{0.3469} \\ A_y = 1.57 v^{-0.0742} f^{0.1058} a_p^{0.3606} \\ A_{xy} = 1.653 v^{-0.0766} f^{0.0911} a_p^{0.3542} \end{cases} \quad (1.3)$$



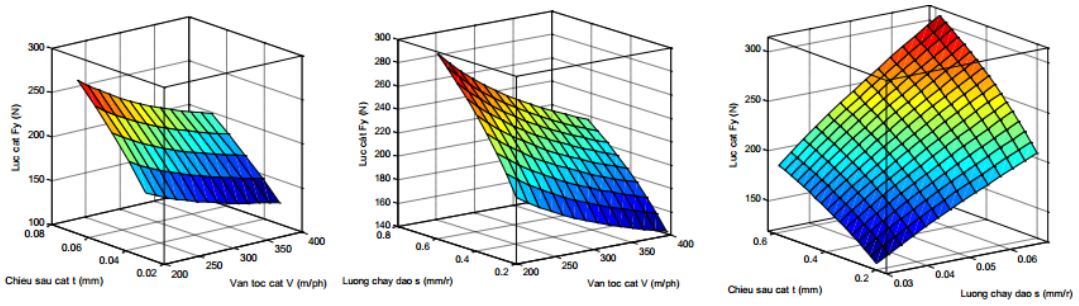
*Hình 1. 9. Đồ thị mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ $v, f, a_p$ tới rung động theo phương X [8]*

Theo đó, chiều sâu cắt ảnh hưởng nhiều nhất tới rung động. Kết quả thực nghiệm với lượng mòn mặt dao $VB$ với thời gian $\tau$:

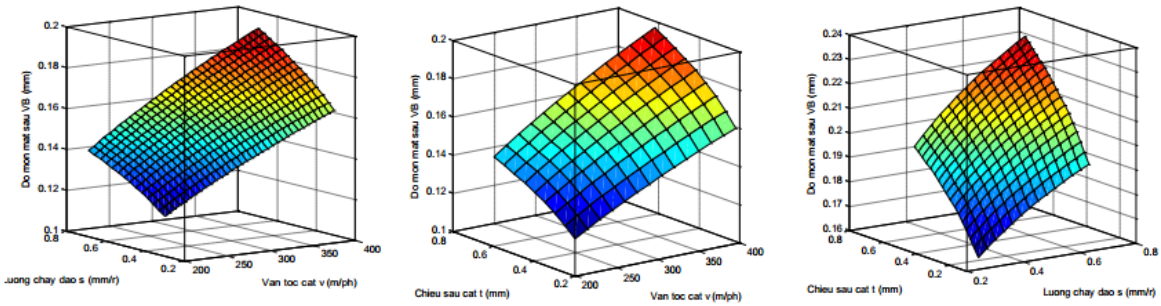
$$VB = 0.0174 v^{0.6205} f^{0.2409} a_p^{0.0823} \tau^{1.3876} \quad (1.4)$$

Tác giả kết luận rằng vận tốc cắt và tốc độ chạy dao ảnh hưởng nhiều nhất đến lượng mòn mặt dao. Bài toán tối ưu hóa được tác giả lựa chọn là tối ưu hóa độ nhám bề mặt bằng thuật toán tối ưu bầy đàn (PSO). Kết quả tối ưu cho phép xác định độ nhám nhỏ nhất với các điều kiện biên cho trước vào khoảng độ nhám cấp 8, cấp 9 và bộ thông số công nghệ tương ứng.

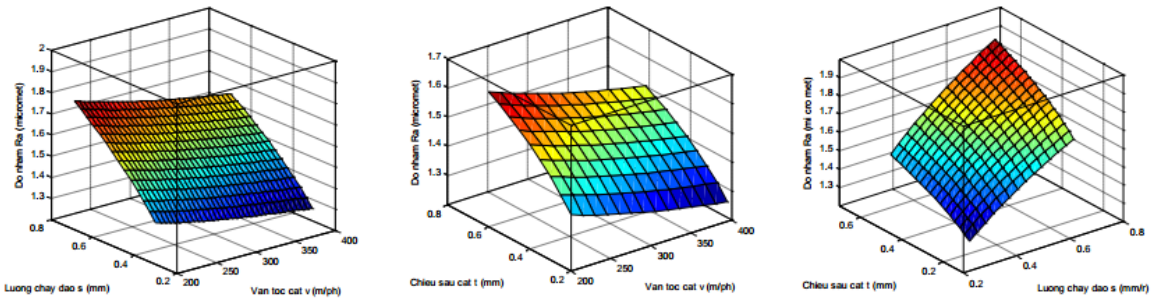
Công trình [8] nghiên cứu ảnh hưởng các thông số công nghệ tới lực cắt, mòn dao và độ nhám bề mặt khi phay cao tốc bề mặt vật liệu khuôn SKD11 nhưng chưa qua nhiệt luyện. Theo đó, tác giả phân tích chi tiết các vấn đề về lực cắt, mài mòn, độ nhám bề mặt, nhiệt cắt, rung động xảy ra trong quá trình phay cao tốc khuôn. Kết quả nghiên cứu thực nghiệm tương tự như công trình [8] với các phương trình toán học mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới lực cắt (hình 1.10), độ mòn dụng cụ (hình 1.11), độ nhám bề mặt (hình 1.12) với dao phay ngón và dao phay cầu. Theo kết quả nghiên cứu, thành phần lực $F_y$ có giá trị lớn nhất, tốc độ chạy dao ảnh hưởng nhiều đến lực cắt; các thông số công nghệ tăng thì độ mòn tăng; tốc độ chạy dao và chiều sâu cắt ảnh hưởng nhiều nhất đến độ nhám.




*Hình 1. 10. Đồ thị mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ $v, f, a_p$ tới lực $F_y$ với dao phay ngón [9]*




*Hình 1. 11. Đồ thị mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ $v, f, a_p$ tới độ mòn dụng cụ với dao phay ngón [9]*




*Hình 1. 12. Đồ thị mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ $v, f, a_p$ tới độ mòn dụng cụ với dao phay cầu [9]*

Công trình [9] nghiên cứu quá trình tạo phoi khi phay cao tốc hợp kim nhôm Al6061 thông qua xây dựng mô hình toán học mô tả ảnh hưởng của chế độ cắt tới lực cắt, độ nhám, rung động, vết tiếp xúc giữa dao và phoi, hệ số co rút phoi. Tương tự như công trình [7] và [8], tác giả phân tích, mô hình hóa quá trình tạo phoi, lực cắt, rung động và ổn định rung động khi phay cao tốc hợp kim nhôm. Điểm khác biệt nổi bật là nghiên cứu quá trình tạo phoi và đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới hệ số co rút phoi.

Dễ thấy, về cơ bản các công trình nghiên cứu đề cập đến gia công phay cao tốc cho vật liệu hợp kim có độ cứng thấp, đánh giá sự ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới lực cắt, rung động, độ nhám, lượng mòn dao là chủ yếu. Chưa có công trình đề cập đến vấn đề về năng lượng hao phí, độ chính xác kích thước, tuổi bền dụng cụ cắt khi gia công phay cao tốc hợp kim cứng.

### *1.2.2. Các nghiên cứu ngoài nước*

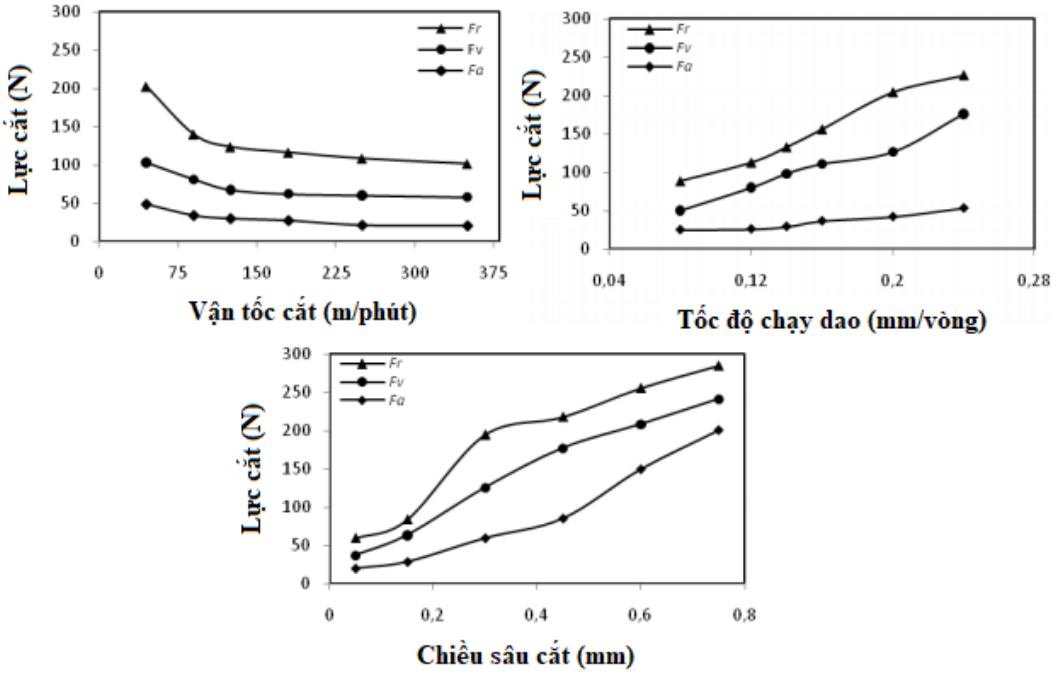
Vấn đề gia công cao tốc hợp kim cứng đã được quan tâm nghiên cứu trên thế giới từ nhiều năm. Tuy nhiên, do giới hạn về công nghệ sản xuất máy, dụng cụ cắt và các trang thiết bị đo mà các công bố về vấn đề này chưa có nhiều. Dưới đây là một số công trình điển hình.

*a. Lực cắt*

Lực cắt là một yếu tố rất quan trọng trong quá trình gia công. Lực ảnh hưởng nhiều đến nhu cầu năng lượng cung cấp, máy, dụng cụ cắt, nhiệt cắt và rung động. Không những thế, xác định được lực cắt thì có thể đánh giá ảnh hưởng của nó tới khả năng gia công cắt gọt, quá trình hình thành phoi và chất lượng bề mặt của sản phẩm. Mô hình tính toán lực cắt khi phay cao tốc đã được rất nhiều công trình đề cập và nghiên cứu như trong [13], [18], [54], [95] và được mô tả lại trong các công trình [7], [8], [9]. Tuy nhiên, các công trình gia công cao tốc hợp kim cứng thì chưa được đề cập đến. Một số công trình nghiên cứu điển hình về lực cắt khi gia công cao tốc hợp kim cứng có thể xem xét như dưới đây [37], [50], [62], [78].

Nghiên cứu của Ozel [37] khi gia công tinh cao tốc đối với thép hợp kim AISI H13 (50-55 HRC) cho thấy, lực cắt không chỉ bị ảnh hưởng của các thông số công nghệ mà còn bị ảnh hưởng bởi hình dáng hình học của dụng cụ cắt và độ cứng của phôi. Lawani [50] thực nghiệm gia công tinh cao tốc thép hợp kim MDN 250 (50HRC) thì cho kết quả rằng, tốc độ cắt ảnh hưởng không nhiều đến lực cắt mà chiều sâu cắt mới là yếu tố ảnh hưởng đáng kể nhất (tới 89%) trong mô hình lực cắt. Các kết quả thực nghiệm trong [58] khi gia công tiện cao tốc thép hợp kim AISI H11 (40-50HRC) với dụng cụ cắt phủ CBN thì lực cắt bị ảnh hưởng chủ yếu bởi chiều sâu cắt và độ cứng của phôi (hình 1.13). Zhao [62] thực nghiệm gia công cao tốc khuôn mẫu với vật liệu P20 (3Cr2Mo) (35HRC) thì cho kết quả rằng, với đường kính dao nhỏ (D8mm) thì ảnh hưởng

của tốc độ chạy dao đến lực cắt là không rõ ràng. Theo nghiên cứu của Pawade [66] khi gia công cao tốc hợp kim cứng Inconel 718 (36HRC), trong các thông số công nghệ thì lực cắt chịu ảnh hưởng nhiều nhất bởi tốc độ chạy dao. Fang [78] so sánh gia công cao tốc hai loại vật liệu cứng là hợp kim Ti6Al4V (36HRC) và Inconel 718 (36HRC). Kết quả cho thấy, khi tốc độ cắt tăng thì các thành phần của lực cắt đều tăng. Với cùng điều kiện gia công thì lực cắt khi gia công Inconel 718 cao hơn. Mòn cạnh dao không làm tăng đáng kể lực cắt.



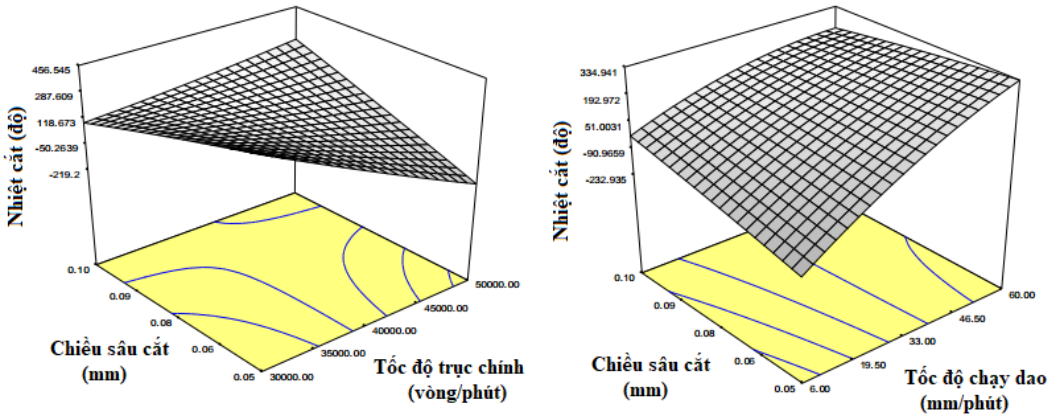

*Hình 1. 13. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới lực cắt [58]*

*b. Nhiệt cắt*

Khi quá trình cắt gọt bắt đầu thì biến dạng dẻo của vật liệu cắt sẽ xuất hiện và sinh nhiệt vùng cắt. Gần như có thể giả thiết rằng toàn bộ năng lượng cắt cần thiết được chuyển thành nhiệt. Sự sinh nhiệt trong quá trình gia công sẽ làm tăng dần nhiệt độ tại vùng cắt. Nhiệt cắt có ảnh hưởng tới độ bền, độ cứng, độ chống mòn, tuổi bền dao và gây ảnh hưởng đến việc kiểm soát độ chính xác kích thước gia công, độ nhám bề mặt. Một số nghiên cứu điển hình về nhiệt cắt

khi gia công cao tốc cũng được trình bày trong [7], [8], [9], còn về gia công cao tốc hợp kim cứng có thể xem xét trong [26], [33], [39], [41], [49], [99]. Cụ thể:

Ueda [26] nghiên cứu thực nghiệm để đánh giá nhiệt cắt trên dụng cụ cắt khi phay cao tốc hợp kim thép AISI 1045. Kết quả cho thấy chiều sâu cắt và tốc độ cắt ảnh hưởng nhiều đến nhiệt cắt trên dụng cụ cắt hơn tốc độ chạy dao trong điều kiện thí nghiệm. Ảnh hưởng của tốc độ cắt là cao nhất. Ren [33] xác định nhiệt cắt trong quá trình biến cứng vật liệu khi gia công cao tốc hợp kim Ti (41HRC) bằng dụng cụ cắt phủ PCBN. Kết quả thể hiện rằng, nhiệt cắt tăng khi tốc độ cắt và tốc độ chạy dao tăng. Abukhshim [39] đã sử dụng phân tích phần tử hữu hạn để ước tính lượng nhiệt truyền vào dụng cụ cắt trong quá trình gia công cao tốc của thép hợp kim cường độ cao AISI 4140 bằng cách sử dụng dụng cụ cắt không lớp phủ. Kết quả cho thấy nhiệt độ tiếp xúc giữa dụng cụ cắt-phoi tăng lên cùng với sự gia tăng tốc độ cắt. Điều này được cho là nhiệt cắt đã truyền vào dụng cụ cắt. Rech [41] nghiên cứu đặc tính hóa học của lớp phủ TiN và N+MoS2 trên dụng cụ cắt khi gia công khô cao tốc thép hợp kim. Nghiên cứu cho thấy, các lớp phủ có tác dụng giảm tiếp xúc của dụng cụ, giảm độ dày của vùng cắt thứ cấp và giảm nhiệt khi gia công.




*Hình 1. 14. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới nhiệt cắt [99]*

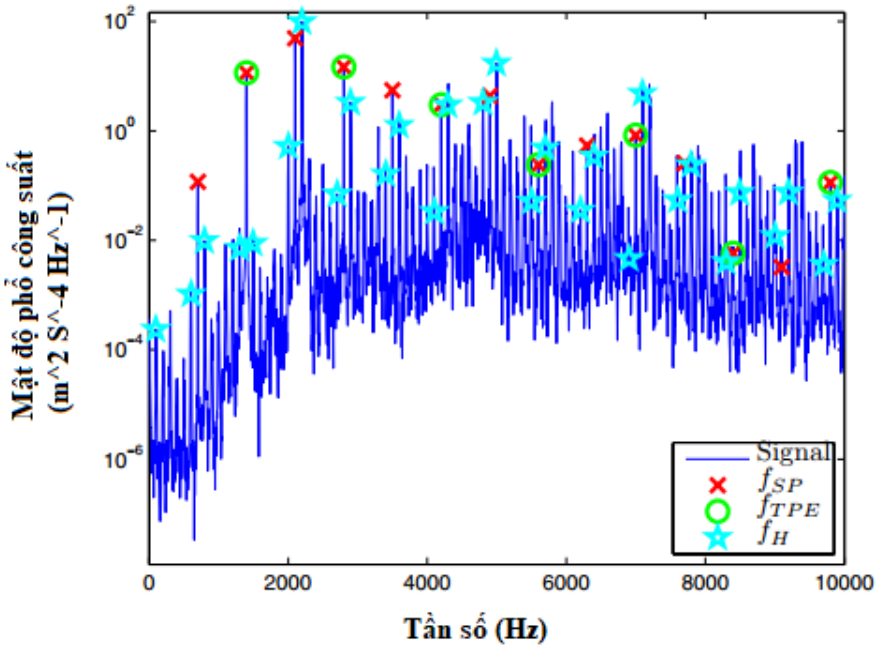
Iqbal [99] nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới nhiệt cắt khi phay cao tốc vật liệu SiC (vật liệu Ceramics) bằng dao phủ kim cương (hình

1.14). Kết quả chỉ ra, tất cả các thông số công nghệ đều ảnh hưởng tới nhiệt cắt. Khi tăng tốc độ cắt với độ sâu cắt lớn thì nhiệt tăng. Chiều sâu cắt nhỏ hơn thì nhiệt giảm. Tăng tốc độ chạy dao thì làm tăng nhiệt cắt ở mọi trường hợp. Kết hợp các điều kiện thì nghiên cứu chỉ ra, tăng tốc độ cắt, giảm đồng thời tốc độ chạy dao và chiều sâu cắt thì nhiệt cắt giảm.

*c. Rung động*

Rung động là một hiện tượng rất phổ biến trong gia công cắt gọt. Hiện tượng này ảnh hưởng lớn đến chất lượng sản phẩm (độ chính xác kích thước, độ nhám bề mặt) và hiệu quả kinh tế. Vấn đề này đặc biệt nghiêm trọng trong gia công cao tốc bởi nó hạn chế rất nhiều hiệu quả vốn là ưu điểm của loại hình gia công này. Đã có rất nhiều nghiên cứu chi tiết cả về lý thuyết và thực nghiệm về vấn đề này trong quá trình gia công cao tốc, điển hình như [31], [59], [101], [108], [115].

Inspeger [31] thực hiện phân tích và thử nghiệm rung động trong quá trình phay. Một số tần số được xác định do quá trình trục chính quay không ổn định. Các biểu đồ ổn định của mô hình cơ học phay cao tốc cũng được xây dựng và thử nghiệm. Dijk [59] đề xuất giải pháp kiểm soát chiến lược gia công nhằm điều chỉnh tốc độ cắt và tốc độ chạy dao để hạn chế ảnh hưởng của rung động. Tất nhiên, tác giả cũng phát triển thuật toán nhận biết ảnh hưởng của rung động dựa trên đánh giá bề mặt gia công trực tuyến (hình 1.15). Krishnakumar [101] theo dõi và phân tích rung động trong quá trình gia công cao tốc hợp kim cứng Ti6Al4V nhằm đánh giá tình trạng của dụng cụ cắt dựa trên thuật toán học máy (Machine Learning) và mạng nơ tron (ANN). Sekar [115] xây dựng phương trình vi phân mô tả yếu tố rung động trong quá trình phay cao tốc dựa trên phần mềm MATLAB trong thời gian thực. Kết quả nghiên cứu cho phép nghiên cứu mô hình hóa rung động với các hiệu ứng phi tuyến tính một cách dễ dàng với hai điều kiện cắt ổn định và không ổn định.



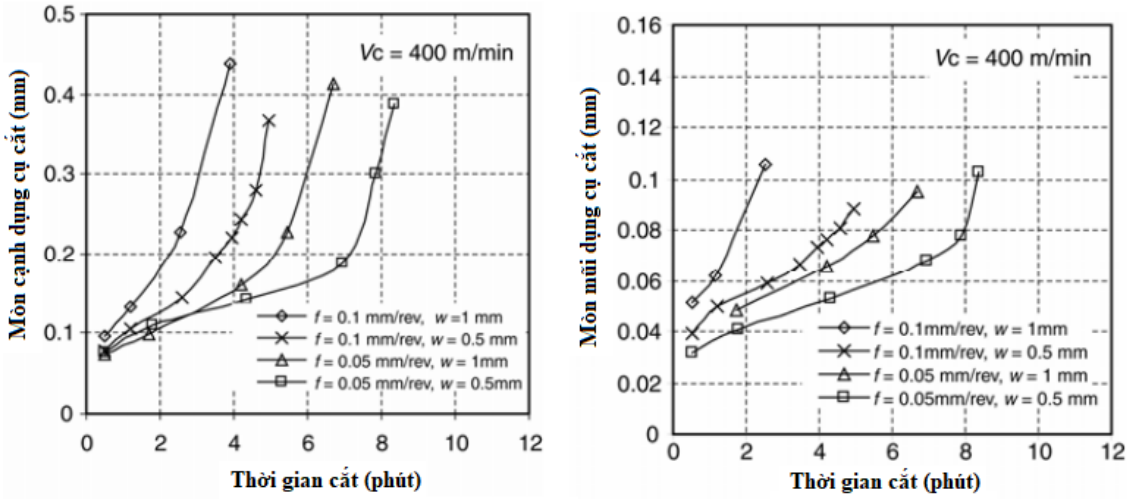

*Hình 1. 15. Mật độ phổ công suất tại ổ đỡ trục chính [59]*

*d. Mòn dụng cụ cắt và tuổi bền dụng cụ cắt*

Dự đoán và kiểm soát mòn dụng cụ cắt là một trong những vấn đề rất quan trọng của nhà sản xuất trong gia công cắt gọt. Tuổi bền dao luôn bị giới hạn bởi một loạt các yếu tố mòn dụng cụ. Tuổi bền của một dụng cụ cắt có thể được xác định từ khi bắt đầu được sử dụng gia công cắt gọt cho đến khi dụng cụ đó không còn đảm bảo yêu cầu cắt gọt đề ra. Một số công trình đã đề cập và nghiên cứu đến vấn đề này [21], [29], [51], [58], [60], [63], [71], [77], [83].

Mafoudi [51] nghiên cứu hao mòn dụng cụ cắt khi gia công cao tốc hợp kim cứng bằng dao phủ PCBN (hình 1.16). Tác giả đề xuất phương án thay đổi hình dáng hình học của dao để giảm hiện tượng mòn khốc liệt trên đường cong mòn. Senthikumar [60] nghiên cứu thực nghiệm về nhám bề mặt và hiện tượng mòn dao khi gia công tiện cao tốc Inconel 718. Kết quả cho thấy tốc độ cắt và chiều sâu cắt ảnh hưởng lớn đến mòn dao. Để xác định tuổi bền của dao Honghua [71] và các cộng sự đã nghiên cứu tuổi bền dao làm từ vật liệu PCD/PCBN khi phay cao tốc Titan TA15. Kết quả cho thấy tuổi bền của dao PCD dài hơn tuổi bền của dao PCBN ở cùng điều kiện cắt. Nghiên cứu cũng

chỉ ra mài mòn dụng cụ cắt ở tốc độ cao là do khuếch tán một phần vật liệu phôi trên mặt trước của dao. Quá trình oxy hóa mòn xảy ra trong vùng tiếp xúc của dao và phôi.



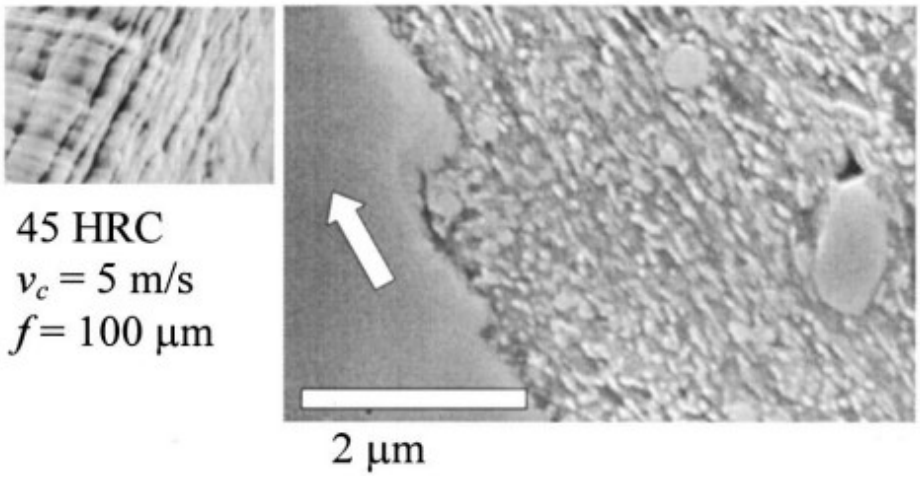

*Hình 1. 16. Đánh giá mòn dao theo vận tốc cắt và thời gian gia công [51]*

Một nghiên cứu khác về tuổi bền và cơ chế mài mòn khi gia công cao tốc hợp kim Ti-6Al-4V bằng dụng cụ PCD dưới áp suất của dung dịch làm mát của tác giả Silva [77] và các cộng sự. Nghiên cứu kết luận rằng áp suất làm mát cao phù hợp với tốc độ cắt thấp, còn khi gia công cao tốc thì không có sự khác biệt nhiều xảy ra. Mũi dao là nơi bị mài mòn chính khi gia công Ti-6Al-4V với dao PCD sử dụng làm mát thông thường và làm mát áp suất cao. Lực cắt và cơ chế mài mòn dụng cụ cắt được nhóm tác giả Tian [83] nghiên cứu cho vật liệu Inconel 718 với vật liệu dao làm bằng gốm Sialon. Nghiên cứu chỉ ra cơ chế phá hủy của dao cũng thay đổi theo tốc độ cắt. Với tốc độ cắt cao trên 1000 m/phút thì dụng cụ cắt bằng gốm Sialon không phù hợp, sự mài mòn làm chất lượng bề mặt xấu đi và giảm tuổi bền dụng cụ. Các tác giả cũng kết luận rằng với điều kiện cắt khô, ma sát cắt là rất lớn và dụng cụ cắt bằng gốm sẽ bị mòn nhanh điều này không thật sự phù hợp khi phay cao tốc với Iconel 718.

*e. Sự hình thành phoi cắt*

Gia công cắt gọt là quá trình cắt bỏ một lượng vật liệu nhất định để tạo hình thành chi tiết theo yêu cầu. Lượng vật liệu cắt đi được gọi là phoi. Phoi có các dạng chủ yếu như phoi vụn, phoi dây tùy thuộc vào vật liệu cắt và thông số cắt. Nghiên cứu sự hình thành phoi cho phép dự đoán được quá trình cắt gọt, độ bền, độ nhám bề mặt, mòn dao, tuổi bền và năng lượng cắt gọt. Một số công trình nghiên cứu về phoi khi gia công cao tốc hợp kim cứng có thể xem xét dưới đây [21], [27], [95], [88].

Barry [27] nghiên cứu cơ chế tạo phoi khi gia công cao tốc thép cứng (40-65HRC) (hình 1.17).

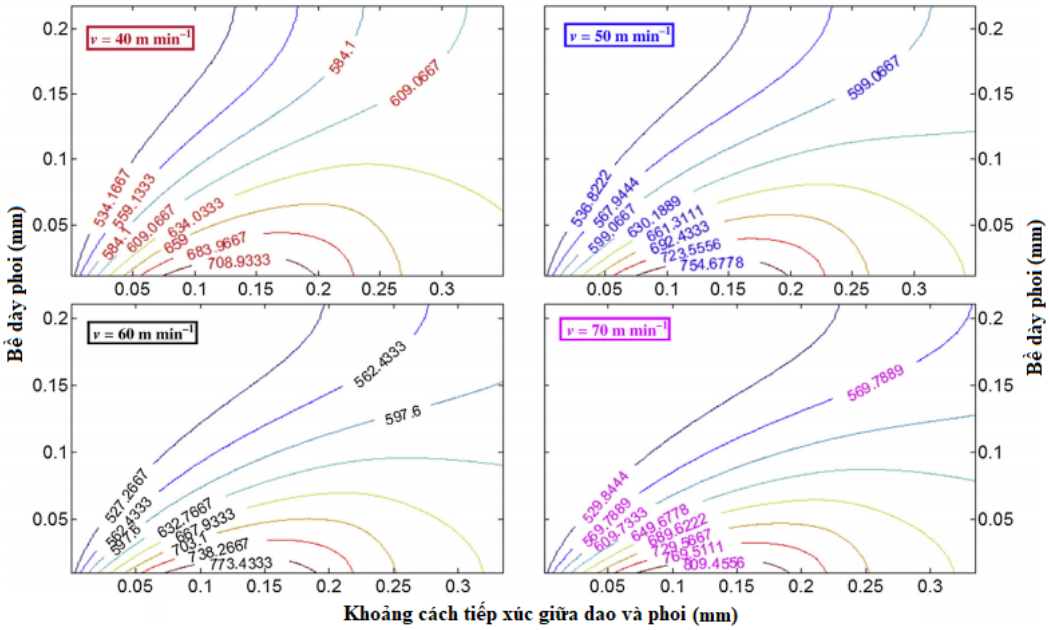



*Hình 1. 17. Kích thước và hướng co rút phoi dạng răng cưa [27]*

Nghiên cứu cho thấy việc chuyển từ phoi dây sang phoi phân đoạn xảy ra từ từ và giảm liên tục tỷ lệ chiều dày trung bình của phoi (tương đương với sự gia tăng chiều dài của phoi). Nghiên cứu cũng đã xác định hệ số co rút phoi (tỷ lệ độ dày phoi) được định nghĩa là bằng chiều rộng của phoi chia cho chiều rộng lớp kim loại chưa cắt. Wang [95] nghiên cứu cơ chế hình thành phoi và sự thay đổi hình thái của phoi trong quá trình phay cao tốc thép SKD11 có độ cứng cao (51-62HRC) (hình 1.18).

Nghiên cứu cho thấy rằng gia công các vật liệu có độ cứng khác nhau có thể xác định được vùng hình thành phoi dây thông qua việc tối ưu tốc độ cắt, lượng

chạy dao và chiều sâu cắt. Cui [88] cùng các cộng sự đã nghiên cứu về quá trình hình thành phoi và độ nhám bề mặt khi phay mặt phẳng thép AISI H13, nghiên cứu chỉ ra khi tốc độ cắt vượt quá 1400 m/phút lúc này phoi hình thành có dạng từng dải ngắn và màu của phoi chuyển sang màu vàng, cũng ở tốc độ cắt này độ nhám bề mặt sẽ trở nên xấu hơn vì ở tốc độ cắt cao tốc độ mòn của dụng cụ cũng tăng nhanh; điều đó làm ảnh hưởng xấu đến chất lượng của chi tiết gia công.




*Hình 1. 18. Mối quan hệ giữa độ dày phoi với nhiệt cắt và vận tốc cắt [95]*

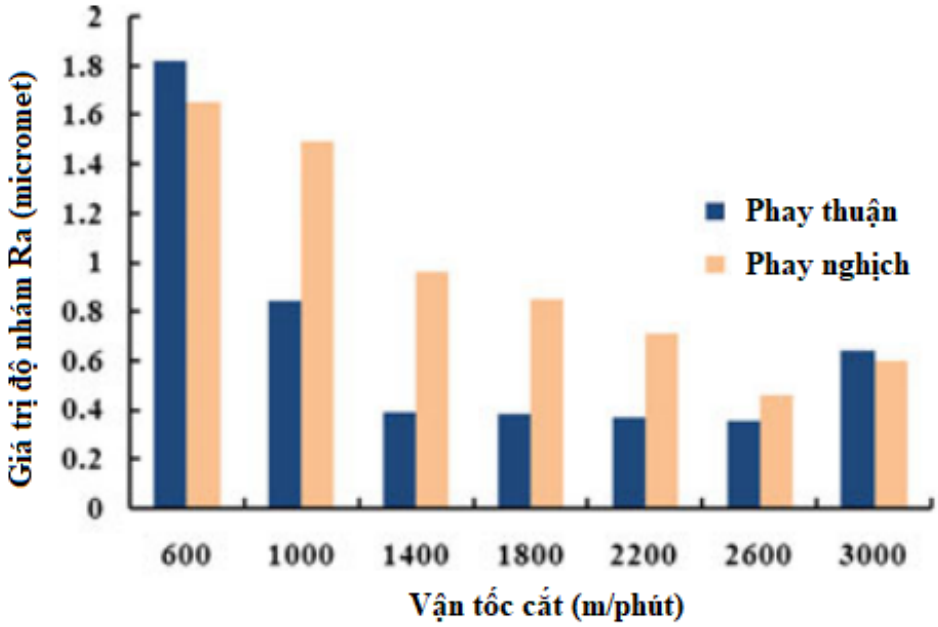
*f. Độ nhám bề mặt*

Độ nhám bề mặt là một trong những yếu tố quan trọng nhất để đánh giá chất lượng gia công bởi nó là kết quả thể hiện rõ nhất ảnh hưởng của các yếu tố về lực cắt, nhiệt cắt, rung động, mòn dụng cụ cắt. Hơn thế nữa, độ nhám bề mặt liên quan trực tiếp đến điều kiện làm việc, độ bền, độ chống mài mòn, ăn mòn hóa học, biến cứng bề mặt, … Chính vì vậy, độ nhám bề mặt là yếu tố được quan tâm trong hầu hết các công trình nghiên cứu về gia công cao tốc [7], [8], [9], [14], [15], [19], [21], [24], [25], [35], [38], [45], [81], [98], [106]. Nghiên cứu về độ nhám bề mặt trong gia công cao tốc **hợp kim cứng** thì điển

hình có một số công trình như [37], [48], [50], [51], [57], [58], [60], [66], [71], [83], [88].

Ozel [37] nghiên cứu lực cắt kết hợp với độ nhám bề mặt khi gia công tinh cao tốc đối với thép hợp kim AISI H13 (50-55 HRC). Độ cứng phôi, hình dáng hình học dụng cụ cắt, tốc độ cắt và tốc độ chạy dao ảnh hưởng trực tiếp đến độ nhám bề mặt. Lawani [50] thực nghiệm gia công tinh cao tốc thép hợp kim MDN 250 (50HRC) thì cho kết quả rằng, tốc độ chạy dao ảnh hưởng nhiều đến độ nhám bề mặt theo một mô hình phi tuyến bậc 2. Yếu tố vận tốc cắt ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt ít hơn tốc độ chạy dao. Mafoudi [51] nghiên cứu hao mòn dụng cụ cắt và độ nhám bề mặt khi gia công cao tốc hợp kim cứng AISI 4140 (50HRC) bằng dao phủ PCBN. Kết quả thực nghiệm cho thấy độ nhám bề mặt tốt nhất khi tốc độ cắt ở vào 300-400 (m/phút), tốc độ chạy dao 0.05 (mm/vòng), bề rộng cắt 0.5 (mm), tác giả không đề cập đến chiều sâu cắt. Aouici [58] nghiên cứu gia công cao tốc thép hợp kim AISI H11 (50HRC) với dụng cụ cắt phủ CBN thì khẳng định tốc độ cắt ảnh hưởng nhiều nhất đến độ nhám bề mặt. Senthikumar [60] nghiên cứu thực nghiệm về nhám bề mặt và hiện tượng mòn dao khi gia công tiện cao tốc Inconel 718. Tốc độ cắt là yếu tố ảnh hưởng lớn nhất đến độ nhám bề mặt. Padawe [66] sử dụng phương pháp thực nghiệm Taguchi để nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới lực cắt và độ nhám bề mặt khi gia công cao tốc hợp kim Inconel 718. Kết quả của nghiên cứu chỉ ra rằng, tốc độ chạy dao có ảnh hưởng mạnh mẽ nhất tới độ nhám bề mặt. Tian [83] nghiên cứu lực cắt, mài mòn và độ nhám khi gia công cao tốc cho vật liệu Inconel 718 với vật liệu dao làm bằng gốm Sialon. Nghiên cứu khẳng định phay thuận cho độ nhám bề mặt cao hơn khi phay nghịch (hình 1.19). Cui [88] cùng các cộng sự đã nghiên cứu về quá trình hình thành phoi và độ nhám bề mặt khi phay mặt phẳng thép AISI H13, nghiên cứu chỉ ra khi tốc

độ cắt vượt quá 1400 m/phút thì độ nhám bề mặt ban đầu sẽ trở nên kém đi sau đó tăng dần cùng với sự tăng của tốc độ cắt.



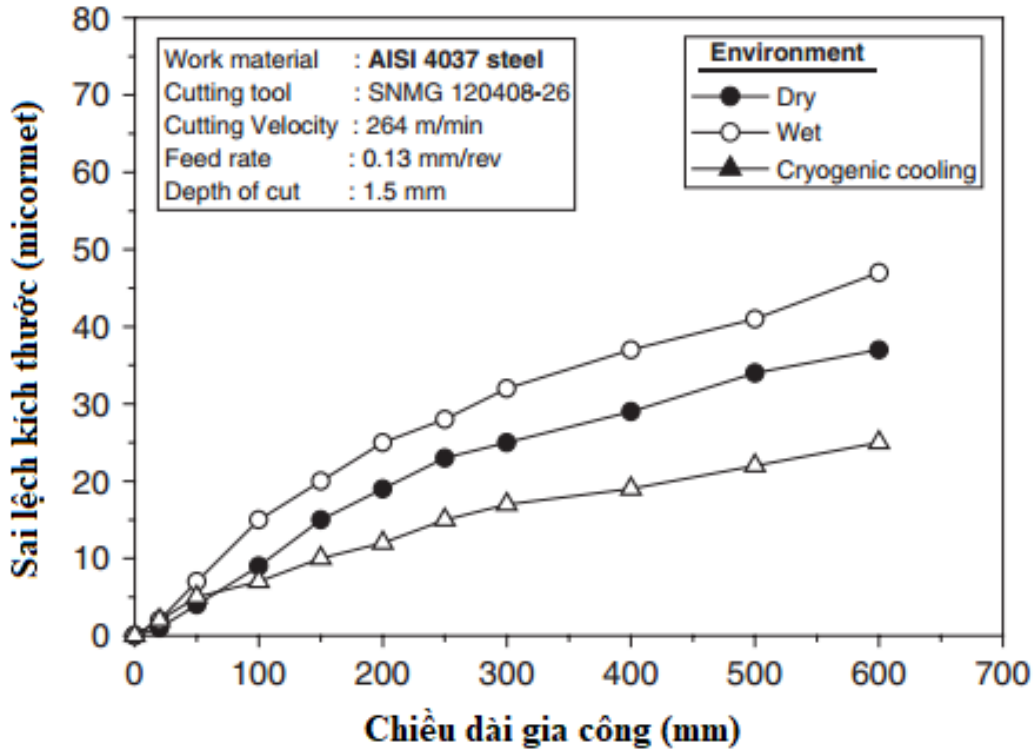

*Hình 1. 19. Giá trị độ nhám và vận tốc cắt [83]*

*g. Độ chính xác kích thước*

Độ chính xác kích thước là một chỉ tiêu chính trong độ chính xác gia công và là cơ sở đánh giá chất lượng sản phẩm. Yếu tố này liên quan trực tiếp đến khả năng lắp ghép trong hệ thống và ảnh hưởng tới điều kiện làm việc toàn hệ. Tuy nhiên, rất ít công trình nghiên cứu đề cập đến vấn đề này, chỉ có một số nghiên cứu điển hình như [12], [28], [32], [42], [44], [61], [113], [117] nhưng **Các nghiên cứu này không phải gia công cao tốc**.

Shouckry [12] nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ chính xác kích thước khi gia công tiện vật liệu nhôm thông qua thực nghiệm. Kết quả cho thấy khi tăng tốc độ cắt và giảm tốc độ chạy dao hoặc ngược lại thì độ chính xác kích thước đảm bảo. Độ chính xác kích thước cao nhất khi tốc độ cắt cao, chiều sâu cắt lớn và tốc độ chạy dao nhỏ. Dhar [28], [44] nghiên cứu vấn đề mòn dao, độ nhám bề mặt và độ chính xác kích thước khi gia công hợp kim AISI 4140 sử dụng dung dịch làm mát nhiệt độ thấp (hình 1.20). Kết

quả cho thấy, dung dịch làm mát dạng lạnh giúp mòn dao giảm, tuổi bền tăng, giảm đáng kể sai lệch kích thước. Risbood [32] nghiên cứu phương pháp đo và phân tích lực cắt, rung động trong quá trình tiện hợp kim thép để xác định độ nhám bề mặt và sai lệch kích thước dựa trên thuật toán Nơ ron. Schmitz [42] nghiên cứu các nguyên nhân gây ra sai lệch kích thước gồm có sai số hình học máy, nhiệt cắt, hệ điều khiển và lực cắt. Nghiên cứu kết luận lực cắt ảnh hưởng nhiều nhất đến sai lệch kích thước. Shahabi [61] xây dựng mô hình dự đoán độ nhám hình học và độ chính xác kích thước thông qua công nghệ chụp ảnh trong quá trình gia công cắt gọt. Các thông số có được do chụp ảnh được đưa vào môi trường mô phỏng, kết hợp các thông số công nghệ, tác giả có thể dự đoán được độ nhám và độ chính xác kích thước. Thực nghiệm kiểm chứng cho một số trường hợp khẳng định tính khả thi của phương pháp.




*Hình 1. 20. Sai lệch kích thước với các kiểu làm mát khác nhau [44]*

Dadgari [113] nghiên cứu chiến lược chạy dao tối ưu để đảm bảo độ chính xác kích thước khi gia công phay cao tốc các chi tiết rất nhỏ (vi gia công). Yousefi

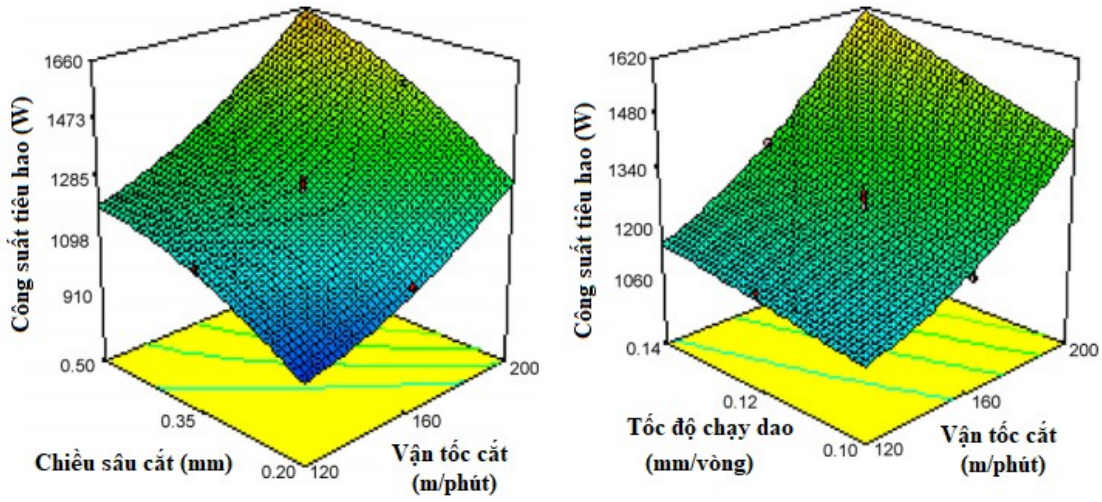
[117] nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ chính xác kích thước khi gia công tiện khô thép cứng AISI 4340. Tác giả kết luận, tốc độ cắt và bán kính mũi dao tiện phủ CBN ảnh hưởng nhiều nhất tới độ chính xác kích thước.

Có thể thấy rằng, vấn đề nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ chính xác kích thước khi gia công **phay tinh cao tốc hợp kim cứng** chưa có nhiều công trình nghiên cứu được công bố. Vì vậy, vấn đề này vẫn cần phải được quan tâm giải quyết.

*h. Năng lượng gia công*

Theo báo cáo lượng khí thải CO2 năm 2014 của cơ quan năng lượng Mỹ [90] thì 90% năng lượng tiêu tốn nằm ở sản xuất công nghiệp. Do đó, các ngành công nghiệp nói chung và lĩnh vực gia công sản xuất cơ khí nói riêng cần có trách nhiệm trong việc giảm tối đa việc tiêu thụ năng lượng. Nhiều nghiên cứu chỉ ra nếu tối ưu hóa được quy trình công nghệ trong các giai đoạn sản xuất thì có thể giảm tiêu tốn năng lượng từ 6% đến 40% so với hiện tại [55]. Trên thực tế, năng lượng hao phí chủ yếu nằm ở bước gia công thô, sự cân bằng giữa năng suất gia công và năng lượng tiêu tốn cần được xem xét. Ở bước gia công tinh, chất lượng sản phẩm là vấn đề cốt lõi. Một số công trình nghiên cứu về năng lượng tiêu tốn trong quá trình gia công được đề cập dưới đây [22], [47], [53], [64], [75], [76], [103], [105], [107]. **Các công trình này chưa đề cập đến vấn đề gia công cao tốc.**

Draganescu [22] thực nghiệm thống kê năng lượng tiêu thụ của máy gia công. Mô hình thống kê có giá trị đánh giá hiệu quả của quá trình gia công. Aggarwal [47] nghiên cứu mối quan hệ giữa các thông số công nghệ, môi trường cắt gọt và năng lượng hao phí khi gia công hợp kim thép AISI P20 (hình 1.21).




*Hình 1.21. Ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới công suất tiêu hao khi gia công tiện [47]*

Kết quả nghiên cứu thực nghiệm thống kê cho thấy, môi trường cắt gọt có ảnh hưởng lớn nhất đến năng lượng hao phí, sau đó là tốc độ cắt và chiều sâu cắt. Hơn nữa, hai kỹ thuật thực nghiệm thống kê được so sánh là kỹ thuật phản ứng bề mặt (RSM) và Taguchi. Anirban [53] đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ nhám bề mặt và năng lượng tiêu thụ khi gia công thép hợp kim AISI 1045 dựa vào kỹ thuật Taguchi và ANOVA. Diaz [64] nghiên cứu mức độ tiêu thụ năng lượng giữa các loại vật liệu khác nhau. Bhushan [75] nghiên cứu xác định các thông số công nghệ trong việc giảm thiểu năng lượng hao phí và tăng tuổi bền dụng cụ cắt khi gia công hợp kim Al và SiC. Calvanese [76] và Ampara [86] nghiên cứu về mức tiêu thụ năng lượng khi gia công phay hợp kim độ cứng thấp, có kể đến ảnh hưởng của chiến lược chạy dao. Sealy [103] nghiên cứu về năng lượng tiêu thụ khi gia công phay hợp kim cứng. He 2016 [105] thực nghiệm đánh giá năng lượng hao phí của cả quá trình gia công cắt gọt dưới sự ảnh hưởng của các thông số công nghệ. Franco [107] phân tích một mô hình tham số về năng lượng tiêu thụ khi gia công khoan vi mô.

Về cơ bản, các công trình nghiên cứu về năng lượng tiêu thụ trong quá trình cắt gọt nêu trên có đối tượng gia công là vật liệu có **độ cứng thấp**, phương

pháp gia công tiện, phay, khoan thông thường. Miền gia công cao tốc chưa được đề cập nhiều, đặc biệt là gia công cao tốc vật liệu có độ cứng cao.

### *1.2.3. Bài toán tối ưu trong gia công cao tốc*

Tối ưu hóa quá trình gia công cắt gọt là vấn đề luôn được đặt ra khi đã xây dựng được các mô hình toán học thể hiện mối quan hệ giữa các thông số công nghệ với các yếu tố xuất hiện trong quá trình gia công như lực cắt, mòn dao, nhiệt cắt, năng lượng hao phí, rung động hoặc các yếu tố nhằm đánh giá chất lượng sản phẩm trực tiếp như độ nhám bề mặt, độ chính xác kích thước hoặc tuổi bền dao, thời gian gia công.

Rất nhiều nghiên cứu về vấn đề tối ưu trong quá trình cắt gọt để tối ưu các yếu tố kể trên **nhưng chưa phải gia công cao tốc** như tối ưu lực cắt [66], [84]; tối ưu độ nhám bề mặt [7], [66], [69], [72], [73], [79], [80], [81], [84], [87], [102], [106], [116]; tối ưu năng lượng hao phí [47], [65], [69], [72], [73], [74], [75], [84], [87], [104], [110], [112], [114], [118]; tối ưu về mòn dụng cụ cắt [75]; tối ưu về tốc độ loại bỏ vật liệu [87], [102]. Các phương pháp gia công điển hình trong bài toán tối ưu chủ yếu gồm phay [73], [74], [80], [81], [82], [84], [87], [102], [104], [106], [112], [116], [118] và tiện [47], [65], [69], [72], [74], [75], [79], [110].

Về phương pháp thực nghiệm trong bài toán tối ưu, đa số ứng dụng phương pháp Taguchi [68], [69], [73], [79], [81], [82], [102], [106], [114]; phương pháp RSM [75], [104], [110], [116]; kết hợp Taguchi và RMS [47], [73], [114]; thuật toán di truyền (GA) [72], [87], [118]; thuật toán Nơ ron (NN) [80]; thuật toán Cuckoo [84]; thuật toán bầy đàn (PSO) [112].

Về vật liệu sử dụng trong các bài toán thực nghiệm và tối ưu, hợp kim thép được sử dụng nhiều hơn cả [65], [69], [72], [74], [79], [87], [104], [106], [112], [118]; hợp kim nhôm [75], [81], [82], [102], [116]; AISI [47], [110], [114]; Inconel [68].

Tuy nhiên, còn rất ít công trình công bố về bài toán tối ưu hóa về gia công cao tốc [66], [81], đặc biệt về gia công cao tốc hợp kim cứng.

### *1.2.4. Vấn đề gia công cao tốc vật liệu cứng và thép hợp kim SKD11*

Qua nghiên cứu các công trình đã công bố về gia công cao tốc cho vật liệu cứng như lực cắt [37], [50], [62], [78], nhiệt cắt [26], [33], [39], [41], [49], [99], rung động [31], [59], [101], [108], [115], mòn dụng cụ cắt [21], [29], [51], [58], [60], [63], [71], [77], [83], quá trình hình thành phoi cắt [21], [27], [95], [88], nhám bề mặt [37], [48], [50], [51], [57], [58], [60], [66], [71], [83], [88], ta có thể đưa ra một số nhận định như sau:

Trong nghiên cứu thực nghiệm về gia công cao tốc, phương pháp Taguchi và phân tích ANOVA là những công cụ rất hiệu quả để đánh giá về lực cắt, độ mòn của dụng cụ và độ nhám bề mặt.

Các nghiên cứu về lực cắt cho thấy, lực cắt không chỉ chịu ảnh hưởng của các thông số cắt mà chịu ảnh hưởng của hình dáng hình học dụng cụ cắt.

Tốc độ chạy dao và chiều sâu cắt là những yếu tố ảnh hưởng nhiều nhất đến ứng suất dư khi cắt. Cũng như tốc độ chạy dao, tốc độ cắt và chiều sâu cắt thì độ cứng của vật liệu cũng là yếu tố ảnh hưởng mạnh đến độ nhám bề mặt.

Tốc độ cắt là yếu tố ảnh hưởng nhiều nhất đến nhiệt cắt, đặc biệt là trong phạm vi tốc độ cắt cao.

Độ mòn cạnh và rãnh của dụng cụ cắt là yếu tố chi phối chính của độ mòn dụng cụ. Khi tốc độ cắt tăng thì tuổi thọ của dao giảm. Dụng cụ cắt CBN/TiC có tuổi thọ dài hơn các loại dụng cụ cắt khác.

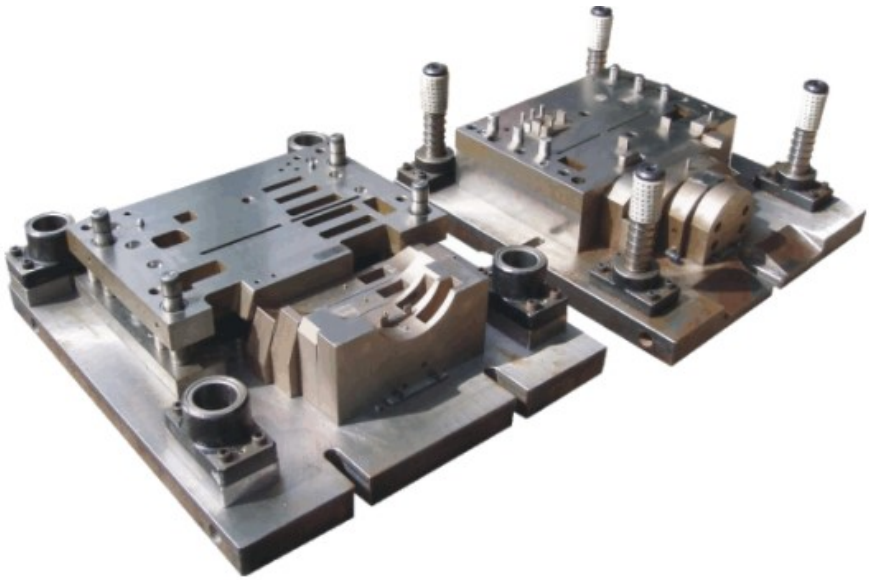
Các phoi răng cưa luôn được hình thành trong quá trình gia công thép cứng. Độ mòn của dụng cụ cắt và lực cắt là những yếu tố ảnh hưởng lớn đến hình thái phoi.

Các hiện tượng phức tạp liên quan đến gia công tốc độ cao có thể được nghiên cứu thông qua mô phỏng và mô hình hóa bằng các kỹ thuật như FEM,

ANN, v.v. và kết quả của mô hình có thể được xác nhận bằng các kết quả thực nghiệm.

Thông tin về các đánh giá này có ý nghĩa quan trọng trong quá trình gia công cao tốc vật liệu cứng nói chung và thép hợp kim cứng nói riêng.

Hiện nay trên thị trường có rất nhiều các loại mác thép khác nhau và phục vụ cho mục đích công việc khác nhau. Thép SKD11 cũng là một trong số đó. Tuy nhiên, loại thép thực sự trở nên phổ biến bởi những tính chất nổi bật của nó [119].



*Hình 1.22. Khuôn mẫu được chế tạo từ thép SKD11*

Thép SKD11 là mác thép được sản xuất theo tiêu chuẩn JIS của Nhật Bản. Loại thép này có một số tên gọi khác tùy thuộc vào tiêu chuẩn của từng đơn vị như DC11 của hãng DAIDO – Nhật, SLD của hang HITACHI-Nhật, D2 theo AISI-Mỹ, 2379 theo DIN-Đức. Thép SKD11 có hàm lượng Các bon cao nên độ bền kéo rất tốt, có khả năng chịu ăn mòn do oxi hóa, độ mài mòn cao, độ thấm tôi tốt, có sự cân bằng giữa độ cứng và độ dẻo, bề mặt gia công cắt gọt thường mịn, ít biến dạng khi gia công, có khả năng kéo dài tuổi thọ cho sản phẩm. Đây là một trong số rất ít loại thép có thể đạt đến độ cứng 58-60HRC

sau nhiệt luyện. Chính vì vậy, thép SKD11 được sử dụng chủ yếu trong ngành chế tạo khuôn mẫu (hình 1.22), đặc biệt là khuôn dập.

Chính những đặc tính trên cũng như ứng dụng phổ biến của loại thép này mà nó được chọn làm đối tượng nghiên cứu trong luận án này.

### 1.3. Một số đánh giá và xác định vấn đề nghiên cứu của luận án

Như vậy, về cơ bản khi nghiên cứu tổng quan các công trình nghiên cứu đã công bố về gia công cao tốc nói chung và gia công cao tốc hợp kim cứng nói riêng, ta có một số nhận định như sau:

Nghiên cứu về gia công cao tốc vật liệu có **độ cứng thấp** thì đã có rất nhiều công trình trong và ngoài nước. Tuy nhiên, nghiên cứu gia công cao tốc cho vật liệu có **độ cứng cao** thì còn khá hạn chế. Nội dung gia công cao tốc vật liệu có **độ cứng cao** chủ yếu tập trung vào ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới lực cắt [37], [50], [62], [78]; nhiệt cắt [26], [33], [39], [41], [49], [99]; rung động [31], [59], [101], [108], [115]; mòn và tuổi bền dao [29], [51], [60], [63], [71], [77], [83]; hình thái phoi [27], [95], [88]; độ nhám bề mặt [37], [48], [50], [51], [57], [58], [60], [66], [71], [83], [88]; bài toán tối ưu khi gia công cao tốc vật liệu độ cứng thấp [66], [81]. Bài toán năng lượng tiêu tốn về quá trình gia công thông thường thì có rất nhiều nhưng về gia công cao tốc, đặc biệt gia công cao tốc hợp kim cứng hầu như chưa thấy công trình nào (theo tìm hiểu của nghiên cứu sinh).

Vật liệu hợp kim cứng trong các công trình nghiên cứu đã công bố chủ yếu là hợp kim Ti, Inconel và AISI loại có độ cứng cao.

Về phương pháp giải bài toán thực nghiệm trong hầu hết các công trình có thực nghiệm đều tập trung vào các phương pháp thực nghiệm Taguchi, RSM, ANOVA, và thuật toán GA.

Như vậy, mục tiêu luận án đặt ra là nghiên cứu tối ưu hóa các thông số công nghệ nhằm giảm năng lượng tiêu tốn, tăng độ chính xác gia công và tăng độ

nhám bề mặt khi phay cao tốc thép hợp kim SKD11 hoặc thép C45 sau nhiệt luyện (>35HRC) và có thể coi là mới và phù hợp với điều kiện sản xuất ở Việt Nam, phù hợp với xu thế phát triển trong tương lai.

## Kết luận chương 1

Như vậy, chương đầu tiên đã giải quyết được các vấn đề có tính định hướng, tiến tới xác định các nội dung của luận án. Cụ thể như sau:

+ Trình bày những vấn đề cơ bản về gia công cao tốc nói chung và gia công cao tốc hợp kim cứng nói riêng như: khái niệm HSM, đặc trưng gia công cao tốc, ứng dụng, ưu điểm và hạn chế của phương pháp gia công này.

+ Đánh giá và phân tích được kết quả nghiên cứu của một số công trình đã công bố liên quan đến ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới các yếu tố như: lực cắt, nhiệt cắt, rung động, mòn và tuổi bền dao, độ nhám bề mặt, độ chính xác gia công, năng lượng gia công và các bài toán tối ưu.

+ Xác định các vấn đề nghiên cứu chính của luận án. Khẳng định tính phù hợp về mục tiêu và đối tượng nghiên cứu của luận án.

# CHƯƠNG 2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT KHI PHAY CAO TỐC VÀ PHƯƠNG PHÁP THỰC NGHIỆM

Chương này tập trung nghiên cứu cơ sở lý thuyết khi phay cao tốc cho một số vấn đề cơ bản mà luận án quan tâm. Đó là mô hình tính toán năng lượng tiêu thụ, vấn đề về độ nhám bề mặt và độ chính xác kích thước khi gia công phay trên máy CNC. Từ đó đánh giá tính khả thi cho việc áp dụng các mô hình tính toán và lựa chọn phương án nghiên cứu thực nghiệm nhằm xây dựng mô hình toán học mô tả mối quan hệ của các thông số công nghệ tới năng lượng tiêu thụ, độ chính xác gia công và độ nhám bề mặt khi phay cao tốc hợp kim cứng. Ngoài ra, cơ sở lý thuyết cho các phương pháp thực nghiệm và quy hoạch thực nghiệm cũng được xem xét.

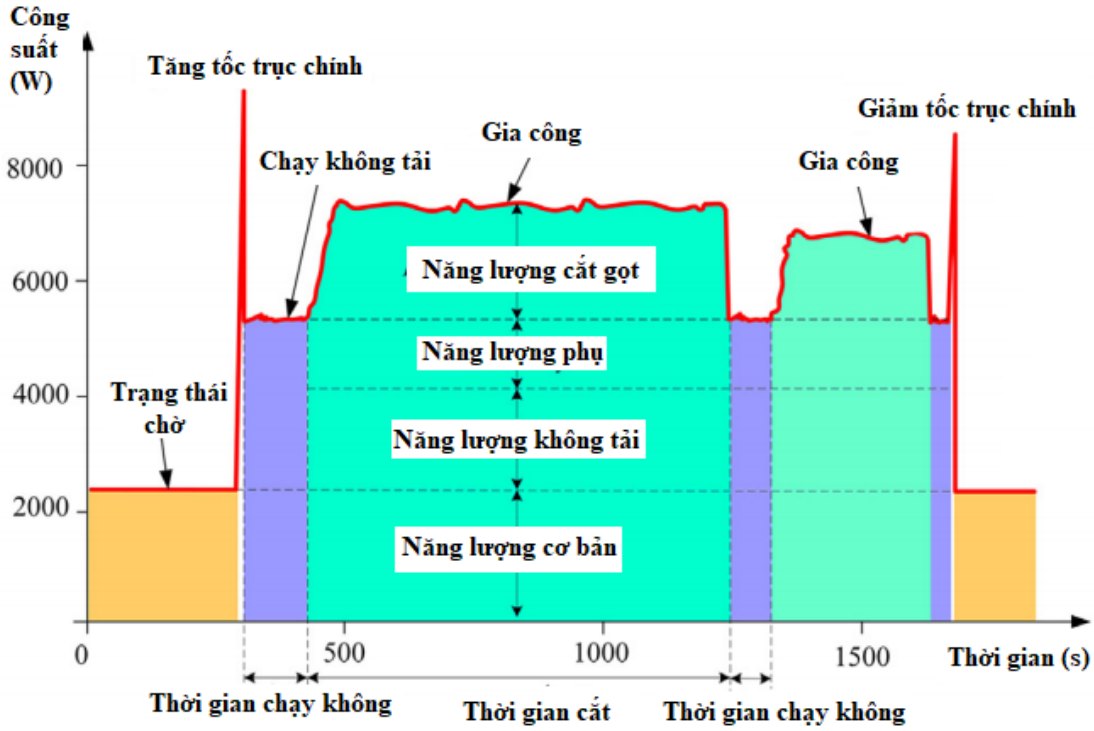
## 2.1. Mô hình tính toán năng lượng tiêu thụ khi gia công phay trên máy CNC

### *2.1.1. Mô hình tính toán tổng quát*

Qua khảo sát các công trình nghiên cứu đã công bố, có thể chia bài toán về năng lượng gia công theo ba hướng cơ bản. Thứ nhất, các công trình tập trung vào mô hình hóa về mặt lý thuyết nhu cầu sử dụng năng lượng khi gia công trên máy CNC. Hướng thứ hai bao gồm các công trình nghiên cứu theo hướng tính toán hiệu quả năng lượng sử dụng. Hướng cuối cùng bao gồm các nghiên cứu nhằm cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng dựa trên các mô hình đã được xây dựng theo hướng thứ nhất hoặc thứ hai.

Theo đó, mô hình tính toán năng lương tiêu thụ lý thuyết được xây dựng trên cơ sở phân chia các giai đoạn hoạt động của máy CNC thành các phần: khởi động máy (khởi động máy, mạch điện, hệ điều khiển, màn hình, …), trạng thái chờ (thiết lập chương trình, hệ thống làm mát, hệ thống khí, ánh sáng, hệ thống tải phoi, quạt, hệ thống bôi trơn …), tăng/giảm tốc độ (thiết lập thông số tốc độ cắt, các thông số khác), chuyển động chạy không có mang dụng cụ cắt đến vị trí gia công, trạng thái cắt gọt vật liệu. Hình 2.1 [120] mô tả cơ bản các

giai đoạn này. Mỗi giai đoạn đều có sự tiêu thụ năng lượng nhất định. Tính toán năng lượng theo mô hình này thì có rất nhiều công trình công bố như [64], [76], [96], [104], [121], [122], [123], [124], [125], ….




*Hình 2. 1. Các giai đoạn của quá trình gia công trên máy CNC [120]*

Mori [125] đề xuất mô hình tính năng lượng cần thiết trong quá trình gia công CNC như phương trình (2.1):

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 \tag{2.1}$$

Trong đó, $E_1$ là năng lượng cơ bản, $E_2$ là năng lượng chạy không và $E_3$ là năng lượng cắt gọt.

Diaz [64] đề xuất như phương trình (2.2):

$$E = E_{cut} + E_{\text{air}} \tag{2.2}$$

Trong đó, $E$ là năng lượng cần thiết trực tiếp, $E_{cut}$ là năng lượng cắt và $E_{\text{air}}$ là năng lượng khi không cắt.

He [122] đề xuất mô hình tính như phương trình (2.3):

$$E_{Total} = E_{Spindle} + E_{\text{feed}} + E_{tool} + E_{cool} + E_{fix} \quad (2.3)$$

Trong đó, $E_{Total}$ là tổng năng lượng cần thiết. $E_{Spindle}$ là năng lượng quay trục chính gồm năng lượng tăng, giảm tốc trục chính và năng lượng cắt. $E_{\text{feed}}, E_{tool}, E_{cool}$ lần lượt là năng lượng cho động cơ di chuyển các trục, thay dao, làm mát và năng lượng cố định $E_{fix}$. Tác giả cũng phân tích mối quan hệ giữa năng lượng tiêu thụ với các mã điều khiển và gia công trong chương trình NC. Xây dựng được quy trình ước tính mức năng lượng sẽ tiêu thụ. Kết quả được kiểm chứng cho thấy có độ tin cậy và hiệu quả của phương pháp.

Calvanese [76] đề xuất mô hình tính năng lượng như biểu thức (2.4):

$$\begin{aligned} E = {} & E_{fixed} + E_{axes} + E_{axis-chillers} + E_{spindle} + E_{Spindle-chiller} \\ & + E_{Chip-conveyor} + E_{tool-changer} + E_{pallet-clamp} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Trong công trình này, ngoài năng lượng cố định $E_{fixed}$, năng lượng trục chính $E_{spindle}$, năng lượng các trục $E_{axes}$, năng lượng thay dao $E_{tool-changer}$ thì có thêm năng lượng làm lạnh các trục $E_{axis-chillers}, E_{Spindle-chiller}$, năng lượng tải phoi $E_{Chip-conveyor}$ và năng lượng gá kẹp $E_{pallet-clamp}$.

Qua khảo sát các công trình mô hình hóa về năng lượng tiêu thụ khi gia công trên máy CNC, mô hình tổng quát có thể được xem xét như của Li [126] và thêm một vài thành phần khác. Tổng năng lượng tiêu thụ khi gia công trên máy CNC có thể được xác định như sau:

$$E_t = E_{cb} + E_{lm} + E_{tc} + E_{ckF} + E_{ckR} + E_{cg} + E_{td} \quad (2.5)$$

hay:

$$E_t = P_{cb}t_{cb} + P_{lm}t_{lm} + P_{tc}t_{tc} + P_{ckF}t_{ckF} + P_{ckR}t_{ckR} + P_{cg}t_{cg} + P_{td}t_{td} \quad (2.6)$$

Trong đó,

$E_t$ $(J)$ là tổng năng lượng tiêu thụ khi gia công trên máy CNC.

$E_{cb} = P_{cb}t_{cb}$ $(J)$ là năng lượng tiêu thụ cơ bản ứng với công suất tiêu thụ cơ bản $P_{cb}$ $(W)$ trong thời gian $t_{cb}$ $(s)$.

$E_{lm} = P_{lm}t_{lm}$ (J) là năng lượng tiêu thụ do làm mát ứng với công suất tiêu thụ khi làm mát $P_{lm}$ $(W)$ trong thời gian $t_{lm}$ $(s)$.

$E_{tc} = P_{tc}t_{tc}$ $(J)$ là năng lượng tiêu thụ khi trục chính quay, tăng và giảm tốc ứng với công suất trục chính $P_{tc}$ $(W)$ trong thời gian $t_{tc}$ $(s)$

$E_{ckF} = P_{ckF}t_{ckF}$ $(J)$ là năng lượng tiêu thụ khi chạy không tải từ vị trí chuẩn bị gia công tới vị trí cắt vật liệu với tốc độ chạy dao (Feed rate) của chế độ cắt gọt, ứng với công suất $P_{ckF}$ $(W)$ và thời gian $t_{ckF}$ $(s)$.

$E_{ckR} = P_{ckR}t_{ckR}$ $(J)$ năng lượng tiêu thụ khi chạy không (Rapid) với tốc độ rất cao di chuyển đến các vị trí chuẩn bị gia công ứng với công suất tiêu thụ $P_{ckR}$ ( $W$), thời gian $t_{ckR}$ $(s)$.

$E_{cg} = P_{cg}t_{cg}$ $(J)$ là năng lượng tiêu thụ khi cắt gọt ứng với công suất cắt gọt $P_{cg}$ $(W)$ và thời gian cắt gọt $t_{cg}$ $(s)$.

$E_{td} = P_{td}t_{td}$ $(J)$ là năng lượng tiêu thụ khi thay dao ứng với công suất thay dao $P_{td}$ $(W)$ và thời gian thay dao $t_{td}$ $(s)$.

### *2.1.2. Tính toán năng lượng tiêu thụ không tải*

*a. Tính năng lượng tiêu thụ cơ bản $E_{cb}$ và làm mát $E_{lm}$*

Năng lượng tiêu thụ cơ bản bao gồm năng lượng tiêu thụ bởi các thiết bị như máy tính, hệ điều khiển, quạt, đèn chiếu sáng, trạng thái chờ của hệ thống bôi trơn, thủy lực, thủy khí, làm mát… Về cơ bản, phần năng lượng tiêu thụ này cố định, không phụ thuộc vào sự thay đổi của các thông số gia công. Năng lượng tiêu thụ cơ bản có thể ước tính xấp xỉ bằng tổng năng lượng tiêu thụ của từng thiết bị:

$$E_{cb} = E_{maytinh} + E_{quat} + E_{boitron} + E_{thuyluc} + E_{servo} + E_{den} \qquad (2.7)$$

Trong đó, $E_{maytinh}, E_{quat}, E_{boitron}$ lần lượt là năng lượng tiêu thụ cho hệ điều khiển (mạch vi điều khiển, màn hình hiển thị), quạt (làm mát hệ thống điều khiển) và hệ thống bôi trơn (khởi động động cơ bôi trơn các hệ truyền động đai, bánh răng, hệ thống dẫn hướng, …); $E_{thuyluc}, E_{servo}, E_{den}$ lần lượt là năng lượng tiêu thụ ở trạng thái chờ cho hệ thống thủy lực, thủy khí (chuyển năng lượng thủy lực, thủy khí thành cơ năng cho hệ thay dao, thổi phoi, tải phoi), các động cơ các trục và chiếu sáng khu vực gia công.

Năng lượng tiêu thụ cho hệ thống làm mát $E_{lm}$ về cơ bản luôn được xác định trước dựa trên công suất định mức của động cơ bơm thủy lực hay thủy khí $P_{lm}$ từ khi thiết kế máy. Các thông số này là các thông số kỹ thuật của máy:

$$E_{lm} = P_{lm} t_{lm} \tag{2.8}$$

Trong đó, $t_{lm}$ là thời gian làm mát và được điều khiển theo mã lệnh trong chương trình gia công NC.

*b. Tính năng lượng tiêu thụ* $E_{ckR}$ *và* $E_{ckF}$

Chuyển động chạy dao khi phay được thực hiện bởi các trục X, Y, Z và được dẫn động độc lập bởi các động cơ các trục tương ứng. Chuyển động chạy dao giúp xác định vị trí của phôi và dụng cụ cắt. Độ chính xác chuyển động chạy dao quyết định tới độ chính xác kích thước, chất lượng bề mặt và năng suất gia công.

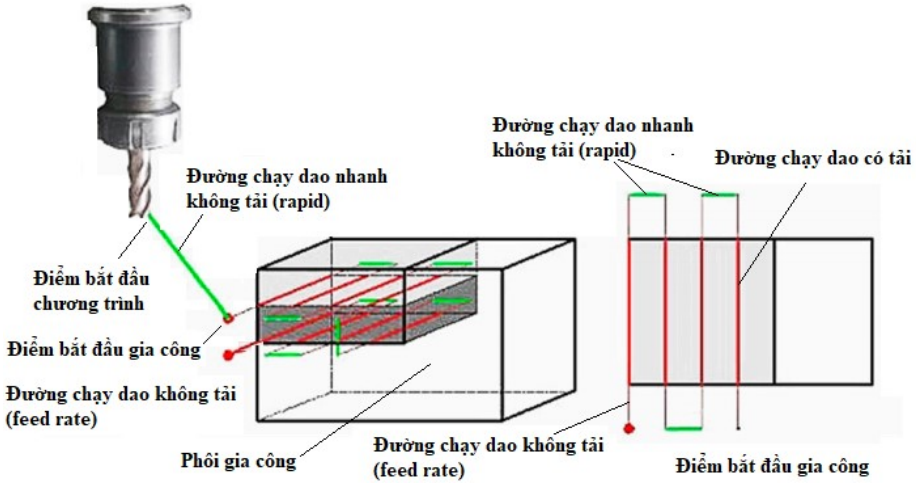
Chuyển động chạy dao không tải có hai loại:

Thứ nhất, chạy dao nhanh (rapid) là dạng chạy dao dùng trong dịch chuyển từ vị trí hiện tại đến vị trí thay dao, từ vị trí hiện tại đến điểm bắt đầu chương trình gia công hoặc chuyển động rút dao nhanh khỏi vị trí gia công này chuyển sang vị trí gia công khác.

Thứ hai, chạy dao theo tốc độ chạy dao (feed rate) là kiểu chạy dao dùng trong khi di chuyển từ vị trí bắt đầu chương trình gia công đến vị trí bắt đầu gia

công, chuyển động đưa dao xuống vùng gia công, chuyển tiếp giữa hai đường chạy dao.

Hình 2.2 mô tả các dạng đường chạy dao và các điểm quy ước.




*Hình 2. 2. Các kiểu đường chạy dao*

Ứng với kiểu chạy dao nhanh có năng lượng tiêu thụ $E_{ckR}$ và thành phần còn lại ứng với $E_{ckF}$. Năng lượng tiêu thụ khi chạy dao không tải có thể được xác định như sau:

$$E_{ck} = \sum_{i=1}^{m} \int_{t_{start}}^{t_{end}} P_i dt \qquad (2.9)$$

Trong đó, $E_{ck}(J)$ là năng lượng tiêu thụ đại diện cho hai loại năng lượng kể trên. $P_i(\mathrm{W})$ là công suất tiêu thụ trên trục chạy dao thứ $i$ và $m$ là số lượng trục chạy dao ($m = 3,4,5$) tương ứng là máy phay CNC 3 trục, 4 trục và 5 trục). Còn lại, $t_{start}, t_{end}(s)$ lần lượt là thời gian bắt đầu và kết thúc chuyển động chạy dao.

Kiểu chạy dao nhanh (rapid) thường có tốc độ chạy dao $f_{rapid}$ (mm/phút) các trục giống nhau và được đặt trước (thường từ 20.000 đến 40.000 mm/phút). Giả sử dụng cụ cắt dịch chuyển tương đối từ điểm $A(x_A, y_A, z_A)$ đến điểm $B(x_B, y_B, z_B)$ (sự thay đổi này do chuyển động của bàn máy thực hiện, trục chính mang dụng cụ cắt chỉ có dịch chuyển lên xuống theo trục Z thẳng đứng

và chuyển động quay). Năng lượng tiêu thụ khi chạy không từ A đến B được xác định:

$$E_{ck} = \int_{t_{Ax}}^{t_{Bx}} P_x dt + \int_{t_{Ay}}^{t_{By}} P_y dt + \int_{t_{Az}}^{t_{Bz}} P_z dt \quad (2.10)$$

Hay ta có:

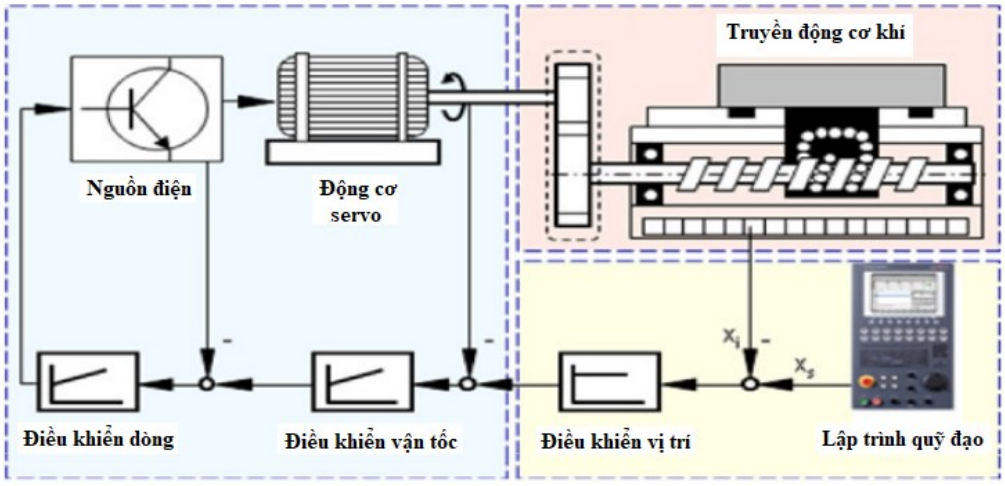
$$E_{ckR} = P_x(t_{Bx} - t_{Ax}) + P_y(t_{By} - t_{Ay}) + P_z(t_{Bz} - t_{Az}) \quad (2.11)$$

Trong đó, $t_{Bx} - t_{Ax}, t_{By} - t_{Ay}, t_{Bz} - t_{Az}$ là khoảng thời gian dịch chuyển từ A đến B tương ứng với từng trục X, Y, Z và được xác định:

$$t_{Bx} - t_{Ax} = \frac{x_B - x_A}{f_{rapid}}; t_{By} - t_{Ay} = \frac{y_B - y_A}{f_{rapid}}; t_{Bz} - t_{Az} = \frac{z_B - z_A}{f_{rapid}} \quad (2.12)$$

Việc tính năng lượng tiêu thụ $E_{ckF}$ ứng với tốc độ chạy dao $f_{feed}$ (mm/phút) cũng được thực hiện tương tự. Vấn đề nằm ở đây là việc tính công suất tiêu thụ của các trục $P_x, P_y, P_z(W)$.

Truyền động chuyển động chạy dao có thể được thực hiện bởi động cơ tuyến tính hoặc động cơ servo với bộ truyền Vít me - đai ốc bi [127].




*Hình 2. 3. Mô hình hệ truyền động chạy dao trên máy phay CNC [127]*

Hình 2.3 mô tả hệ thống cơ khí và điều khiển chuyển động chạy dao của 1 trục trên máy phay CNC. Hệ thống truyền động cơ khí bao gồm động cơ servo

(thường là động cơ đồng bộ dạng cảm ứng), bộ truyền bánh răng hoặc đai, bộ truyền vít me – đai ốc bi, máng trượt và bàn máy.

Cần chú ý rằng, giả sử tốc độ chạy dao khi cắt được lập trình ban đầu là $f$ (mm/phút) thì giá trị này cũng chính là giá trị tốc độ chạy dao ứng với từng trục máy CNC. Công suất tiêu thụ cho trục X khi chạy không tải với tốc độ $f$ được xác [128]:

$$P_x = T_x\omega_x + k\omega_x^2 \tag{2.13}$$

Trong đó, $T_x(Nm)$ là tổng mô men tương đương của hệ truyền động trục X (bao gồm mô men sinh ra do trọng lượng bàn máy, trọng lượng phôi, các ổ đỡ, ma sát, …), $k$ là hệ số ma sát trượt tương đương của hệ truyền động, $\omega_x(rad/s)$ là vận tốc góc của động cơ truyền động trục X và được xác định như sau:

$$\omega_x = \frac{2\pi f_{feed}}{60h_x} \tag{2.14}$$

Với $h_x(mm)$ là bước ren của vít me – đai ốc bi trục X.

Thay (2.14) vào (2.13) ta có công suất tiêu thụ truyền động trục X là:

$$P_x = \left(\frac{2\pi T_x}{60h_x}\right)f + k\left(\frac{2\pi}{60h_x}\right)^2 f^2 \tag{2.15}$$

Dễ nhận thấy trong (2.15), công suất tiêu thụ truyền động trục X phụ thuộc chủ yếu vào giá trị của tốc độ chạy dao $f$. Các thông số khác trong (2.15) đều có thể được xác định trước. Tuy nhiên, trên thực tế việc đo lường và tính toán các thông số này khá phức tạp. Bài toán thực nghiệm xác định công suất tiêu thụ cho chuyển động các trục sẽ khả thi và hiệu quả hơn. Công thức thực nghiệm xác định như sau:

$$P_x = C_{f1x}f + C_{f2x}f^2 \tag{2.16}$$

Trong đó, $C_{f1x}$ là hệ số ảnh hưởng của mô men xoắn tương đương của hệ truyền động trục X, $C_{f2x}$ là hệ số ảnh hưởng của ma sát tương đương của hệ thống truyền động trục X.

Dễ thấy, công thức (2.16) xác lập mối quan hệ giữa năng lượng tiêu thụ cho chuyển động chạy dao với giá trị tốc độ chạy dao (feed rate) theo hàm bậc 2 thông qua phân tích cấu trúc hệ thống chạy dao.

Không mất tính tổng quát, công thức (2.16) có thể được sử dụng cho việc xác định công suất tiêu thụ khi chạy không tải với tốc độ chạy dao $f$ cho các trục Y và Z. Công suất tiêu thụ khi chạy không tải tổng cả 3 trục là:

$$P_{ckF} = P_x + P_y + P_z \tag{2.17}$$

*c. Tính toán năng lượng tiêu thụ khi thay dao* $E_{td}$

Năng lượng tiêu thụ khi thay dao $E_{td}$ bao gồm năng lượng tiêu thụ cho động cơ xoay hệ thống thay dao đến vị trí cần thay và năng lượng tiêu thụ cho việc thay dao khác vào vị trí bầu cặp trục chính. Ở mỗi loại máy CNC khác nhau thì năng lượng tiêu thụ khi thay dao sẽ khác nhau. Quá trình thay dao được xác lập với mã lệnh tương ứng trong chương trình NC. Về cơ bản, năng lượng tiêu thụ được xác định như sau:

$$E_{td} = P_{td} t_{td} \tag{2.18}$$

Trong đó, $P_{td}$ là công suất tiêu thụ của động cơ thay dao, có giá trị cố định và biết trước, $t_{td}$ là thời gian thay dao.

Thời gian thay dao được xác định như sau [129]:

$$t_{td} = \frac{\left| p_{pos0} - p_{posC} \right|}{num_{pos} n_{td}} \tag{2.19}$$

Trong đó, $p_{pos0}$ là số vị trí mặc định trên hệ thống thay dao, $p_{posC}$ là số vị trí dụng cụ cắt cần thay, $num_{pos}$ là số lượng ổ dao trên hệ thống thay dao và $n_{td}$ là tốc độ quay của hệ thống thay dao tự động.

### *2.1.3. Tính toán công suất quay trục chính*

*a. Xác định công suất quay trục chính theo tính toán lý thuyết*

Công suất tiêu thụ đảm bảo trục chính quay với tốc độ cho trước $n$ (vòng/phút) bao gồm hai thành phần chính: năng lượng tăng tốc đến tốc độ yêu cầu và năng lượng duy trì tốc độ ổn định. Thông thường, năng lượng tăng tốc luôn cao hơn năng lượng duy trì tốc độ. Công suất cần thiết để trục chính quay với tốc độ $n$ (vòng/phút) được xác định như sau:

$$P_{tc} = P_{tcd} n + P_{tt} \tag{2.20}$$

Trong đó, $P_{tcd}$ $(W)$ là công suất duy trì, được xác định theo công suất định mức của trục chính, giá trị này cố định và biết trước.

$P_{tt}$ là công suất cần thiết để tăng tốc và được tính như sau [130]:

$$P_{tt} = T_{tt} \omega_{dc} \tag{2.21}$$

Trong đó, $T_{tt}$ $(Nm)$ là mô men tăng tốc tương đương của hệ thống dẫn động từ trục chính tới trục động cơ truyền động, $\omega_{dc}$ $(rad/s)$ là vận tốc góc của động cơ truyền động trục chính.

Giá trị mô men tương đương được xác định [131]:

$$T_{tt} = J_{tt} \alpha_{tt} \tag{2.22}$$

Trong đó, $J_{tt}$ $(kg.m^2)$ là mô men quán tính của hệ thống dẫn động từ trục chính tới trục động cơ truyền động, $\alpha_{tt}$ $(rad/s^2)$ là gia tốc góc của động cơ truyền động trục chính.

Giả thiết rằng, trục chính tăng tốc độ quay từ $n_1$ (vòng/phút) sang $n_2$ (vòng/phút), thời gian tăng tốc độ là:

$$t_{tt} = \frac{2\pi(n_2 - n_1)}{60\alpha} \tag{2.23}$$

Trong đó, $t_{tt}$ $(s)$ là khoảng thời gian tăng tốc độ, $\alpha$ $(rad/s^2)$ là gia tốc góc của trục chính. Trường hợp khởi động trục chính thì $n_1 = 0$.

Lúc này, năng lượng tiêu thụ cho trục chính quay được xác định:

$$E_{tc} = \int_0^{t_{tt}} P_{tc} dt = \int_0^{t_{tt}} (P_{tcd} n + P_{tt}) dt \tag{2.24}$$

Chú ý rằng, tốc độ quay $n$ (vòng/phút) của trục chính và vận tốc góc $\omega_{dc}(rad/s)$ của động cơ trục chính được điều khiển bằng bộ biến tần trục chính. Đây là các giá trị thay đổi phụ thuộc vào yêu cầu gia công thực tế. Các giá trị mô men quán tính $J_{tt}$ $(kg.m^2)$ và gia tốc góc $\alpha_{tt}(rad/s^2)$ của trục động cơ truyền động trục chính hoàn toàn có thể xác định được dựa vào cấu trúc được thiết kế của trục chính.

Gọi $n_{dc}$ (vòng/phút) là tốc độ quay của động cơ truyền động trục chính. Giá trị này được điều khiển bằng tần số bộ biến tần động cơ theo công thức:

$$n_{dc} = \frac{60 f_{dc}}{p}(1 - s) \tag{2.25}$$

Trong đó, $f_{dc}$ $(Hz)$ là tần số điều khiển động cơ, $p$ là số cặp cực của động cơ, $s$ là hệ số trượt của động cơ (giá trị của $s$ thường nằm trong khoảng từ 0.01 đến 0.05 và phụ thuộc vào khả năng tải của động cơ) [131], [132]. Khi động cơ tăng tốc mà chưa có tải thì thường giá trị của $s$ thường rất nhỏ nên có thể coi $1 - s \approx 1$. Như vậy, công thức (2.25) có thể viết lại như sau:

$$n_{dc} = \frac{60 f_{dc}}{p} \tag{2.26}$$

Tốc độ quay của trục chính $n$ (vòng/phút) được xác định bởi tốc độ quay của động cơ truyền động trục chính và tỉ số truyền động $u_{ts}$:

$$n = u_{ts} n_{dc} \tag{2.27}$$

Hay ta có:

$$n = \frac{60 u_{ts} f_{dc}}{p} \tag{2.28}$$

Tỉ số truyền $u_{ts}$ là tích các tỉ số truyền động từ trục động cơ truyền động đến trục chính của máy gia công (có thể bao gồm các bộ truyền bánh đai, bánh răng, …). Trong quá trình tăng tốc trục chính, tần số điều khiển đầu ra của biến tần có thể coi là tăng tuyến tính. Tốc độ tăng của tần số đầu ra được xác định dựa trên khoảng thời gian được thiết lập sẵn sao cho tần số tăng từ $0(Hz)$ đến tần số lớn nhất $f_{dc\max}(Hz)$:

$$k_f = \frac{f_{dc\max}}{t_{setup}} \tag{2.29}$$

Trong đó, $k_f(Hz/s)$ là tốc độ tăng tần số, $t_{setup}(s)$ là thời gian thiết lập trước.

Như vậy, tần số điều khiển động cơ tăng tốc tại thời điểm $t$ bất kì được xác định:

$$f_{dc} = f_1 + k_f t \tag{2.30}$$

Trong đó, $f_1 = \frac{n_1 p}{60 u_{ts}}$ là tần số điều khiển động cơ ở tốc độ quay trục chính $n_1$.

Từ (2.29) và (2.30) suy ra:

$$f_{dc} = \frac{n_1 p}{60 u_{ts}} + \frac{f_{dc\max}}{t_{setup}} t \tag{2.31}$$

Thay (2.31) vào (2.28), ta có:

$$n = n_1 + \frac{60 u_{ts} f_{dc\max}}{p t_{setup}} t \tag{2.32}$$

Công thức (2.32) thể hiện mối quan hệ giữa tốc độ quay của trục chính với các thông số thiết kế máy của hệ thống trục chính.

Vận tốc góc $\omega(rad/s)$ của trục chính có thể được xác định:

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n = \frac{2\pi}{60} n_1 + \frac{2\pi u_{ts} f_{dc\max}}{pt_{setup}} t \tag{2.33}$$

Thay (2.32) vào (2.27), ta có tốc độ quay của trục động cơ truyền động trục chính:

$$n_{dc} = \frac{n}{u_{ts}} = \frac{n_1}{u_{ts}} + \frac{60 f_{dc\max}}{pt_{setup}} t \tag{2.34}$$

Như vậy, vận tốc góc của trục động cơ truyền động trục chính ở (2.21) được xác định:

$$\omega_{dc} = \frac{2\pi}{60} n_{dc} = \frac{2\pi}{60} \frac{n_1}{u_{ts}} + \frac{2\pi f_{dc\max}}{pt_{setup}} t \tag{2.35}$$

Từ (2.35), ta suy ra được gia tốc góc của trục động cơ truyền động trục chính ở (2.22):

$$\alpha_{tt} = \frac{d\omega_{dc}}{dt} = \frac{2\pi f_{dc\max}}{pt_{setup}} \tag{2.36}$$

Từ (2.33), ta thiết lập được công thức tính gia tốc góc $\alpha(rad/s^2)$ của trục chính ở (2.23) nhằm tính được thời gian tăng tốc độ:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{2\pi u_{ts} f_{dc\max}}{pt_{setup}} \tag{2.37}$$

Thay (2.37) vào (2.23) ta có:

$$t_{tt} = (n_2 - n_1) \frac{pt_{setup}}{60 u_{ts} f_{dc\max}} \tag{2.38}$$

Thay (2.35) và (2.36) vào (2.22) ta xác định được mô men xoắn của trục động cơ truyền động trục chính:

$$T_{tt} = J_{tt} \frac{2\pi f_{dc\max}}{pt_{setup}} \left( \frac{2\pi}{60} \frac{n_1}{u_{ts}} + \frac{2\pi f_{dc\max}}{pt_{setup}} t \right) \tag{2.39}$$

hay,

$$T_{tt} = J_{tt}\frac{(2\pi)^2}{60}\frac{n_1 f_{dc\max}}{u_{ts} pt_{setup}} + J_{tt}\left(\frac{2\pi f_{dc\max}}{pt_{setup}}\right)^2 t \qquad (2.40)$$

Mô men quán tính của hệ thống truyền động từ trục chính tới trục của động cơ dẫn động được xác định [131], [133]:

$$J_{tt} = J_{rotor} + J_{ms} \qquad (2.41)$$

Trong đó, $J_{rotor}(kg.m^2)$ là mô men quán tính động cơ truyền động và giá trị này biết trước, $J_{ms}(kg.m^2)$ là mô men quán tính tương đương của hệ thống dẫn động từ trục chính tới trục động cơ truyền động và được xác định như sau [133], [134]:

$$J_{ms} = \sum_{i=2}^{m} u_i^2 J_i \qquad (2.42)$$

Trong đó, $u_i$ là tỉ số truyền của bộ truyền động thứ $i$ tính từ trục động cơ truyền động, $J_i(kg.m^2)$ là tổng mô men quán tính của tất cả các thành phần trong bộ truyền động thứ $i$ tương ứng.

Từ (2.35), (2.36), (2.38), (2.40) và (2.42) ta có thể xác định được năng lượng tiêu thụ khi trục chính quay theo (2.24).

*b. Xác định công suất quay trục chính bằng thực nghiệm*

Như đã trình bày ở phần trên, việc tính toán công suất quay trục chính bằng lý thuyết sẽ cần phải xác định rất nhiều thông số khác nhau và nắm chắc thông tin thiết kế máy công cụ. Với điều kiện thực tế, nhiều cơ sở sản xuất sử dụng máy không thể thu thập được đầy đủ thông số cần thiết. Mặt khác, việc tính toán vẫn cần phải được kiểm chứng bằng thực nghiệm.

Một cách tiếp cận khác để xác định công suất quay của trục chính mà rất nhiều nghiên cứu sử dụng là thông qua thực nghiệm. Cơ sở để xây dựng mô hình thông qua thực nghiệm là dựa trên đánh giá cốt lõi rằng công suất quay

trục chính chủ yếu phụ thuộc vào tốc độ quay yêu cầu. Các công trình nghiên cứu điển hình về vấn đề này là của [74] và [135] công suất quay trục chính thực nghiệm được mô tả bằng biểu thức:

$$P_{tc} = C_{tc1}n + C_{tc2} \tag{2.43}$$

Trong đó, $C_{tc1}$ là hệ số ảnh hưởng của tốc độ quay trục chính, $C_{tc2}$ là hằng số.

Trong khuôn khổ luận án, hệ thống máy được sử dụng là máy phay cao tốc hãng DMG thế hệ mới (Phụ lục 1) nên phương pháp thực nghiệm sẽ được áp dụng để xác định công suất quay trục chính.

### *2.1.4. Tính toán công suất cắt gọt*

Theo Avram [130], công suất cắt gọt $P_{cg}$ gồm hai thành phần: công suất quay trục chính $P_{tc}$ và công suất cắt vật liệu $P_{cvl}$:

$$P_{cg} = P_{tc} + P_{cvl} \tag{2.44}$$

Công suất quay trục chính $P_{tc}$ được xác định với mô men xoắn tương đương của hệ truyền động $T_{ch}$ và vận tốc góc $\omega = 2\pi n(rad/s)$:

$$P_{tc} = T_{ch}\omega \tag{2.45}$$

Công suất cắt vật liệu được xác định [129], [130]:

$$P_{cvl} = F_c v_c \tag{2.46}$$

Trong đó, $F_c(N)$ là lực cắt và $v_c(m/s)$ là vận tốc cắt.

Tuy nhiên, công thức tính công suất cắt gọt (2.44) chưa kể đến tổn thất điện năng trong quá trình gia công. Công trình nghiên cứu [135] đánh giá, giá trị công suất tiêu thụ dự đoán theo (2.44) mới chỉ bằng 50% giá trị công suất tiêu thụ thực tế. Một số nghiên cứu lý thuyết khá tỉ mỉ để tính công suất cắt nhưng khó thực hiện do tính phức tạp của chúng với những tham số khó xác định [136].

Trên thực tế, phương pháp thực nghiệm vẫn ưu tiên được sử dụng trong các nghiên cứu bởi độ tin cậy cao. Hầu hết các công trình đều lấy hàm số mũ [75],

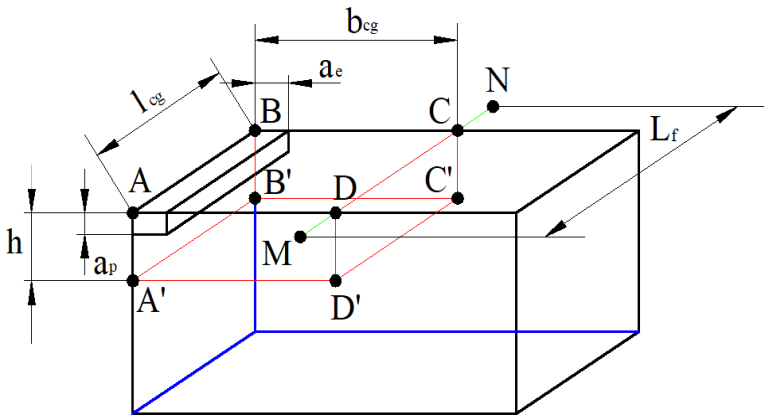
[135] để mô tả mối quan hệ của công suất cắt gọt với các thông số ảnh hưởng trong quá trình cắt. Theo đó, công suất tiêu thụ khi cắt gọt được xác định [135]:

$$P_{cg} = C_{cg} v_c^{x_v} f^{x_f} a_p^{x_{ap}} a_e^{x_{ae}} \quad (2.47)$$

Trong đó, $v_c(m/phut), f(mm/phut), a_p(mm), a_e(mm)$ lần lượt là vận tốc cắt, tốc độ chạy dao, chiều sâu cắt và bề rộng cắt; $C_{cg}, x_v, x_f, x_{ap}, x_{ae}$ lần lượt là hệ số cắt gọt, hệ số ảnh hưởng của vận tốc cắt, tốc độ chạy dao, chiều sâu cắt và bề rộng cắt.

### *2.1.5. Tính toán thời gian di chuyển không tải*

Xem xét hình 2.4 như sau:




*Hình 2. 4. Mô hình tính toán khi phay cao tốc*

Gọi $L_f$ (mm) là tổng chiều dài 1 đường cắt đơn MN (bao gồm chiều dài đoạn chạy không cắt MD, CN và đoạn có cắt DC với tốc độ $f$ mm/phút), đường kính dao phay là $D_t$ (mm), chiều dài phôi cần gia công là $l_{cg}$ (mm), chiều rộng phôi cần gia công là $b_{cg}$ (mm), tổng chiều cao cần gia công của phôi là $h$ (mm), chiều sâu cắt $a_p(mm)$ và bước dao ngang $a_e(mm)$. Thể tích phôi được cắt sau 1 đường chạy dao dọc theo chiều dài phôi được xác định là $l_{cg} a_p a_e (mm^3)$. Vậy số đường chạy dao cần thực hiện để cắt hết toàn bộ thể tích phôi $ABCDA'B'C'D'$ là:

$$N = \frac{hb_{cg}}{a_p a_e} \tag{2.48}$$

Thời gian cần thiết để thực hiện đường cắt thứ $i(i = 1 \div N)$ là:

$$t_{f_i} = \frac{L_f}{f} \tag{2.49}$$

Tổng thời gian chạy $N$ đường cắt chính là thời gian thực hiện dịch chuyển theo tốc độ chạy dao không tải $t_{ckF}$:

$$t_f = t_{ckF} = \sum_{i=1}^{N} t_{f_i} = \frac{hb_{cg}L_f}{fa_p a_e} \tag{2.50}$$

### *2.1.6. Tính toán thời gian cắt gọt*

Thời gian gia công được xác định dựa trên thể tích toàn bộ phần vật liệu gia công $V_0(mm^3)$ và tốc độ bóc tách vật liệu $MRR$ (mm$^3$/phút) [137]:

$$t_{cg} = \frac{V_0}{MRR} \tag{2.51}$$

Tốc độ bóc tách vật liệu được xác định thông qua tốc độ chạy dao $f$ (mm/phút), chiều sâu cắt $a_p(mm)$ và bước dao ngang $a_e(mm)$ [52], [103]:

$$MRR = fa_p a_e \tag{2.52}$$

Thông thường, tốc độ bóc tách vật liệu liên quan nhiều đến số răng cắt của dụng cụ cắt và được tính bằng tốc độ chạy dao răng qua liên hệ:

$$f = nf_z z \tag{2.53}$$

Trong đó, $f_z$ (mm/răng) là tốc độ chạy dao răng, $z$ là số răng cắt của dụng cụ cắt. Mặt khác, tốc độ quay của trục chính $n$ (vòng/phút) liên hệ với đường kính dao $D_t$ (mm) và vận tốc cắt $v_c$ (m/phút) qua công thức:

$$n = \frac{1000v_c}{\pi D_t} \tag{2.54}$$

Thay (2.52), (2.53), (2.54) vào (2.51) ta có thời gian cắt gọt cụ thể:

$$t_{cg} = \frac{\pi D_t V_0}{1000 v_c f_z z a_p a_e} \quad (2.55)$$

### *2.1.7. Các điều kiện trong bài toán thực nghiệm*

Trong thực tế các nghiên cứu đều cho thấy, $E_{ckR}$ có giá trị rất nhỏ, phụ thuộc vào đường chạy dao và không tối ưu được bằng cách chọn các thông số công nghệ nên có thể bỏ qua [122].

Để đơn giản hóa quá trình tính toán, giả thiết rằng nguyên công phay thô không thay dao, nguyên công phay tinh không thay dao, số lần thay dao giữa hai bước phay thô và phay tinh không quá 2 lần, thời gian thay dao rất ngắn nên có thể bỏ qua.

Mặt khác, trên thực tế các giá trị thời gian $t_{cb}$, $t_{lm}$, $t_{ckF}$ nằm trong các giai đoạn không tham gia cắt gọt. Giá trị $t_{cb}$ phụ thuộc vào kỹ thuật viên đứng máy, giá trị $t_{lm}$ cũng có thể giả thiết xấp xỉ $t_{cb}$. Do vậy, để đơn giản hơn nữa việc tính toán, ta có thể giả thiết $t_{cb} = t_{lm} = t_{tc}$.

Như vậy, công thức (2.6) có thể viết lại như sau:

$$E_t = (P_{cb} + P_{lm})t_{cb} + P_{ckF}t_{ckF} + P_{tc}t_{tc} + P_{cg}t_{cg} \quad (2.56)$$

### *2.1.8. Xác định bài toán về năng lượng tiêu thụ*

Căn cứ vào cơ sở lý thuyết ở trên, để xác định năng lượng tiêu thụ khi gia công trên máy CNC khi phay cao tốc thép sau nhiệt luyện (công thức (2.6)) thì cần thực hiện các bài toán thực nghiệm cụ thể như sau:

*Thực nghiệm xây dựng mô hình toán học mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới công suất tiêu thụ khi quay trục chính $P_{tc}$ (công thức (2.43))*

*Thực nghiệm xây dựng mô hình toán học mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới công suất tiêu thụ khi di chuyển không tải theo tốc độ chạy dao $P_{ckF}$ (công thức (2.17))*

*Thực nghiệm xây dựng mô hình toán học mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới công suất tiêu thụ khi cắt gọt $P_{cg}$ (công thức (2.47)).*

Tuy nhiên, vấn đề đặt ra ở đây là điều kiện thực tế cơ sở vật chất phục vụ cho các thực nghiệm tại đơn vị nghiên cứu và hầu hết các đơn vị khác không đáp ứng được cho đầy đủ các bài toán thực nghiệm này. **Qua một thời gian dài tìm hiểu, nghiên cứu và thực hiện sơ bộ các vấn đề gia công, đo đạc, NCS thu được bộ dữ liệu không đầy đủ và độ tin cậy chưa cao do thiếu thiết bị đo chuyên dụng và chưa đảm bảo các điều kiện thực nghiệm cụ thể.**

Do đó, trong khuôn khổ luận án này, năng lượng tiêu thụ của máy CNC trong quá trình gia công được đo bằng thực nghiệm thông qua phép đo điện áp hiệu dụng tổng, cường độ dòng diện hiệu dụng tổng của máy gia công và thời gian gia công thực tế. Theo đó, công suất của từng thiết bị thành phần được kể đến trong giá trị công suất tổng của máy, ta sẽ bớt được việc đo lường công suất từng thiết bị cụ thể, khắc phục được sự hạn chế của cơ sở vật chất.

### *2.2. Vấn đề về nhám bề mặt khi gia công phay trên máy CNC*

Chất lượng bề mặt chi tiết gia công là tập hợp nhiều tính chất quan trọng của lớp bề mặt, cụ thể là: hình dáng tế vi lớp bề mặt, tính chất cơ, lý hóa của lớp bề mặt. Hình dáng tế vi của lớp bề mặt gia công có ảnh hưởng rất nhiều đến tính chất làm việc của chi tiết máy. Cơ sở lý thuyết nghiên cứu về độ nhám bề mặt đã được đề cập rất chi tiết trong công trình [7], [9].

Như đã trình bày ở Chương 1, độ nhám bề mặt là yếu tố được quan tâm trong hầu hết các công trình nghiên cứu về gia công cao tốc [7], [8], [9], [14], [15], [19], [21], [24], [25], [35], [38], [45], [81], [98], [106]. Nghiên cứu về độ nhám bề mặt trong gia công cao tốc **hợp kim cứng** thì điển hình có một số công trình như [37], [48], [50], [51], [57], [58], [60], [66], [71], [83], [88].

Qua đó, có thể thấy chất lượng bề mặt chi tiết gia công phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố và điều kiện gia công như: vật liệu gia công, phương pháp gia công, độ cứng vững của hệ thống công nghệ, dụng cụ cắt, chế độ cắt, chế độ bôi trơn, các hiện tượng vật lý khi cắt, v.v. Về cơ bản, có thể chia các yếu tố ảnh hưởng kể trên thành các nhóm:

Nhóm 1: nhóm các yếu tố ảnh hưởng mang tính chất in dập hình học (chế độ cắt, hình dáng dụng cụ, ...) lên bề mặt gia công.

Nhóm 2: nhóm các yếu tố ảnh hưởng do biến dạng (chế độ cắt, lực cắt, nhiệt cắt, ...).

Nhóm 3: nhóm các yếu tố ảnh hưởng do rung động của hệ thống công nghệ (độ cứng vững của hệ thống công nghệ, chế độ cắt, ...).

Dễ thấy, các yếu tố ảnh hưởng ở nhóm 2 và nhóm 3 là khá phức tạp và khó đánh giá. Tuy nhiên, yếu tố chế độ cắt xuất hiện ở hầu hết các nhóm yếu tố ảnh hưởng. Điều này cho thấy rằng, ảnh hưởng của chế độ cắt là rất lớn tới độ nhám bề mặt, cần được quan tâm và đánh giá chi tiết. Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về độ nhám bề mặt trong gia công cao tốc nhưng với phay cao tốc hợp kim cứng sau nhiệt luyện vẫn còn rất hạn chế. Do đó, ảnh hưởng của chế độ cắt tới độ nhám bề mặt khi phay cao tốc hợp kim cứng vẫn là một nội dung chính trong luận án.

Mặc dù đã có nhiều công trình nghiên cứu công bố về ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ nhám bề mặt khi gia công cao cho các loại vật liệu khác nhau nhưng đối với vật liệu hợp kim cứng cụ thể như SKD11 hoặc thép C45 thì vấn đề này vẫn cần phải giải quyết. Dựa trên các kết quả đã công bố, luận án sử dụng phương pháp thực nghiệm nhằm đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ nhám bề mặt thông qua công thức thực nghiệm sau [8], [9], [10]:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + ... + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + ... + b_{(k-1)k}x_{(k-1)}x_k + b_{11}x_1^2 + ... + b_{kk}x_k^2 \quad (2.57)$$

Trong đó, $b_0, b_1, ..., b_k$, lần lượt là các hệ số ảnh hưởng của các thông số công nghệ ($x_1, x_2, ..., x_k$) tới độ nhám bề mặt.

## 2.3. Vấn đề về độ chính xác kích thước khi gia công

Khi gia công, việc đảm bảo được các yêu cầu kỹ thuật của chi tiết được ghi trên bản vẽ là rất cần thiết. Thực tế là giữa các chi tiết được gia công với các chi tiết lý tưởng trên bản vẽ có những sai lệch khác nhau và các sai lệch đó được gọi là sai số gia công. Do vậy, độ chính xác gia công được định nghĩa như sau: "Độ chính xác gia công của chi tiết máy là mức độ giống nhau về kích thước, hình dáng và vị trí tương quan giữa các chi tiết gia công trên máy và các chi tiết lý tưởng trên bản vẽ thiết kế". Độ chính xác của chi tiết được đánh giá theo các yếu tố sau đây:

Độ chính xác về kích thước: là độ chính xác về kích thước thẳng hoặc kích thước góc. Độ chính xác kích thước được đánh giá bằng sai số của kích thước thực so với kích thước lý tưởng được ghi trên bản vẽ.

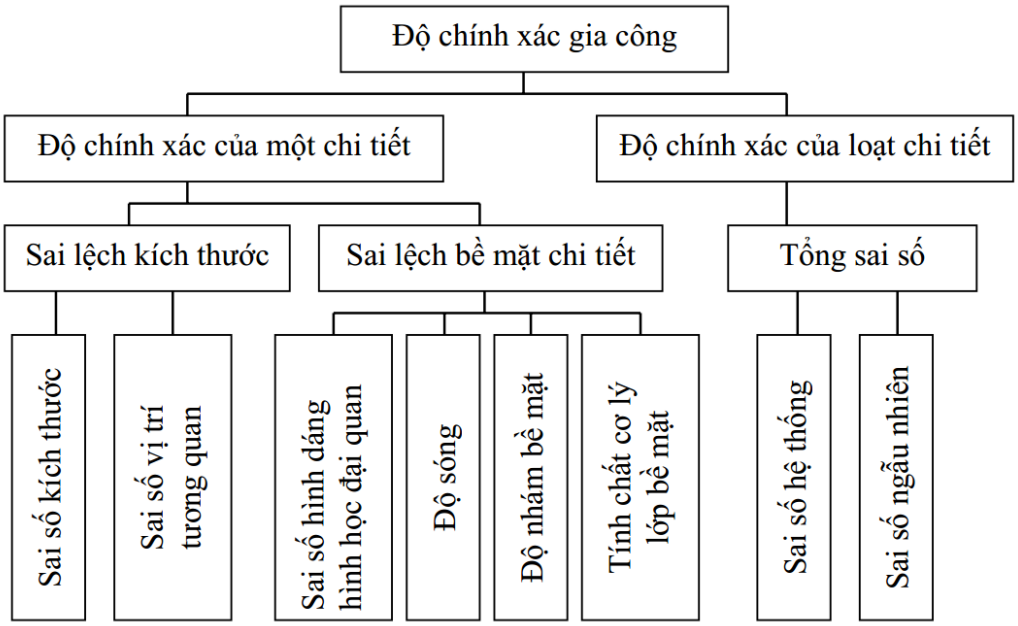
Độ chính xác hình dáng hình học: là mức độ phù hợp giữa hình dáng hình học và hình dáng lý tưởng của chi tiết như độ côn, ôvan, độ đa cạnh, độ phình tang trống, độ phẳng, ...

Độ chính xác vị trí tương quan: Độ chính xác này thực chất là sự xoay đi một góc nào đó của bề mặt này so với bề mặt kia (dùng làm chuẩn). Độ chính xác vị trí tương quan thường được ghi thành một điều kiện kỹ thuật trên bản vẽ thiết kế. Ví dụ: độ song song, độ vuông góc, độ lệch tâm, độ đối xứng...

Độ chính xác gia công bao gồm hai khái niệm: độ chính xác của một chi tiết và độ chính xác của loạt chi tiết (hình 2.5).

Nói chung, độ chính xác gia công là chỉ tiêu khó đạt nhất và gây tốn kém nhất kể cả trong quá trình thiết kế cũng như trong quá trình chế tạo. Trong thực tế không thể chế tạo được các chi tiết máy tuyệt đối chính xác, do vậy người ta

dùng giá trị sai lệch của nó để đánh giá độ chính xác gia công của chi tiết máy, giá trị sai lệch đó càng lớn thì độ chính xác gia công càng thấp. Trong khuôn khổ luận án này, mô hình toán học mô tả mối quan hệ giữa chế độ cắt và độ chính xác kích thước được quy đổi thành mối quan hệ giữa chế độ cắt và sai số kích thước gia công.




*Hình 2. 5. Độ chính xác gia công*

Khi gia công một loạt chi tiết trong cùng một điều kiện xác định mặc dù những nguyên nhân gây ra từng sai số của mỗi chi tiết là giống nhau nhưng sai số tổng cộng trên từng chi tiết lại khác nhau. Sở dĩ có hiện tượng như vậy là do tính chất khác nhau của các sai số thành phần. Một sai số xuất hiện trên từng chi tiết của cả loạt đều có giá trị không đổi theo một quy luật nào đó. Những sai số này gọi là sai số hệ thống cố định hoặc hệ thống thay đổi. Có một sai số khác mà giá trị của chúng xuất hiện trên mỗi chi tiết không theo một quy luật nào cả và những sai số này gọi là sai số ngẫu nhiên.

Các nguyên nhân gây ra sai số hệ thống cố định: sai số lý thuyết của phương pháp cắt, sai số chế tạo của máy, dao, đồ gá và sai số do biến dạng nhiệt của chi tiết gia công.

Các nguyên nhân gây ra sai số hệ thống thay đổi (theo thời gian gia công) gồm: dụng cụ bị hao mòn theo thời gian gia công, biến dạng nhiệt của máy, dao và đồ gá

Các nguyên nhân gây ra sai số ngẫu nhiên: độ cứng của vật liệu không đồng đều, lượng dư gia công không đồng đều, vị trí của phôi trong đồ gá thay đổi (dẫn đến sai số gá đặt), thay đổi của ứng suất dư, thay đổi nhiều máy để gia công một loạt chi tiết, dao động nhiệt của quá trình cắt, rung động trong quá trình cắt, ...

Các yếu tố ảnh hưởng tới độ chính xác gia công bao gồm: biến dạng đàn hồi của hệ thống công nghệ (độ cứng vững của hệ thống, biến dạng của chi tiết gia công, dụng cụ cắt, đồ gá, máy gia công), độ chính xác của máy, đồ gá, dụng cụ cắt, biến dạng nhiệt của hệ thống, rung động trong quá trình cắt, …

Để đạt độ chính xác gia công người ta thường dùng các phương pháp sau đây: phương pháp cắt thử từng chi tiết riêng biệt, phương pháp tự động đạt kích thước, phương pháp điều khiển thích nghi.

Hiện nay, việc gia công bằng phương pháp cắt gọt bằng dụng cụ cắt có lưỡi cắt cố định vẫn chiếm một tỷ lệ lớn trong quá trình gia công chế tạo các sản phẩm cơ khí. Đó là các phương pháp gia công như Tiện, Phay, Bào, Khoan, Khét, Doa... Mỗi phương pháp gia công cho một độ chính xác khác nhau nhưng nói chung là độ chính xác gia công của các phương pháp này vẫn thấp, đạt độ chính xác cao nhất khoảng cấp 7, do các yếu tố sau: tốc độ gia công thấp nên chất lượng bề mặt chi tiết chưa cao, do chiều sâu cắt tới hạn lớn, thường gia công các vật liệu chưa qua nhiệt luyện nên chất lượng bề mặt gia công thấp. Do đó, trong các quá trình gia công đòi hỏi độ chính xác cao thì các quá trình trên vẫn chưa đáp ứng được các yêu cầu kỹ thuật đã đề ra mà chỉ đóng vai trò là các nguyên công gia công thô hoặc gia công trước nhiệt luyện, chuẩn bị cho quá trình gia công có độ chính xác cao hơn như Mài, Nghiền, Khôn…Chính những

nghiên cứu trước đây mang tính cơ sở trong gia công thông thường với hợp kim có độ cứng thấp mà phương pháp gia công cao tốc có tiềm năng phát triển mạnh như hiện nay. Những vấn đề cụ thể về cơ sở lý thuyết đối với độ chính xác gia công đã được đề cập chi tiết trong [1], [3].

Như đã xem xét ở Chương 1, có rất ít công trình đề cập đến ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ chính xác kích thước khi phay cao tốc nói chung, phay cao tốc thép hợp kim cứng nói riêng, chỉ có một số nghiên cứu điển hình như [12], [28], [32], [42], [44], [61], [113], [117] nhưng **Các nghiên cứu này không phải gia công cao tốc**. Do vậy, trong khuôn khổ luận án, vấn đề này sẽ được giải quyết trên cơ sở nghiên cứu thực nghiệm quá trình phay cao tốc thép hợp kim cứng SKD11.

## 2.4. Bài toán tối ưu đơn mục tiêu và đa mục tiêu

Dễ thấy, việc tính toán đơn thuần mức tiêu thụ năng lượng trong quá trình gia công cắt gọt không đáp ứng được mục tiêu tiết kiệm năng lượng. Tìm giải pháp giảm hoặc tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ mới là đích đến cuối cùng. Trong đó, tối ưu hóa các thông số công nghệ là một trong những lựa chọn hàng đầu.

Dựa trên mô hình toán học thực nghiệm được xây dựng từ công suất tiêu thụ khi gia công, thời gian gia công, ta xác định được hàm mô tả toán học về quan hệ giữa năng lượng tiêu thụ và các thông số công nghệ của cả quá trình gia công. Hàm mục tiêu cho bài toán tối ưu năng lượng tiêu thụ được xác định:

$$y_{NL} = f(x_1, x_2, x_3) \tag{2.58}$$

Các thông số tối ưu cần xác định là các giá trị của chế độ công nghệ $x_1, x_2, x_3$ đảm bảo giá trị hàm mục tiêu $y_{NL}$ là nhỏ nhất. Các điều kiện biên cần được xác định cụ thể:

$$F_{\min} \le F \le F_{\max}; t_{\min} \le t \le t_{\max}; n_{\min} \le n \le n_{\max}; V_{\min} \le V_c \le V_{\max} \tag{2.59}$$

Các bước dẫn tới bài toán tối ưu được xác định như sau:

**Bước 1**: Lập kế hoạch thực nghiệm và thực nghiệm

**Bước 2**: Đo lường kết quả thực nghiệm, thu thập và xử lý dữ liệu

**Bước 3**: Xây dựng phương trình hồi quy và đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ. Có thể sử dụng công cụ phân tích như phân tích phương sai (ANOVA).

**Bước 4**. Xây dựng thuật toán tối ưu đơn mục tiêu và đa mục tiêu như thuật toán di truyền, thuật toán bầy đàn, thuật toán mạng Nơ tron để tìm bộ thông số tối ưu. Vấn đề chọn lựa thuật toán tối ưu sẽ được đề cập cụ thể tại chương 4 của Luận án.

## 2.5. Bài toán thực nghiệm

Thực nghiệm là một quá trình hoặc một nghiên cứu mà kết quả là thu được các số liệu, thông tin. Các kết quả này trước đó chưa biết. Thường về mặt thống kê, các thực nghiệm được tiến hành trong các điều kiện mà nhà nghiên cứu có thể quản lý và kiểm soát được các yếu tố không liên quan đến mục tiêu nghiên cứu.

Hiện nay, mối quan hệ thực nghiệm được xác định phổ biến bằng 2 phương pháp: bình phương cực tiểu và quy hoạch thực nghiệm

### *2.5.1. Phương pháp bình phương cực tiểu*

Sử dụng phương pháp này để xác định mối quan hệ toán học của những đại lượng có mối quan hệ với nhau ở một dạng nào đó đã biết qui luật: tuyến tính, tuần hoàn, hàm mũ, hàm logarít…các dạng hàm này đều chưa biết các giá trị cụ thể của các tham số, để xác định các tham số đó sử dụng thí nghiệm, đo đạc…các cặp giá trị tương ứng và chọn một mô hình toán học cụ thể để tính toán tổng giá trị sai lệch bình phương các điểm. Tổng sai lệch này là hàm của các giá trị hệ số cần xác định. Các hệ số phù hợp với mô hình là giá trị của nghiệm để giá trị hàm sai lệch nhỏ nhất.

*Ưu điểm*

Phương pháp này có khả năng xử lý với mọi bộ dữ liệu (kích thước và tính chất bộ dữ liệu là tùy ý) nên kết quả đưa ra phù hợp với thực nghiệm. - Trong quá trình tính toán, do thực hiện phép tổng các giá trị thực nghiệm bậc lẻ nên có thể giản các sai số ngẫu nhiên trong quá trình thí nghiệm mà không quản lý được.

Phương pháp bình phương cực tiểu, do bản chất của nó là nội suy một đường (mặt) để đạt một chỉ tiêu nào đó, nên có sai số phương pháp.

*Nhược điểm*

Nhược điểm lớn nhất của phương pháp này (làm cho nó không thông dụng trước đây) là đòi hỏi một lượng lớn các phép tính toán (điều này càng đúng khi bộ số thí nghiệm càng nhiều và có nhiều đại lượng đầu vào). Nếu thực hiện tính toán bằng tay thì phương pháp này còn gây ra sai số tính toán.

Do đặc trưng công thức tính toán có tổng bình phương nên có thể gây nên các sai số tích lũy trong công thức tính toán cuối cùng.

### *2.5.2. Phương pháp quy hoạch thực nghiệm*

#### *a. Khái niệm chung*

Quy hoạch thực nghiệm là một quá trình hoạch định nghiên cứu đạt các mục tiêu xác định. Hoạch định đúng rất quan trọng nhằm đảm bảo đúng loại dữ liệu, kích thước mẫu đủ lớn để trả lời được các câu hỏi liên quan càng rõ ràng, càng hiệu quả càng tốt.

Mục đích của quy hoạch thực nghiệm là xây dựng mô hình toán học (phương trình hồi quy) biểu thị mối quan hệ giữa thông số đầu ra và các thông số đầu vào. Phương pháp này cần phải thực hiện kiểm tra tính đồng nhất của các thí nghiệm, nếu chủ động được thí nghiệm thì có thể sử dụng qui hoạch thực nghiệm trực giao.

*Ưu điểm*

Nguyên tắc cơ bản của quy hoạch thực nghiệm là tốn ít thời gian nhất để nhận thông tin nhiều nhất. Do vậy có thể nhận thấy rằng phương pháp quy hoạch thực nghiệm là phương pháp đơn giản và đòi hỏi ít số liệu thí nghiệm và ít xử lý toán học phức tạp (Chẳng hạn chỉ có hai yếu tố đầu vào thì chỉ cần thí nghiệm 4 mẫu). Do sử dụng ít tính toán nên phương pháp này hầu như loại bỏ được sai số tính toán.

Tuy sử dụng ít thí nghiệm nhưng ở một giới hạn thì kết quả là chấp nhận được nếu đã biết trước hàm phụ thuộc.

Phương pháp quy hoạch thực nghiệm sử dụng chính xác dữ liệu thí nghiệm vào trong công thức mong muốn, nên phương pháp này sẽ tránh được sai số phương pháp

*Nhược điểm*

Tuy đòi hỏi ít dữ liệu thí nghiệm nhưng phương pháp này cũng đòi hỏi tiến hành một lượng không nhỏ thí nghiệm để kiểm tra tính đồng nhất của nó, sau khi tiến hành nhiều thí nghiệm như vậy những kết quả này lại không đưa vào trong công thức cuối cùng cần đạt được. Như vậy vừa mất công mà lại làm giảm tính chính xác của phương pháp. Chẳng hạn chỉ với 4 thí nghiệm với 4 bộ số liệu đã kết luận một công thức có hai biến phụ thuộc như vậy sẽ khó đạt độ chính xác dự đoán.

Do chỉ tiến hành một số thí nghiệm, nên không thể tìm ra những điểm khác biệt những vấn đề mới mà một quá trình thí nghiệm đòi hỏi. Vì với một thông số đầu vào thì chỉ thí nghiệm với hai số liệu tương ứng với (-1) và (+1), không thực hiện nhiều thí nghiệm thì không thể tìm ra một quy luật đã đúng trong một giới hạn hẹp dữ liệu đầu vào.

Phương pháp quy hoạch thực nghiệm nên áp dụng với dữ liệu cách đều nhau.

***b*. Mục tiêu quy hoạch thực nghiệm**

Giảm thiểu đáng kể số lượng thực nghiệm cần thiết, giảm thời gian và phí tổn tiến hành thực nghiệm, thu thập được nhiều thông tin hiệu quả và rõ ràng hơn khi đánh giá được tương tác giữa các yếu tố và ảnh hưởng của chúng đến đáp ứng.

Xây dựng được mô hình toán học thống kê thực nghiệm; đánh giá được sai số trong tổng thể bối cảnh thực nghiệm; đánh giá ảnh hưởng của các yếu tố với mức độ tin cậy cần thiết.

Cho phép xác định được điều kiện tối ưu của đối tượng nghiên cứu khá chính xác bằng các công cụ toán học thay cho cách giải gần đúng; tìm được tối ưu cục bộ.

***c*. Phân loại quy hoạch thực nghiệm**

Các bài toán quy hoạch thực nghiệm:

*Thực nghiệm sàng lọc*: có nhiệm vụ xác định các yếu tố quan trọng đối với hệ thống thực nghiệm.

*Thực nghiệm mô phỏng*: liên quan đến việc xây dựng mô hình toán học diễn tả sự vận hành của hệ thống.

*Thực nghiệm tối ưu*: có thể xem đây là bước phát triển của thực nghiệm mô phỏng. Nhiệm vụ của loại thực nghiệm này là xác định được điểm tối ưu của hệ thống.

Về phương pháp, có thể phân loại quy hoạch thực nghiệm như sau:

*Phương pháp thử tìm sai (trial and error).*

Phương pháp dựa vào kinh nghiệm.

Có thể cho kết quả nhanh chóng.

Không giải thích được kết quả.

Khó đạt được tối ưu.

Có thể sử dụng như giải pháp tạm thời.

Đây là phương pháp "mò". Không hiểu bản chất vấn đề.

*Phương pháp thay đổi lần lượt từng yếu tố.*

Tiến hành với yếu tố thứ nhất. Quan sát kết quả. Chọn giá trị cho yếu tố thứ nhất, xong chuyển qua yếu tố tiếp theo.

Phải thực tiến hành nhiều thí nghiệm.

Không mô hình hóa được ảnh hưởng của các yếu tố.

Không đánh giá được tương tác giữa các yếu tố. Do đó kết quả chưa tối ưu cho tổng thể các yếu tố.

*Phương pháp quy hoạch yếu tố toàn phần hoặc bán toàn phần.*

Cho phép đánh giá được ảnh hưởng của các yếu tố và tương tác của chúng.

Các hoạch định yếu tố bán phần giúp giảm thiểu số lượng thí nghiệm, nhưng ảnh hưởng của các yếu tố có thể lẫn vào nhau.

Trong trường hợp này không có định hướng hoạch định thực nghiệm để làm rõ ảnh hưởng của các yếu tố quan trọng.

Phương pháp đòi hỏi hiểu biết nhiều về thống kê.

***d. Nguyên tắc cơ bản***

*Nguyên tắc không lấy toàn bộ đầu vào*

Lấy biến số rời rạc.

Chọn mức biến đổi thích hợp.

Sự lựa chọn cần có cơ sở toán học; gắn liền với hàm mô phỏng dạng bề mặt đáp ứng.

Dạng hàm mô phỏng thường là bậc một hoặc hai, do đó mức biến đổi thường là hai hoặc ba.

*Nguyên tắc phức tạp dần mô hình toán học*

Quan điểm thực nghiệm có trình tự.

Khi chưa có đầy đủ thông tin thì sử dụng mô hình đơn giản để giảm thiểu thời gian và chi phí.

Việc kiểm tra tính tương thích của mô hình là cần thiết để quyết định tiến hành mô hình phức tạp hơn.

*Nguyên tắc đối chứng với sai số*

Độ chính xác của mô hình phải tương xứng với độ lớn của sai số. Sai số càng nhỏ thì mô hình càng phải phức tạp. Sai số càng lớn thì nên xây dựng mô hình xây dựng đơn giản hơn.

*Nguyên tắc ngẫu nhiên hóa*

Thể hiện ở cách tiến hành thực nghiệm cho phép ngẫu nhiên hóa các yếu tố tác động lên đối tượng nghiên cứu một cách có hệ thống, nhưng không thể hoặc khó kiểm tra được để từ đó coi chúng như những đại lượng ngẫu nhiên và xử lý theo phương pháp thống kê.

Nhằm loại bỏ ảnh hưởng của các yếu tố không kiểm soát được được thực hiện bằng cách tiến hành các thực nghiệm trong qui hoạch theo nguyên tắc ngẫu nhiên hóa.

*Nguyên tắc tối ưu hóa qui hoạch thực nghiệm*

Kế hoạch thực nghiệm phải có những tính chất tối ưu nào đó theo quan điểm của một hay nhóm tiêu chuẩn tối ưu đã xác định trước của loại kế hoạch này.

Dạng cụ thể của tiêu chuẩn tối ưu phụ thuộc vào loại nhiệm vụ thực nghiệm, ý nghĩa, công cụ của kế hoạch Xu hướng "tiến hành ít thực nghiệm hơn - thu thập nhiều thông tin hơn - chất lượng kết quả cao hơn".

***e. Các bước thực hiện quy hoạch***

Thu thập thông tin tiên nghiệm.

Chọn đáp ứng và yếu tố khảo sát.

Chọn mô hình thực nghiệm. Xác định vùng khảo sát.

Thiết lập phương án giảm thiểu sai số.

Chọn độ lớn qui hoạch.

Xây dựng qui hoạch thực nghiệm.

Tiến hành thực nghiệm, thu thập thông tin.

Phân tích số liệu.

Đánh giá sự tương thích của mô hình thực nghiệm.

### *2.5.3. Phương pháp thực nghiệm quy hoạch trực giao cấp II*

Luận án này nghiên cứu ảnh hưởng của ít nhất 3 yếu tố công nghệ tới năng lượng tiêu thụ, độ chính xác kích thước và độ nhám bề mặt. Các thông số này không riêng biệt mà có sự tương tác lẫn nhau trong ảnh hưởng tới các mục tiêu cần xem xét. Do đó, luận án sử dụng phương pháp thực nghiệm quy hoạch trực giao cấp 2.

Đây là phương pháp quy hoạch phi tuyến, cấu trúc có tâm, số yếu tố ảnh hưởng là 3 yếu tố (chiều sâu cắt, tốc độ chạy dao và tốc độ trục chính), thông số bước dao ngang được cố định. Gọi $k$ là số yếu tố ảnh hưởng. $N$ là tổng số thí nghiệm cần thực hiện. Đại lượng $\alpha$ là khoảng cách từ tâm cấu trúc thực nghiệm đến vị trí các điểm trên trục tọa độ của cấu trúc [4] và $n_0$ là số thí nghiệm ở tâm phương án trực giao cấp 2. Quy ước các yếu tố ảnh hưởng theo các biến như sau: chiều sâu cắt $t(mm)$ là $x_1$, tốc độ chạy dao $F(mm/ph)$ là $x_2$, vận tốc cắt $v_c(m/ph)$ là $x_3$.

**a. Xây dựng ma trận thực nghiệm và lấy dữ liệu thực nghiệm**

Số thí nghiệm cần có cho phương án trực giao cấp II ứng với $k=3$ yếu tố là $N=15$ [4]. Đa thức bậc hai mô tả mối quan hệ giữa các đại lượng và yếu tố ảnh hưởng có dạng như sau:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + ... + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + ... + b_{(k-1)k}x_{(k-1)}x_k + b_{11}x_1^2 + ... + b_{kk}x_k^2 \quad (2.60)$$

Số hệ số $b_i, b_{(i-1)i}, b_{ii}, i = 1,..,k$ trong đa thức bậc hai được xác định theo công thức: $L = \frac{(k+1)(k+2)}{2} = 10$. Ma trận thực nghiệm cho cấu trúc có tâm với 3 yếu tố ảnh hưởng được thể hiện trong bảng 3.2 (áp dụng cho cả Bài toán 1 và Bài toán 2). Trong đó, $Y_{DK}, Y_{nham}, Y_{NL}$ lần lượt là các cột giá trị thực nghiệm tương ứng cần điền của đường kính, độ nhám và năng lượng.

*Bảng 2. 1. Ma trận thực nghiệm*

| TN | $x_0$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_1x_2$ | $x_1x_3$ | $x_2x_3$ | $x_1^2$ | $x_2^2$ | $x_3^2$ | $Y_{DK}, Y_{Nham}, Y_{NL}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | + | + | + | + | + | + | + | + | + | + | |
| 2 | + | - | + | + | - | - | + | + | + | + | |
| 3 | + | + | - | + | - | + | - | + | + | + | |
| 4 | + | - | - | + | + | - | - | + | + | + | |
| 5 | + | + | + | - | + | - | - | + | + | + | |
| 6 | + | - | + | - | - | + | - | + | + | + | |
| 7 | + | + | - | - | - | - | + | + | + | + | |
| 8 | + | - | - | - | + | + | + | + | + | + | |
| 9 | + | $\alpha$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\alpha^2$ | 0 | 0 | |
| 10 | + | $-\alpha$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\alpha^2$ | 0 | 0 | |
| 11 | + | 0 | $\alpha$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\alpha^2$ | 0 | |
| 12 | + | 0 | $-\alpha$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\alpha^2$ | 0 | |
| 13 | + | 0 | 0 | $\alpha$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\alpha^2$ | |
| 14 | + | 0 | 0 | $-\alpha$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $\alpha^2$ | |
| 15 | + | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

Để đảm bảo tính trực giao của ma trận thực nghiệm, tiến hành đổi biến ở cột có giá trị $x_j^2$ thành $x_j^{/}$ với $j = 1,..,k$ [4]. Ta có:

$$x_j^{/} = x_j^2 - \frac{2^k + 2\alpha^2}{N} = x_j^2 - 0.73 \qquad (2.61)$$

Ma trận thực nghiệm với biến mới được thể hiện trong Bảng 3.3.

*Bảng 2. 2. Ma trận thực nghiệm sau khi đổi biến*

| TN | $x_0$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_1x_2$ | $x_1x_3$ | $x_2x_3$ | $x_1^{'}$ | $x_2^{'}$ | $x_3^{'}$ | $Y_{DK}, Y_{Nham}, Y_{NL}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | |
| 2 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | |
| 3 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | |
| 4 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | |
| 5 | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | |
| 6 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | |
| 7 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | |
| 8 | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | 0.27 | 0.27 | 0.27 | |
| 9 | 1 | 1.215 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.746 | -0.73 | -0.73 | |
| 10 | 1 | -1.215 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.746 | -0.73 | -0.73 | |
| 11 | 1 | 0 | 1.215 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0.73 | 0.746 | -0.73 | |
| 12 | 1 | 0 | -1.215 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0.73 | 0.746 | -0.73 | |
| 13 | 1 | 0 | 0 | 1.215 | 0 | 0 | 0 | -0.73 | -0.73 | 0.746 | |
| 14 | 1 | 0 | 0 | -1.215 | 0 | 0 | 0 | -0.73 | -0.73 | 0.746 | |
| 15 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0.73 | -0.73 | -0.73 | |

Tiến hành thực nghiệm và ghi kết quả hàm mục tiêu vào các cột Y.

**b. Tính toán các hệ số phương trình hồi quy**

Phương trình hồi quy sau khi đổi biến có dạng:

$$\tilde{Y} = b_0^{/} + b_1x_1 + ... + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + ... + b_{(k-1)k}x_{(k-1)}x_k + b_{11}x_1^{/} + ... + b_{kk}x_k^{/} \qquad (2.62)$$

Các hệ số của phương trình hồi quy được xác định như sau:

$$\begin{cases} b_0^{/} = \dfrac{1}{N}\sum\limits_{u=1}^{N} y_0 x_{0u} \\ b_j = \dfrac{\sum\limits_{u=1}^{N} y_u x_{ju}}{\sum\limits_{u=1}^{N} x_{ju}^2} \end{cases} \quad \begin{cases} b_{jl} = \dfrac{\sum\limits_{u=1}^{N} y_u x_{lu} x_{ju}}{\sum\limits_{u=1}^{N} \left(x_{ju} x_{lu}\right)^2} \\ b_{jj} = \dfrac{\sum\limits_{u=1}^{N} y_u x_{ju}^{/}}{\sum\limits_{u=1}^{N} \left(x_{ju}^{/}\right)^2} \end{cases} ; \; j = 1,..,k; u = 1,..,N \qquad (2.63)$$

Phương sai của các hệ số trong phương trình hồi quy được tính:

$$\begin{cases} S_{b_0^{/}}^2 = \dfrac{S_{th}^2}{N} \\ S_{b_j}^2 = \dfrac{S_{th}^2}{\sum\limits_{u=1}^{N} x_{ju}^2} \end{cases} \quad \begin{cases} S_{b_{jl}}^2 = \dfrac{S_{th}^2}{\sum\limits_{u=1}^{N} \left(x_j x_l\right)_u^2} \\ S_{b_{jj}}^2 = \dfrac{S_{th}^2}{\sum\limits_{u=1}^{N} \left(x_{ju}^{/}\right)^2} \end{cases} ; j = 1,..,k; u = 1,..,N \qquad (2.64)$$

Trong đó, $S_{th}^2$ là phương sai tái hiện được tính theo $m$ lần lặp của thí nghiệm ở tâm:

$$S_{th}^2 = \frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{m}\left(y_i - \overline{y_i}\right)^2 \qquad (2.65)$$

**c. Kiểm tra ý nghĩa của các hệ số trong phương trình hồi quy**

Ma trận thực nghiệm sau khi đổi biến là ma trận trực giao nên các hệ số $b$ trong phương trình hồi quy (PTHQ) được kiểm tra theo chuẩn Student [138]. Tính hệ số thực nghiệm $t_{tn}$ :

$$t_{tn} = \frac{\left|b_j\right|}{S_{b_j}} \qquad (2.66)$$

Tra bảng chuẩn tìm chỉ tiêu Student $t_s(1-p, f)$. Trong đó, $p$ là xác suất tin cậy (thường chọn $p = 0.95 \div 0.98$), $f$ là số mức độ tự do cho $m$ lần thí nghiệm ở tâm:

$$f = m - 1 \tag{2.67}$$

Sau đó, so sánh $t_{tn}$ và $t_s(1-p, f)$ để tìm ra các hệ số có nghĩa và viết lại phương trình hồi qui.

**d. Kiểm tra tính tương thích của phương trình hồi quy với thực nghiệm**

Tính tương thích của phương trình hồi quy được kiểm tra theo tiêu chuẩn Fisher [138]. Đầu tiên, chỉ tiêu Fisher ($F_{tn}$) được xác định:

$$F_{tn} = \frac{S_{tt}^2}{S_{th}^2} \tag{2.68}$$

Phương sai tương thích được tính:

$$S_{\text{tt}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} (y_i - \overline{y}_i)^2}{N - N^*} \tag{2.69}$$

Trong đó, $N^*$ là số hệ số có nghĩa trong phương trình hồi qui, $y_i$ là giá trị đo được trong thực nghiệm ở thí nghiệm thứ $i, i = 1,..,m$ và $\overline{y}_i$ là giá trị tính toán theo phương trình hồi quy ở thí nghiệm thứ $i, i = 1,..,m$. Tính số mức độ tự do của phân tán lớn $f_1 = N - g - 1$ với $g$ là số hệ số có nghĩa của phương trình hồi quy, không kể hệ số tự do $b_0^/$ và tính số mức độ tự do của phân tán nhỏ $f_2 = m - 1$. Tra bảng Fisher [138] cho chỉ tiêu $F_{1-p}(f_1, f_2)$ và so sánh với giá trị $F_{tn}$ để kết luận tính tương thích của phương trình hồi quy. Nếu $F_{tn} < F_{1-p}(f_1, f_2)$ thì phương trình hồi quy tương thích, có nghĩa mô hình toán học được dùng hoàn toàn miêu tả được bản chất quá trình. Ngược lại thì PTHQ không tương thích.

## Kết luận chương 2

Như vậy, dựa trên những nghiên cứu tổng quan từ Chương 1, một số vấn đề mang tính chất cơ sở lý thuyết phục vụ cho giải quyết các bài toán của luận án đã được trình bày trong chương này. Cụ thể:

+ Vấn đề về năng lượng tiêu thụ và phương pháp tính toán loại năng lượng này trên máy CNC đã được xem xét giải quyết. Từ đó nhận định được phương án xác định năng lượng tiêu thụ phù hợp với điều kiện cụ thể của luận án. Đó là sử dụng phương pháp thực nghiệm.
+ Vấn đề về độ nhám bề mặt được xem xét theo trình tự: vị trí, vai trò của yếu tố này trong đánh giá chất lượng sản phẩm, phân nhóm các yếu tố ảnh hưởng và các công trình nghiên cứu liên quan.
+ Vấn đề về sai số kích thước trong gia công được trình bày dựa trên vị trí của nó trong hệ thống các sai số gia công, ý nghĩa của yếu tố này trong gia công cao tốc, các yếu tố ảnh hưởng và khả năng đạt được. Một số công trình nghiên cứu đã công bố cũng được nhắc đến.
+ Bài toán tối ưu đơn mục tiêu và đa mục tiêu được mô tả như là một phương án tốt nhất để chọn lựa được các bộ thông số công nghệ phù hợp nhất đáp ứng các yêu cầu gia công đặt ra từ trước. Các bước thực hiện bài toán cũng được thể hiện đầy đủ.
+ Cuối cùng, bài toán thực nghiệm và phương pháp xây dựng phương trình hồi quy được trình bày đầy đủ nhằm chuẩn bị đầy đủ các bước tiến hành mang tính logic và khoa học cho các nội dung chương sau.

# CHƯƠNG 3. THỰC NGHIỆM PHAY CAO TỐC THÉP HỢP KIM SAU NHIỆT LUYỆN

Chương này tập trung giải quyết các vấn đề:

Xây dựng bài toán thực nghiệm theo mô hình thực nghiệm Box-Wilson và phương pháp quy hoạch thực nghiệm trực giao cấp 2 với các trang thiết bị thực nghiệm và đo lường theo điều kiện thực tế hiện có.

Xây dựng mô hình toán học mô tả mối quan hệ của các thông số công nghệ tới năng lượng tiêu thụ, độ chính xác gia công và độ nhám bề mặt.

Sử dụng modul Phân tích phương sai (ANOVA) trên phần mềm DESIGN EXPERT 12 để kiểm tra các kết quả tính toán từ phương pháp quy hoạch trực giao cấp 2.

Đánh giá sơ bộ ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới các đại lượng.

## 3.1. Bài toán thực nghiệm phay cao tốc thép sau nhiệt luyện

### *3.1.1. Mục tiêu và bài toán thực thực nghiệm*

Mục tiêu thực nghiệm phay cao tốc thép sau nhiệt luyện nhằm thu thập dữ liệu các thông số đầu vào (chế độ công nghệ và các yếu tố khác) và các thông số đầu ra (năng lượng tiêu thụ trong quá trình gia công, độ nhám bề mặt và độ chính xác kích thước) nhằm xác định mối quan hệ giữa các yếu tố đầu vào, đầu ra kể trên thông qua các hàm toán học.

Bài toán thực nghiệm được xác định như sau:

**a. Đầu vào bài toán thực nghiệm**

Loại hình gia công cắt gọt: phay cao tốc trên trung tâm gia công phay chuyên dụng DMG-DMC1450V.

Kết cấu gia công: phay cao tốc hốc tròn, lỗ không thông.

Vật liệu phôi: thép hợp kim SKD11 [119]

Độ cứng phôi sau nhiệt luyện: 55 HRC

Đồ gá gia công: Eto đi kèm thiết bị gia công

Dụng cụ cắt: dao phay cao tốc chuyên dụng YG SGN09080H.

Thiết bị đo lường: thiết bị đo năng lượng, thiết bị đo độ nhám và dụng cụ đo kích thước.

Thông số chế độ công nghệ: chiều sâu cắt t (mm), tốc độ chạy dao F (m/phút), tốc độ trục chính n (vòng/phút) hay vận tốc cắt Vc (m/phút) và lượng chạy dao ngang ($a_p$ mm). Trong đó, lượng chạy dao ngang là thông số cố định, chưa được xem xét trong luận án này.

**Bài thực nghiệm số 1:** đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới năng lượng tiêu thụ khi phay thô cao tốc hốc tròn từ D16mm đến D21.8mm.

**Bài thực nghiệm số 2:** đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ chính xác đường kính và độ nhám thành của hốc tròn khi phay tinh cao tốc hốc từ D21.8mm đến D22mm.

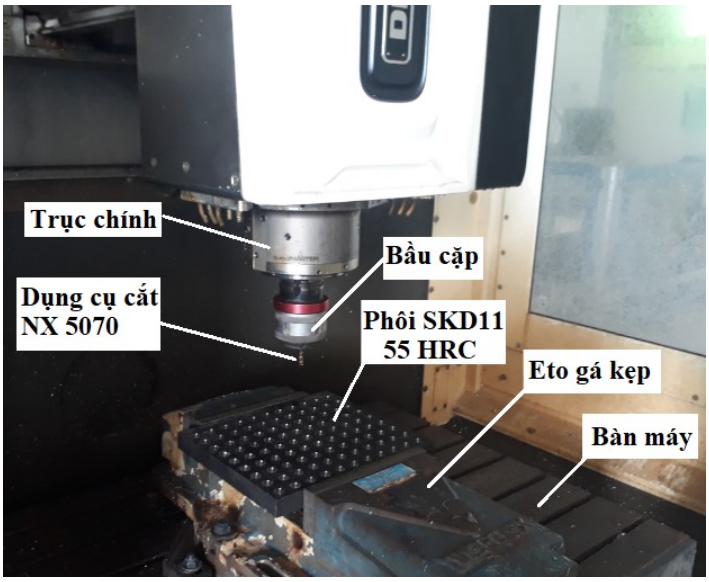
**b. Đầu ra bài toán thực nghiệm**

Cần xác định ba yếu tố:

Một là, năng lượng tiêu thụ khi phay thô cao tốc trên trung tâm CNC.

Hai là độ chính xác kích thước đường kính hốc tròn (phay tinh cao tốc)

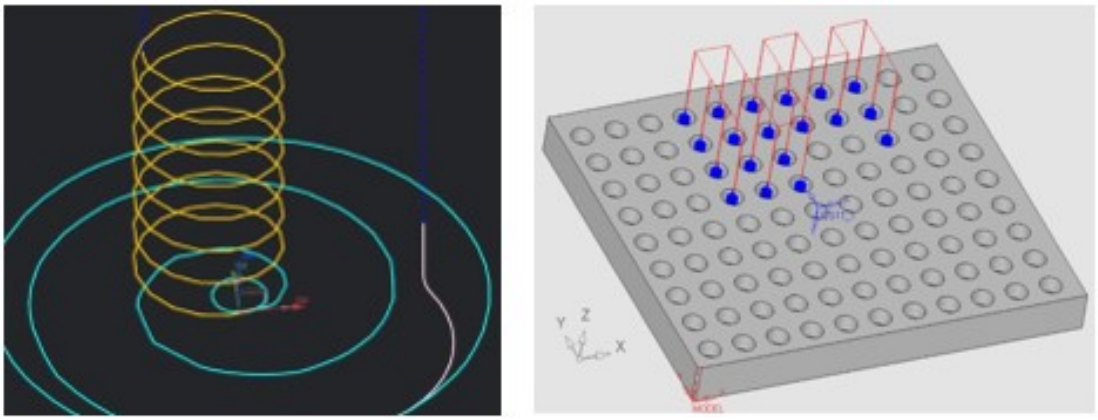
Ba là, độ nhám bề mặt thành hốc tròn (phay tinh cao tốc).




*Hình 3. 1. Mô hình phay thực nghiệm*

Chú ý rằng, độ chính xác kích thước có thể được đại diện thông qua xác định sai số chế tạo so với kích thước danh nghĩa.

Căn cứ vào kết quả thực nghiệm, xây dựng các hàm toán học mô tả mối quan hệ giữa các thông số chế độ cắt (chiều sâu cắt, tốc độ chạy dao, tốc độ trục chính) với năng lượng tiêu thụ trong quá trình gia công, độ nhám bề mặt thành hốc tròn và độ chính xác kích thước đường kính hốc. Hình 3.1 thể hiện cụ thể mô hình thực nghiệm. Hình 3.2 mô tả chu trình gia công phay hốc tròn cao tốc.



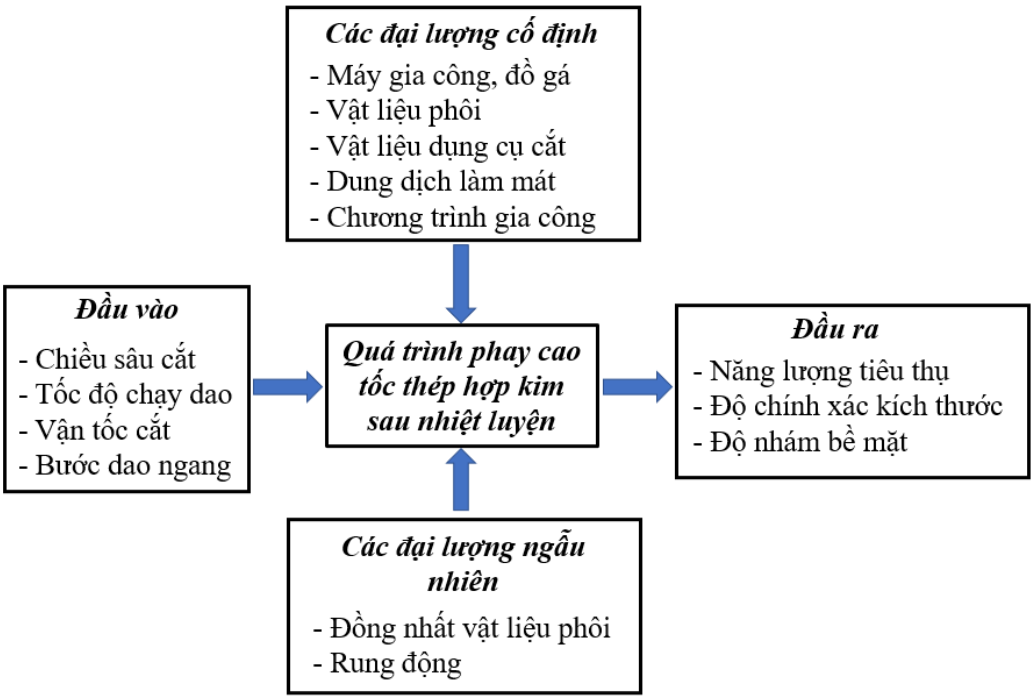
*Hình 3. 2. Chiến lược phay hốc tròn trên Unigraphic (NX)*

### *3.1.2. Mô hình thực nghiệm*

#### *a. Sơ đồ thực nghiệm*

Quá trình thực nghiệm được mô tả như sơ đồ hình 3.3. Cần xác định rằng, bài toán thực nghiệm càng có nhiều đầu vào thì kết quả nghiên cứu càng gần với thực tế gia công. Tuy nhiên, việc tăng số lượng đầu vào sẽ xuất hiện nhiều trở ngại như kiểm soát, đo lường các thông số, hệ thống thiết bị phụ trợ đi kèm trở nên phức tạp. Do đó, dựa trên nhiều kết quả nghiên cứu được công bố trước đó, kinh nghiệm sản xuất thực tiễn thì chỉ chọn các thông số đầu vào gây ảnh hưởng chính tới các mục tiêu đầu ra cần xem xét. Không những thế, các yếu tố đầu vào này có thể được đo đạc, kiểm soát và điều chỉnh được. Sau khi đã xác định được mối quan hệ giữa các yếu tố đầu vào cơ bản với các đầu

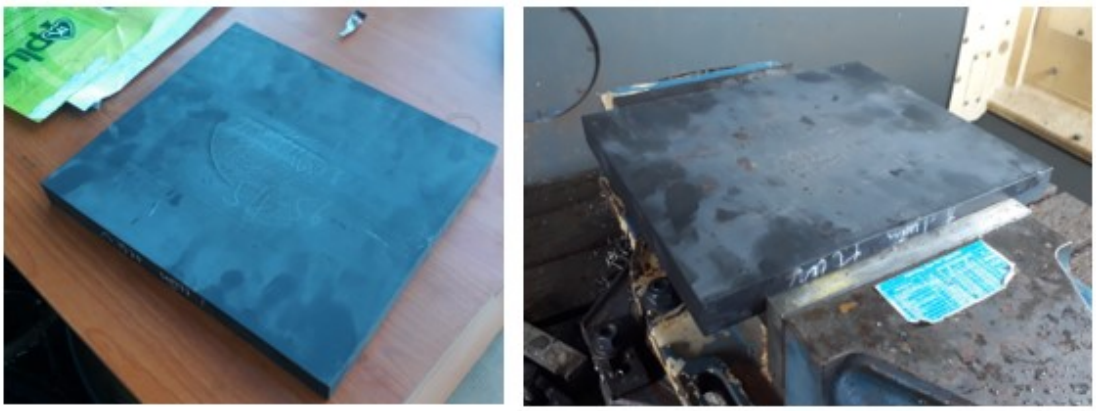
ra, ta có thể mở rộng nghiên cứu để xem xét ảnh hưởng của các yếu tố đầu vào khác.




*Hình 3. 3. Sơ đồ phay thực nghiệm*

***b. Phôi gia công***

Phôi gia công dạng hình hộp chữ nhật, kích thước (Dài x Rộng x Cao) 300mm x 250mm x 25mm (Hình 3.4).



*Hình 3. 4. Phôi thép hợp kim SKD11 sau nhiệt luyện*

Vật liệu phôi thực nghiệm là thép hợp kim sau nhiệt luyện SKD11 (Tiêu chuẩn Nhật JIS G4404) thường được sử dụng trong gia công khuôn mẫu bởi độ

cứng cao (55HRC), độ bền nén cao, độ dai va đập và chống biến dạng tốt [119]. Phôi thép tiêu chuẩn SKD11 được cung cấp bởi Công ty Thép Đặc biệt Quang Minh (Bến Thành, Q1, TPHCM). Thành phần hóa học của phôi thép hợp kim sau nhiệt luyện SKD11 được thể hiện trong Bảng 3.1.

*Bảng 3. 1. Thành phần hóa học của phôi thép hợp kim SKD11*

| **Ký hiệu** | C (%) | Si (%) | Mn (%) | Cr (%) | Mo (%) | V (%) | P (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **SKD11** | 1.4-1.6 | ≤0.6 | ≤0.6 | 11-13 | 0.7-1.2 | ≤1.1 | ≤0.03 |

Phôi được nhiệt luyện tại Công ty cổ phần FELIX Việt Nam (Khu Công nghệ cao, Hòa Lạc, Hà Nội) với thiết bị Turbo-IPSEN/ Đức (Hình 3.5) và đo độ cứng trên thiết bị FR-1E/Hard Machine (Hình 3.6). Kết quả đo độ cứng với giá trị trung bình của phôi thép hợp kim SKD11 sau nhiệt luyện đạt 55 HRC.

*Hình 3. 5. Thiết bị nhiệt luyện Turbo-IPSEN/Đức*

*Hình 3. 6. Máy đo độ cứng FR-1E/Hard Machine*

***c. Trung tâm gia công phay DMG-DMC1450V***

Quá trình phay thực nghiệm được thực hiện trên trung tâm gia công phay DMG-DMC1450V (Hình 3.7) tại Xưởng Chế thử Cơ khí, Trung tâm Công nghệ, HVKTQS.

Trung tâm gia công phay CNC model DMC1450V do hãng DMG MORI sản xuất năm 2018 tại Đức. Máy có hành trình các trục X = 1450mm, Y = 700mm, Z = 550mm, khoảng cách từ mặt trục chính tới bàn làm việc từ 150mm tới 700mm, kích thước bàn làm việc 1760mm x 750mm, tải trọng phôi tối đa 2000kg. Tốc độ chạy dao tối đa theo X, Y, Z đạt 42.000 mm/phút, tốc độ trục chính đạt tối đai 20.000 vòng/phút, công suất trục chính đạt 35 kW, lực tải trên các trục tối đa X, Y, Z đạt 6.5 kN. Độ chính xác vị trí tối đa đạt 6µm (Theo tiêu chuẩn VDI/DGQ 3441), hệ thống thao dao tự động với 20 vị trí thay dao SK40, đường kính dao tối đa 80 mm (đạt 130 mm nếu không có dao bên cạnh). Hệ thống làm mát bằng dung dịch, nguồn điện yêu cầu 400 V/50 Hz/3-phase/ N/ PE. Dao động nguồn điện cho phép 10%.

*Hình 3. 7. Trung tâm gia công DMG-DMC1450V*

***d. Dụng cụ cắt***

Thực nghiệm sử dụng dao phay hợp kim cao tốc chuyên dụng của hãng YG. Mã ký hiệu dụng cụ cắt NX5070 SGNF09080H, đường kính phần cắt $D_1$=8mm, đường kính chuôi dao $D_2$=8mm, chiều dài phần cắt $L_1$=20mm, chiều dài tổng của dao $L_2$=65mm, 4 răng cắt (Hình 3.8).

*Hình 3. 8. Dao phay cao tốc YG SGN09080H [139]*

Hình 3.9 thể hiện các thông số cắt tham khảo theo hướng dẫn của nhà sản xuất dụng cụ cắt. Theo đó, với thép SKD11 sau nhiệt luyện đạt độ cứng từ 50 HRC đến 55 HRC, đường kính phần cắt của dụng cụ là $D_1 = 8mm$ thì nên chọn chế độ cắt với chiều sâu cắt lớn nhất $t = 1D_1$, tốc độ trục chính $n = 5200(vg/ph)$, tốc độ chạy dao $F = 900(mm/ph)$. Các thông số này cũng là một trong những cơ sở chính để chọn lựa miền chế độ cắt cho bài toán thực nghiệm.

| Thông số | Thép trước nhiệt luyện | | Thép sau nhiệt luyện | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | PREHARDENED STEELS [NAK, CENA, KP4] | | HARDENED STEELS [SKD, SKT, STAVAX] | | | |
| Độ cứng | HRc 30 ~ HRc 40 | | HRc 40 ~ HRc 50 | | HRc 50 ~ HRc 55 | |
| Đường kính dao | RPM | FEED | RPM | FEED | RPM | FEED |
| 1.0 | 48000 | 1480 | 38000 | 1050 | 25500 | 710 |
| 2.0 | 33300 | 1750 | 26000 | 1250 | 17500 | 840 |
| 3.0 | 21800 | 1750 | 17300 | 1250 | 11500 | 840 |
| 4.0 | 16700 | 1800 | 13200 | 1300 | 8800 | 880 |
| 5.0 | 15700 | 2000 | 12500 | 1500 | 8300 | 1000 |
| 6.0 | 13100 | 1950 | 10350 | 1400 | 6900 | 950 |
| 8.0 | 9880 | 1880 | 7800 | 1350 | 5200 | 900 |
| 10.0 | 7800 | 1750 | 6150 | 1260 | 4100 | 840 |
| 12.0 | 6650 | 1750 | 5250 | 1260 | 3500 | 840 |

*Hình 3. 9. Chế độ cắt tham khảo theo Nhà sản xuất YG [139]*

***e. Đồ gá***

Phôi thực nghiệm có dạng hình hộp nên đồ gá định vị và kẹt chặt có thể dùng ETO đi kèm theo máy gia công (Hình 3.1).

***f. Thiết bị đo năng lượng tiêu thụ***

Năng lượng tiêu thụ của máy CNC trong quá trình gia công được xác định gián tiếp thông qua công suất tiêu thụ của máy theo thời gian.

Công suất của máy được xác định dựa trên đo giá trị điện áp hiệu dụng và cường độ dòng điện hiệu dụng của máy CNC. Vì vậy, thiết bị đo năng lượng được dùng là hệ thống đo MAVOWATT 230 [140] (hình 3.10) và các thiết bị đo điện áp Kaise, cường độ dòng điện hiệu dụng Extech [141] (hình 3.11).

*Hình 3. 10. Thiết bị đo năng lượng MAVOWATT [140]*

*Hình 3. 11. Thiết bị đo điện áp và dòng tổng hiệu dụng [141]*

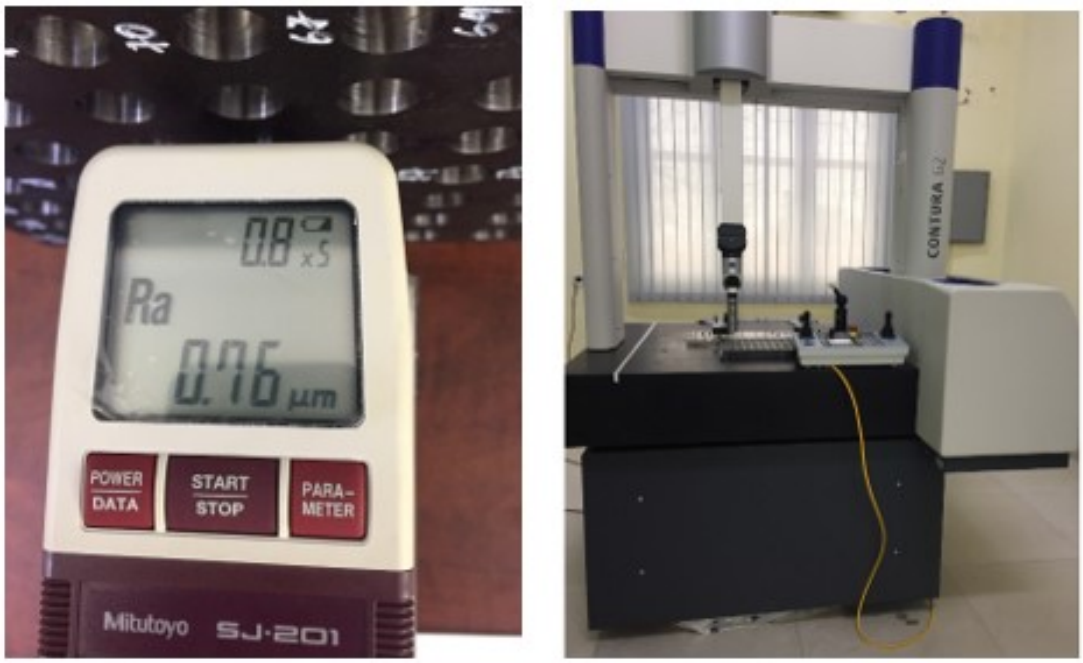
***g. Thiết bị đo độ nhám***

Sử dụng thiết bị đo độ nhám của hãng Mitutoyo SJ-201 [142]. Kết quả được hiển thị trên màn hình LCD, bộ phận đo có thể tách rời bộ hiển thị, cho phép đo các loại hình chi tiết có kết cấu phức tạp; Dải đo rộng 350µm (-200µm đến + 150µm); Các thông số về độ nhám đáp ứng các tiêu chuẩn ISO, DIN, ANSI và JIS; Phân tích được 19 tham số, trong đó đảm bảo đo Ra, Rq, Rz và

Ry cơ bản; Tự động hiệu chuẩn để điều chỉnh độ lợi đơn giản khi đo; Có thể truyền dữ liệu đo sang máy tính và các thiết bị ngoại vi khác; Nguồn AC hoặc Pin (hình 3.12).

***h. Thiết bị đo kích thước***

Máy đo CMM Contura G2 – Đức [143]. Máy có thể quét chủ động và cảm biến đa điểm. Số điểm quét lên đến 200 points/s. Lực đo biến đổi (50-1000 mN). Chiều dài kim đo max = 500 mm, Khối lượng kim đo max= 500g bao gồm đế gắn kim đo; đường kính kim đo nhỏ nhất = 0.5 mm. Giới hạn đo X, Y, Z tương ứng 700-1000mm, 1200 – 2000mm và 600mm. Sai số tuyến tính theo chiều dài đo MPE theo ISO 10360 -2: 2009 đạt 1.8 µm với chiều dài đo L=300mm, sai số lặp lại đạt 1.4 µm (hình 3.12).




*Hình 3. 12. Thiết bị đo độ nhám [142] và máy đo CMM [143]*

### *3.1.2. Các bước tiến hành thực nghiệm*

***a. Gia công thử***

***Mục đích:*** đánh giá khả năng gia công của hệ thống công nghệ đối với phôi thép hợp kim SKD11 đã qua nhiệt luyện đạt độ cứng 55HRC và chế độ công nghệ với mức cao. Cụ thể, gia công phay cao tốc thô hốc tròn từ phôi đặc

đạt đường kính D=15.6 mm. Phay tinh cao tốc từ đường kính từ D=15.6mm đạt D=16mm.

Chế độ công nghệ khi phay thô: t=0.2 mm, F=800 mm/phút, Vc=130 m/phút, n=5200 vòng/phút, bước dao ngang ap=0.2mm.

Chế độ công nghệ khi phay tinh: t=10 mm, F=800 mm/phút, Vc=130 m/phút, n=5200 vòng/phút.

***Kết quả gia công thử:***

Khi gia công thô: ban đầu hệ thống máy chạy êm, rung động nhỏ, tiếng gia công đều, lực cắt hiển thị theo 2 trục X và Y đạt lớn nhất 15% lực cắt tối đa, lực cắt theo trục Z đạt tối đa 23% lực cắt tối đa. Tuy nhiên, sau lỗ thứ 3, hệ thống bắt đầu có hiện tượng ồn, rung động tăng, lực cắt tăng theo các trục trên 25%. Dừng máy, kiểm tra và nhận thấy dụng cụ cắt mòn nhanh, các răng cắt không đảm bảo hình dáng hình học ban đầu. Không còn khả năng cắt gọt thông thường. Đo kích thước đường kính các lỗ gia công đầu tiên bằng thước cặp hiển thị số Mitutoyo (dung sai cho phép 0.01 mm), kết quả cho thấy, sai lệch kích thước các lỗ không vượt quá 0.05mm.

*Hình 3. 13. Vị trí các lỗ gia công*

Tiến hành giảm tốc độ trục chính xuống n=4000 vòng/phút và tốc độ chạy dao giảm xuống F=500 mm/phút, hệ thống công nghệ chạy êm hơn, gia công được 8 lỗ thì bắt đầu xuất hiện tiếng ồn và rung động tăng. Dừng máy,

kiểm tra và nhận thấy dụng cụ cắt mòn. Đo đường kính các lỗ đợt 2, dung sai kích thước các lỗ không vượt quá 0.05mm. Khi gia công tinh, hệ thống máy chạy êm, rung nhẹ, đều. Lực cắt theo 2 trục X và Y lớn nhất đạt 8%, lực cắt theo trục Z đạt lớn nhất 13%. Số lượng lỗ gia công tinh thử nghiệm tối đa 20 lỗ, sai lệch kích thước đường kính không vượt quá 0.05mm (hình 3.13).

**Kết luận**:

Như vậy, bước gia công thử đã cho phép đánh giá khả năng của hệ thống công nghệ cũng như của chế độ cắt thử nghiệm theo khuyến cáo của hãng chế tạo dụng cụ cắt ứng với vật liệu được gia công.

Gia công phay thô cao tốc hốc tròn từ phôi đặc không cho thấy sự khả thi về hiệu quả gia công do tốn kém chi phí về dụng cụ cắt. Nguyên nhân nằm ở những thời điểm đầu khi gia công, dụng cụ cắt phải chịu lực cắt rất lớn do toàn bộ mặt đầu dao cụ (phần mặt đầu răng cắt) tiếp xúc với bề mặt phôi lớn, dẫn đến mặt đầu dụng cụ cắt mòn nhanh, lượng tiếp xúc của các răng cắt bên thành dao tham gia cắt gọt không nhiều ở giai đoạn đầu nên không xuất hiện dạng hỏng ở thân dao.

**Giải pháp**: tiến hành khoan mồi tất cả các lỗ thực nghiệm đạt đến kích thước D=16mm. Sau đó, tiến hành phay thô cao tốc từ D=16mm đến D=21.8mm.

Về phần phay tinh cao tốc thử, hệ thống làm việc ổn định, có thể áp dụng các chế độ cắt trong giới hạn khuyến cáo của nhà sản xuất.

**b. Lựa chọn miền thông số và xét mức cơ bản của thực nghiệm**

Trên cơ sở nghiên cứu các công bố trước đây về gia công cao tốc các loại vật liệu khác nhau, độ cứng khác nhau, đánh giá về khả năng gia công của vật liệu SKD11 với HRC55, khả năng gia công của máy CNC, miền thông số cắt khuyến cáo của nhà sản xuất dụng cụ cắt và kết quả gia công thử, miền giới hạn các thông số cắt thực nghiệm được lựa chọn cụ thể như sau:

**Bài thực nghiệm số 1:** đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới năng lượng tiêu thụ khi phay thô cao tốc hốc tròn từ D16mm đến D21.8mm.

Xét chiều sâu cắt $t(mm)$: mức thấp $t = 1mm$, mức cơ bản $t_0 = 3mm$ và mức cao $t = 5mm$. Với khoảng biến thiên $\Delta t = 2mm$. Trong không gian mở rộng của quy hoạch trực giao bậc 2 với bài toán thực nghiệm 3 yếu tố ($k = 3$) thì giá trị $\alpha = 1.215$ [4]. Lúc này, tính các giá trị giới hạn mở rộng như sau:

$$\alpha = \frac{t_{\max} - t_0}{\Delta t}; -\alpha = \frac{t_{\min} - t_0}{\Delta t}; \quad (3.1)$$

Suy ra: $t_{\max} = 5.43mm; t_{\min} = 0.57mm$. Với đường kính dao phay $D = 8mm$, ta chuyển giá trị vận tốc cắt $V_c(m/phut)$ tương ứng với tốc độ trục chính $n(vg/phut)$ để thuận lợi cho việc mô tả các giá trị thực tế.

Tính toán tương tự, tốc độ chạy dao $F(mm/ph)$, mức thấp $F = 400(mm/ph)$, mức cơ bản $F = 500(mm/ph)$ và mức cao $F = 600(mm/ph)$, khoảng biến thiên $\Delta F = 100(mm/ph)$.

Tốc độ trục chính $n(vg/ph)$, mức thấp $n = 2400(vg/ph)$, mức cơ bản $n = 3200(vg/ph)$ và mức cao $n = 4000(vg/ph)$, khoảng biến thiên $\Delta n = 800(vg/phut)$, các thông số được thể hiện cụ thể trong Bảng 3.2.

*Bảng 3. 2. Miền giới hạn thông số công nghệ cho Bài toán thực nghiệm số 1*

| **Thông số công nghệ** | **Giới hạn dưới ($-\alpha$)** | **Mức thấp (-1)** | **Mức cơ bản (0)** | **Mức cao (+1)** | **Giới hạn trên ($\alpha$)** | **Các biến tương ứng** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $t(mm)$ | 0.57 | 1 | 3 | 5 | 5.43 | $x_1$ |
| $F(\frac{mm}{ph})$ | 378.5 | 400 | 500 | 600 | 621.5 | $x_2$ |
| $v_c(\frac{m}{ph})$ | 55 | 60.3 | 80.4 | 100.5 | 105 | $x_3$ |

*Bảng 3.2. Miền giới hạn thông số công nghệ cho Bài toán thực nghiệm số 1 (tiếp)*

| Thông số công nghệ | Giới hạn dưới ($-\alpha$) | Mức thấp (-1) | Mức cơ bản (0) | Mức cao (+1) | Giới hạn trên ($\alpha$) | Các biến tương ứng |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $n(\frac{vg}{ph})$ | 2188 | 2400 | 3200 | 4000 | 4181 | |
| $a_p(mm)$ | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | |

**Bài thực nghiệm số 2:** đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới độ chính xác đường kính và độ nhám thành của hốc tròn khi phay tinh cao tốc hốc từ D21.8mm đến D22mm.

Với chiều sâu cắt $t(mm)$: mức thấp $t = 3mm$, mức cơ bản $t_0 = 6mm$ và mức cao $t = 9mm$, khoảng biến thiên $\Delta t = 3mm$.

Với tốc độ chạy dao $F(mm/ph)$, mức thấp $F = 600(mm/ph)$, mức cơ bản $F = 700(mm/ph)$ và mức cao $F = 800(mm/ph)$, khoảng biến thiên $\Delta F = 100(mm/ph)$.

Với tốc độ trục chính $n(vg/ph)$, mức thấp $n = 4000(vg/ph)$, mức cơ bản $n = 4800(vg/ph)$ và mức cao $n = 5600(vg/ph)$, khoảng biến thiên $\Delta n = 800(mm/phut)$. Các thông số được thể hiện cụ thể trong Bảng 3.3.

*Bảng 3. 3. Miền giới hạn thông số cắt thực nghiệm cho bài toán 2*

| Thông số công nghệ | Giới hạn dưới ($-\alpha$) | Mức thấp (-1) | Mức cơ bản (0) | Mức cao (+1) | Giới hạn trên ($\alpha$) | Các biến tương ứng |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $t(mm)$ | 2.25 | 3 | 6 | 9 | 9.75 | $x_1$ |

*Bảng 3.3. Miền giới hạn thông số cắt thực nghiệm cho bài toán 2 (tiếp)*

| Thông số công nghệ | Giới hạn dưới ($-\alpha$) | Mức thấp (-1) | Mức cơ bản (0) | Mức cao (+1) | Giới hạn trên ($\alpha$) | Các biến tương ứng |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $F(\frac{mm}{ph})$ | 575 | 600 | 700 | 800 | 825 | $x_2$ |
| $v_c(\frac{m}{ph})$ | 95.5 | 100.5 | 120.6 | 140.7 | 145.7 | $x_3$ |
| $n(\frac{vg}{ph})$ | 3800 | 4000 | 4800 | 5600 | 5800 | $x_3$ |

**c. Tiến hành gia công thực nghiệm**

Tiến hành thực hiện gia công các lỗ theo 2 bài toán đã nêu ở trên.

*Bảng 3. 4. Thông số công nghệ khi phay thô*

| TT | t (mm) | F (mm/ph) | V (vg/ph) | $Y_{NL}$ (kWh) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 600 | 4000 | |
| 2 | 1 | 600 | 4000 | |
| 3 | 5 | 400 | 4000 | |
| 4 | 1 | 400 | 4000 | |
| 5 | 5 | 600 | 2400 | |
| 6 | 1 | 600 | 2400 | |
| 7 | 5 | 400 | 2400 | |
| 8 | 1 | 400 | 2400 | |
| 9 | 5.43 | 500 | 3200 | |
| 10 | 0.57 | 500 | 3200 | |
| 11 | 3 | 621.5 | 3200 | |
| 12 | 3 | 378.5 | 3200 | |
| 13 | 3 | 500 | 4181 | |

*Bảng 3.4. Thông số công nghệ khi phay thô (tiếp)*

| TT | t (mm) | F (mm/ph) | V (vg/ph) | $Y_{NL}$ (kWh) |
|---|---|---|---|---|
| 14 | 3 | 500 | 2188 | |
| 15 | 3 | 500 | 3200 | |
| 16 | 3 | 500 | 3200 | |
| 17 | 3 | 500 | 3200 | |
| 18 | 3 | 500 | 3200 | |
| 19 | 3 | 500 | 3200 | |

Chế độ công nghệ được xác định tương ứng với các mức như đã xác định ở bảng ma trận thực nghiệm. Cụ thể được thể hiện như ở bảng 3.4 và bảng 3.5. Chú ý rằng, các thí nghiệm từ lỗ số 16 đến lỗ số 19 là các thí nghiệm ở tâm, nhằm mục đích tính phương sai tái hiện $S_{th}$.

*Bảng 3. 5. Thông số công nghệ khi phay tinh*

| TT | t (mm) | F (mm/ph) | V (vg/ph) | $Y_{ss}$, $Y_{nham}$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 9 | 800 | 5600 | |
| 2 | 3 | 800 | 5600 | |
| 3 | 9 | 600 | 5600 | |
| 4 | 3 | 600 | 5600 | |
| 5 | 9 | 800 | 4000 | |
| 6 | 3 | 800 | 4000 | |
| 7 | 9 | 600 | 4000 | |
| 8 | 3 | 600 | 4000 | |
| 9 | 9.75 | 700 | 4800 | |
| 10 | 2.25 | 700 | 4800 | |
| 11 | 6 | 825 | 4800 | |
| 12 | 6 | 575 | 4800 | |

*Bảng 3.5. Thông số công nghệ khi phay tinh (tiếp)*

| TT | t (mm) | F (mm/ph) | V (vg/ph) | $Y_{ss}$, $Y_{nham}$ |
|---|---|---|---|---|
| 13 | 6 | 500 | 5800 | |
| 14 | 6 | 500 | 3800 | |
| 15 | 6 | 500 | 3200 | |
| 16 | 6 | 500 | 3200 | |
| 17 | 6 | 500 | 3200 | |
| 18 | 6 | 500 | 3200 | |
| 19 | 6 | 500 | 3200 | |

### *3.1.3. Thu thập kết quả thực nghiệm*

Giá trị năng lượng tiêu hao được đo ngay trong giai đoạn gia công thô. Kết quả đo năng lượng được trình bày cụ thể trong phần phụ lục.

Chi tiết sau gia công tinh được đưa lên máy đo CMM để tiến hành đo kích thước đường kính. Mỗi lỗ được đo đường kính 3 lần ở ba vị trí cách nhau $120^0$ trên 2 vị trí cách miệng lỗ 3mm và 6mm. Giá trị đường kính mỗi lỗ thu được là kết quả tính trung bình của các lần đo.

Độ nhám trên thành của các lỗ được đo ở 3 vị trí khác nhau theo chiều dài tiêu chuẩn của thiết bị đo. Kết quả đo độ nhám được lấy là giá trị trung bình các lần đo.

Kết quả thực nghiệm thể hiện trong Bảng 3.6. Theo đó, sai số đường kính lỗ được xác định là $Y_{ss} = Y_{DK} - Y_0$. Trong đó, $Y_{DK}$ là giá trị đường kính thực nghiệm, $Y_0 = 22mm$ là giá trị đường kính danh nghĩa.

*Bảng 3. 6. Kết quả thực nghiệm*

| TN | $Y_{NL}$ (Kwh) | $Y_{DK}$ (mm) | $Y_{ss}$ (mm) | $Y_{Nham}$ (µm) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.065700 | 21.999996 | -0.000004 | 0.540000 |
| 2 | 0.314000 | 21.952938 | -0.047062 | 0.470000 |

*Bảng 3.6. Kết quả thực nghiệm (tiếp)*

| TN | $Y_{NL}$ (Kwh) | $Y_{DK}$ (mm) | $Y_{ss}$ (mm) | $Y_{Nham}$ (µm) |
|---|---|---|---|---|
| 3 | 0.104900 | 22.037531 | 0.037531 | 0.480000 |
| 4 | 0.484600 | 21.953934 | -0.046066 | 0.600000 |
| 5 | 0.072500 | 22.034254 | 0.034254 | 0.700000 |
| 6 | 0.300900 | 22.047239 | 0.047239 | 0.770000 |
| 7 | 0.099000 | 22.048250 | 0.048250 | 0.845000 |
| 8 | 0.509600 | 21.950125 | -0.049875 | 0.900000 |
| 9 | 0.066000 | 22.040890 | 0.040890 | 0.735000 |
| 10 | 0.679600 | 21.951627 | -0.048373 | 0.830000 |
| 11 | 0.113100 | 22.018668 | 0.018668 | 0.395000 |
| 12 | 0.204300 | 22.020412 | 0.020412 | 0.495000 |
| 13 | 0.166300 | 22.026044 | 0.026044 | 0.575000 |
| 14 | 0.158400 | 22.025781 | 0.025781 | 0.645000 |
| 15 | 0.147500 | 22.029272 | 0.029272 | 0.640000 |
| 16 | 0.151900 | 22.023660 | 0.023660 | 0.640000 |
| 17 | 0.147300 | 22.027631 | 0.027631 | 0.820000 |
| 18 | 0.145800 | 22.019332 | 0.019332 | 0.735000 |
| 19 | 0.146400 | 22.019336 | 0.019336 | 0.760000 |

## 3.2. Xử lý kết quả thực nghiệm

### *3.2.1. Phương trình hồi quy ứng với năng lượng tiêu thụ khi gia công thô*

Căn cứ vào lý thuyết quy hoạch thực nghiệm trực giao cấp 2 [4] và kết quả thực nghiệm ở Bảng 3.6, ta xác định được các thông số cơ bản cho việc xây dựng phương trình hồi quy như sau:

Số thí nghiệm ở tâm: $m = 4$ (giá trị các thực nghiệm ở tâm thể hiện từ lỗ số 16 đến lỗ số 19).

Số mức độ tự do ứng với số thí nghiệm ở tâm: $f = m - 1 = 3$

Xác suất tin cậy: 95%

Chỉ tiêu phân bố Student [138]: $t(0.05,3) = 3.182446$.

Tính toán các hệ số của PTHQ, độ lệch chuẩn của các hệ số này và so sánh với chỉ tiêu Student thì thu được phương trình toán học mô tả mối quan hệ giữa các thông số công nghệ với năng lượng tiêu thụ khi phay thô cao tốc hốc tròn với thép hợp kim SKD11 sau nhiệt luyện:

$$\begin{aligned} Y_{NL} &= 0.18743 - 0.18375x_1 - 0.050742x_2 + 0.0392x_1x_2 + \\ &+0.1162x_1^2 - 0.02873x_2^2 - 0.02626x_3^2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Để đánh giá độ tin cậy của phương trình hồi quy, ta xét: giá trị phương sai tương thích là $S_{tt}^2 = 0.0029$, giá trị phương sai tái hiện là $S_{th}^2 = 0.00008$, chỉ tiêu Fisher tính toán là $F = 1.0467$, giá trị này nhỏ hơn rất nhiều so với giá trị tiêu chuẩn ứng với mức độ tin cậy 95% là $F_{0.05}(8;3) = 17.007$. Do đó PTHQ (3.2) đảm bảo tin cậy.

Đổi biến về các thông số công nghệ $x_1 = \frac{t - t_0}{\Delta t}; x_2 = \frac{F - F_0}{\Delta F}; x_3 = \frac{n - n_0}{\Delta n}$, ta có:

$$\begin{aligned} Y_{NL} &= 0.18743 - 0.18375\frac{(t-t_0)}{\Delta t} - 0.050742\frac{(F-F_0)}{\Delta F} + 0.0392\frac{(t-t_0)}{\Delta t}\frac{(F-F_0)}{\Delta F} + \\ &+0.1162\left(\frac{(t-t_0)}{\Delta t}\right)^2 - 0.02873\left(\frac{(F-F_0)}{\Delta F}\right)^2 - 0.02626\left(\frac{(n-n_0)}{\Delta n}\right)^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

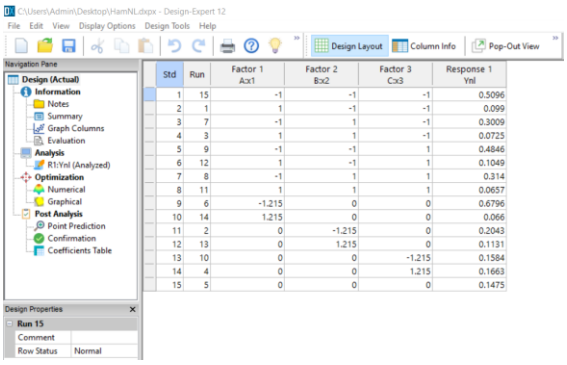
Trong đó, $t_0 = 3; \Delta t = 2; F_0 = 500; \Delta F = 100; n_0 = 3200; \Delta n = 800$ và các giá trị giới hạn: $0.57 \le t \le 5.43; 378.5 \le F \le 621.5; 2188 \le n \le 4181$.

Cần để ý rằng, hiện nay cũng có nhiều công cụ phần mềm hiện đại như ANOVA (phân tích phương sai) để đánh giá ảnh hưởng của các thông số công nghệ trong PTHQ. Tuy nhiên, việc sử dụng phương pháp nào để đánh giá cũng cần đảm bảo tính khoa học, việc xây dựng ma trận thực nghiệm và mức độ

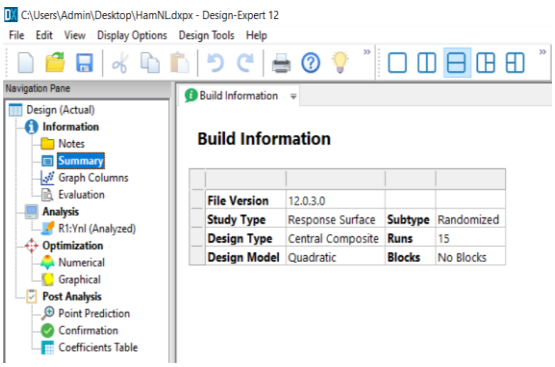
thành thạo của cá nhân thực hiện đối với phương pháp đó mà chọn lọc sử dụng cho phù hợp.

Cụ thể, sử dụng phần mềm chuyên dụng DESIGN EXPERT 12 để kiểm tra phương trình hồi quy (3.2) như sau:

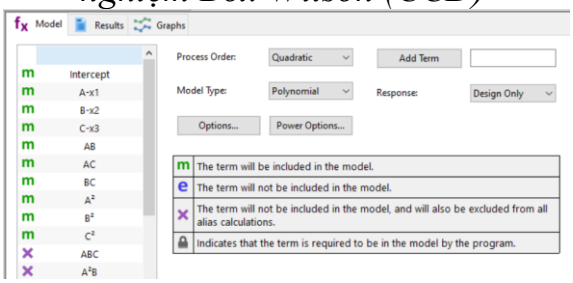
Hình 3.14 mô tả các thiết lập cho ma trận thực nghiệm theo mô hình Box-Wilson (CCD) trong phương pháp đáp ứng bề mặt (RSM) với 3 yếu tố, 1 thí nghiệm ở tâm, tổng số thí nghiệm là 15 (hình 3.15). Mô hình toán học là dạng đa thức với sự tác động qua lại giữa các biến cho phương trình hồi quy được chọn như trên hình 3.16. Hình 3.17 mô tả kết quả phân tích ban đầu về sai lệch chuẩn, chỉ số quan hệ tương quan giữa các yếu tố ($R_i^2 = 0$ là lý tưởng), giá trị ràng buộc phi tuyến giữa các biến (chỉ số VIF lớn hơn 10 là mô hình không đủ tin cậy), chỉ số đáp ứng bề mặt (Power) của mô hình và số bậc tự do của mô hình.



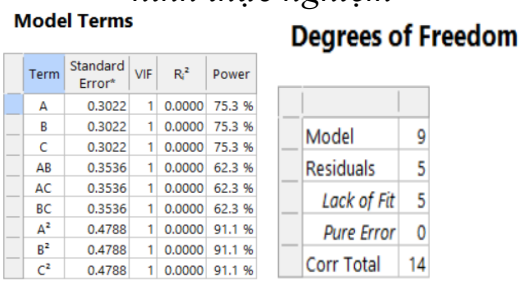
*Hình 3. 14. Thiết lập ma trận thực nghiệm Box-Wilson (CCD)*




*Hình 3. 15. Thông tin cơ bản về mô hình thực nghiệm*

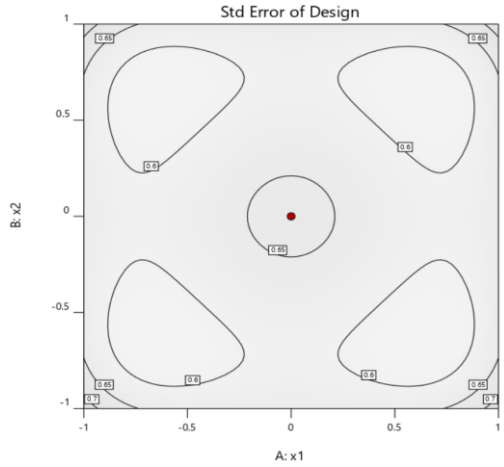


*Hình 3. 16. Chọn mô hình toán học cho phương trình hồi quy*

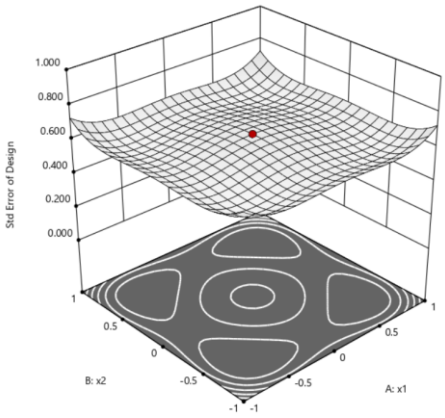



*Hình 3. 17. Kết quả phân tích sai lệch chuẩn và số bậc tự do*

Hình 3.18 và hình 3.19 mô tả phân bố sai lệch chuẩn của mô hình dạng 2D, 3D dưới tác động của 2 yếu tố đại diện $x_1$ và $x_2$. Các cặp yếu tố khác cũng cho mô hình tương tự. Phân bố như trên các hình cho thấy sự cân bằng về mặt đáp ứng bề mặt. Hình 3.20 mô tả kết quả phân tích ANOVA và hình 3.21 thể hiện các hệ số của phương trình hồi quy. Các hệ số có giá trị $p-value$ lớn hơn $0.5$ có thể loại bỏ bởi tác động không lớn và gần như không có ảnh hưởng tới giá trị của phương trình hồi quy. Các hệ số loại trừ là của các biểu thức $x_3, x_1x_3, x_2x_3$. Kết quả phân tích mô hình trên phần mềm hoàn toàn phù hợp với các tính toán theo phương pháp Quy hoạch trực giao cấp 2.




*Hình 3. 18. Đồ thị 2D về phân bố sai lệch chuẩn của mô hình*




*Hình 3. 19. Đồ thị 3D phân bố sai lệch chuẩn của mô hình*

Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics | Model Graphs

Analysis of Variance

**ANOVA for Quadratic model**

**Response 1: Yn1**

| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Model** | 0.4759 | 9 | 0.0529 | 11.45 | 0.0076 | significant |
| A-A | 0.3698 | 1 | 0.3698 | 80.07 | 0.0003 | |
| B-B | 0.0282 | 1 | 0.0282 | 6.11 | 0.0564 | |
| C-C | 9.358E-07 | 1 | 9.358E-07 | 0.0002 | 0.9892 | |
| AB | 0.0123 | 1 | 0.0123 | 2.66 | 0.1637 | |
| AC | 0.0000 | 1 | 0.0000 | 0.0033 | 0.9566 | |
| BC | 0.0001 | 1 | 0.0001 | 0.0175 | 0.9000 | |
| $A^2$ | 0.0588 | 1 | 0.0588 | 12.73 | 0.0161 | |
| $B^2$ | 0.0036 | 1 | 0.0036 | 0.7900 | 0.4148 | |
| $C^2$ | 0.0031 | 1 | 0.0031 | 0.6607 | 0.4533 | |
| **Residual** | 0.0231 | 5 | 0.0046 | | | |
| **Cor Total** | 0.4990 | 14 | | | | |

*Hình 3. 20. Kết quả phân tích ANOVA*

Coefficients | Coded Equation | Actual Equation

**Final Equation in Terms of Actual Factors**

| R1 | = |
|---|---|
| +0.188082 | |
| -0.183751 | * x1 |
| -0.050747 | * x2 |
| -0.000292 | * x3 |
| +0.039200 | * x1 * x2 |
| +0.001375 | * x1 * x3 |
| +0.003175 | * x2 * x3 |
| +0.116108 | * $x1^2$ |
| -0.028924 | * $x2^2$ |
| -0.026452 | * $x3^2$ |

*Hình 3. 21. Các hệ số của phương trình hồi quy*

### *3.2.2. Phương trình hồi quy ứng với đường kính lỗ*

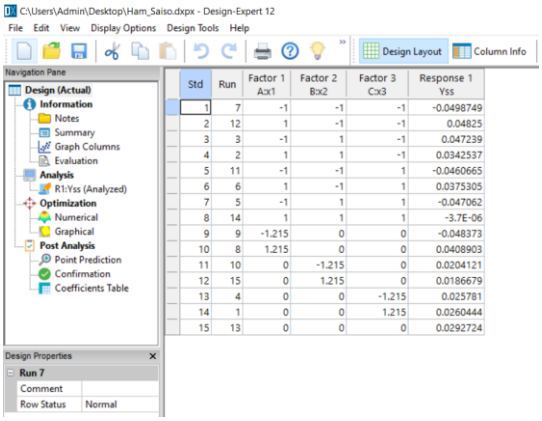
Để đánh giá độ chính xác của đường kính lỗ khi phay tinh cao tốc hốc tròn, ta xây dựng phương trình hồi quy sai số đường kính lỗ so với đường kính lỗ danh nghĩa. Tương tự các bước như xây dựng PTHQ cho năng lượng tiêu thụ, ta có phương trình toán học mô tả mối quan hệ giữa các thông số công nghệ với sai số đường kính lỗ như sau:

$$Y_{ss} = 0.02365 + 0.02961x_1 - 0.01234x_3 - 0.018456x_1x_2 - \\ -0.01521x_2x_3 - 0.01989x_1^2 \quad (3.4)$$

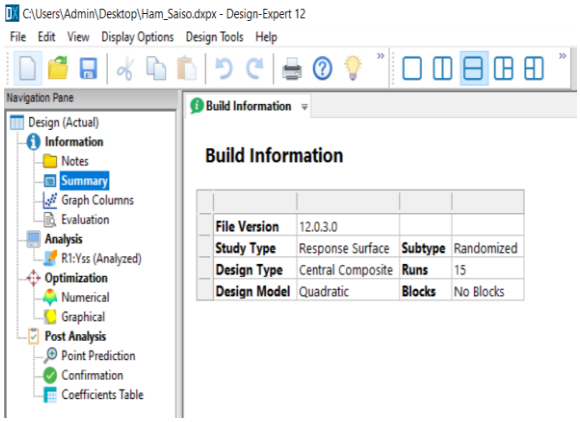
Đổi biến về các thông số công nghệ $x_1 = \frac{t - t_0}{\Delta t}; x_2 = \frac{F - F_0}{\Delta F}; x_3 = \frac{n - n_0}{\Delta n}$, ta có:

$$Y_{ss} = 0.02365 + 0.02961\frac{(t - t_0)}{\Delta t} - 0.01234\frac{(n - n_0)}{\Delta n} - \\ -0.018456\frac{(t - t_0)}{\Delta t}\frac{(F - F_0)}{\Delta F} - 0.01521\frac{(F - F_0)}{\Delta F}\frac{(n - n_0)}{\Delta n} - 0.01989\left(\frac{(t - t_0)}{\Delta t}\right)^2 \quad (3.5)$$

Trong đó, $t_0 = 6; \Delta t = 3; F_0 = 700; \Delta F = 100; n_0 = 4800; \Delta n = 800$ và các giá trị giới hạn: $2.247 \le t \le 9.753; 575 \le F \le 825; 3800 \le n \le 5800$.



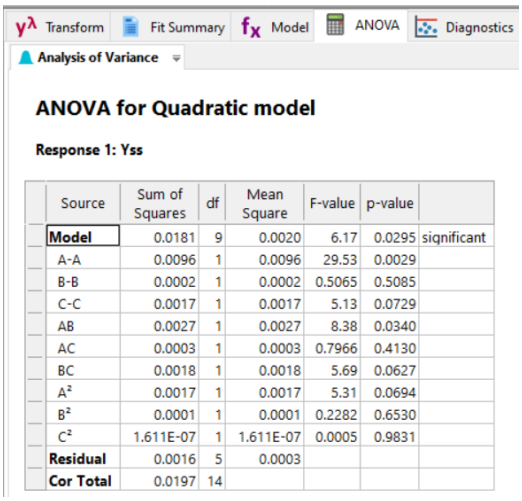

*Hình 3. 22. Thiết lập ma trận thực nghiệm Box-Wilson (CCD)*




*Hình 3. 23. Thông tin cơ bản về mô hình thực nghiệm*

Sử dụng phần mềm chuyên dụng DESIGN EXPERT 12 để kiểm tra phương trình hồi quy (3.4) tương tự như với phương trình (3.2), ta có một số kết quả như hình 3.22 đến 3.25. Các hệ số bị loại trừ là của các biểu thức $x_2, x_1x_3, x_2^2, x_3^2$ (hình 3.25). Kết quả phân tích mô hình cho dạng phương trình

hồi quy giống như phương trình thu được từ các tính toán theo phương pháp quy hoạch trực giao bậc 2.



Transform | Fit Summary | Model | ANOVA | Diagnostics

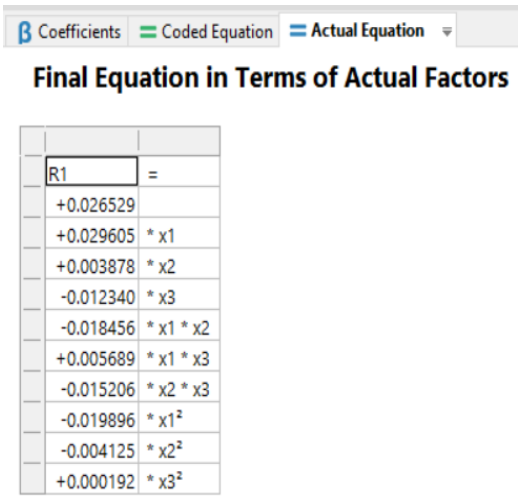
Analysis of Variance

**ANOVA for Quadratic model**

**Response 1: Yss**

| Source | Sum of Squares | df | Mean Square | F-value | p-value | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Model** | 0.0181 | 9 | 0.0020 | 6.17 | 0.0295 | significant |
| A-A | 0.0096 | 1 | 0.0096 | 29.53 | 0.0029 | |
| B-B | 0.0002 | 1 | 0.0002 | 0.5065 | 0.5085 | |
| C-C | 0.0017 | 1 | 0.0017 | 5.13 | 0.0729 | |
| AB | 0.0027 | 1 | 0.0027 | 8.38 | 0.0340 | |
| AC | 0.0003 | 1 | 0.0003 | 0.7966 | 0.4130 | |
| BC | 0.0018 | 1 | 0.0018 | 5.69 | 0.0627 | |
| $A^2$ | 0.0017 | 1 | 0.0017 | 5.31 | 0.0694 | |
| $B^2$ | 0.0001 | 1 | 0.0001 | 0.2282 | 0.6530 | |
| $C^2$ | 1.611E-07 | 1 | 1.611E-07 | 0.0005 | 0.9831 | |
| **Residual** | 0.0016 | 5 | 0.0003 | | | |
| **Cor Total** | 0.0197 | 14 | | | | |

*Hình 3. 24. Kết quả phân tích ANOVA*



Coefficients | Coded Equation | Actual Equation

**Final Equation in Terms of Actual Factors**

| R1 | = |
|---|---|
| +0.026529 | |
| +0.029605 | * x1 |
| +0.003878 | * x2 |
| -0.012340 | * x3 |
| -0.018456 | * x1 * x2 |
| +0.005689 | * x1 * x3 |
| -0.015206 | * x2 * x3 |
| -0.019896 | * $x1^2$ |
| -0.004125 | * $x2^2$ |
| +0.000192 | * $x3^2$ |

*Hình 3. 25. Các hệ số của phương trình hồi quy sai số kích thước*

### *3.2.3. Phương trình hồi quy ứng với độ nhám thành lỗ*

Tương tự như với giá trị đường kính lỗ hay sai số kích thước, phương trình toán học mô tả mối quan hệ của các thông số công nghệ và độ nhám bề mặt thành lỗ được xác định như sau:

$$Y_{Nham} = 0.6097 - 0.11048x_3 + 0.1359x_1^2 - 0.0926x_2^2 \quad (3.6)$$

Đổi biến về các thông số công nghệ $x_1 = \frac{t - t_0}{\Delta t}; x_2 = \frac{F - F_0}{\Delta F}; x_3 = \frac{n - n_0}{\Delta n}$, ta có:

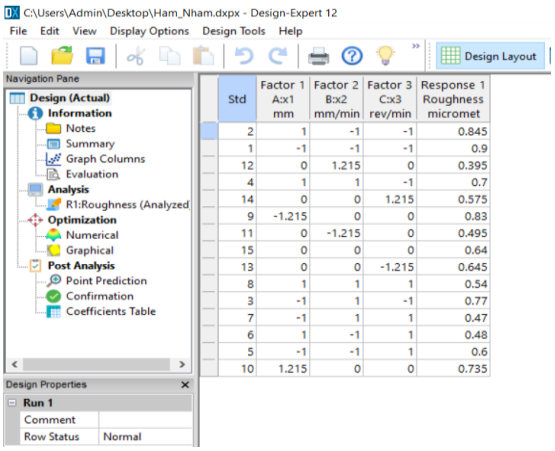
$$Y_{Nham} = 0.6097 - 0.11048\frac{(n - n_0)}{\Delta n} + 0.1359\left(\frac{(t - t_0)}{\Delta t}\right)^2 - 0.0926\left(\frac{(F - F_0)}{\Delta F}\right)^2 \quad (3.7)$$

Trong đó, $t_0 = 6; \Delta t = 3; F_0 = 700; \Delta F = 100; n_0 = 4800; \Delta n = 800$ và các giá trị giới hạn: $2.247 \le t \le 9.753; 575 \le F \le 825; 3800 \le n \le 5800$.

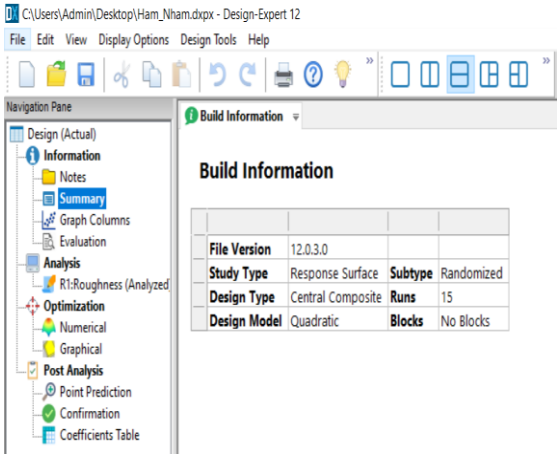
Sử dụng phần mềm chuyên dụng DESIGN EXPERT 12 để kiểm tra phương trình hồi quy (3.6) tương tự như với phương trình (3.2), ta có một số kết quả như hình 3.26 đến hình 3.29.

Mặc dù các kết quả phân tích cho thấy các hệ số là chấp nhận được trong phương trình hồi quy nhưng do giá trị độ nhám là khá nhỏ, ta có thể bỏ qua các

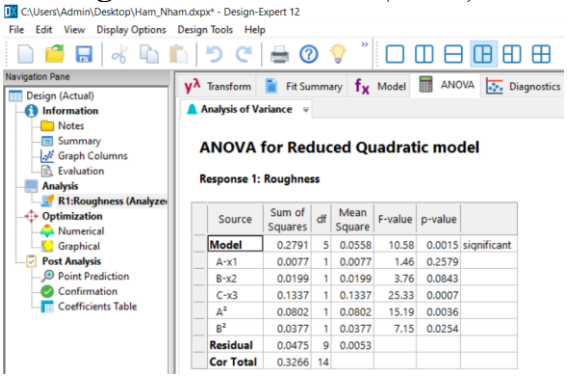
hệ số $x_1, x_2$ (hình 3.29). Do đó, ta thu được phương trình hồi quy giống như các tính toán từ phương pháp quy hoạch trực giao cấp 2.



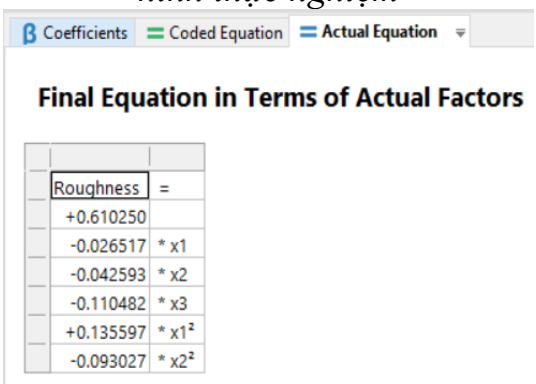

*Hình 3. 26. Thiết lập ma trận thực nghiệm Box-Wilson (CCD)*




*Hình 3. 27. Thông tin cơ bản về mô hình thực nghiệm*




*Hình 3. 28. Kết quả phân tích ANOVA*




*Hình 3. 29. Các hệ số của phương trình hồi quy độ nhám bề mặt*

### 3.3. Đánh giá sơ bộ ảnh hưởng của các thông số công nghệ

Để đánh giá cơ bản ảnh hưởng của từng yếu tố công nghệ tới các chỉ tiêu gia công (năng lượng, sai số kích thước và độ nhám), ta sử dụng các phương trình hồi quy với việc cố định giá trị của 2 thông số và tăng dần giá trị của thông số còn lại. Rõ ràng, kết quả đánh giá chỉ mang tính chất tương đối và xu hướng bởi bản chất, các thông số công nghệ có quan hệ mật thiết với nhau và có ảnh hưởng đan xen đến các chỉ tiêu gia công.

*Ảnh hưởng của chiều sâu cắt:*

cho $-1.215 \le x1 \le 1.215$ và $x2 = x3 = -1.215$. Kết quả thể hiện trên hình 3.30.

*Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao:*

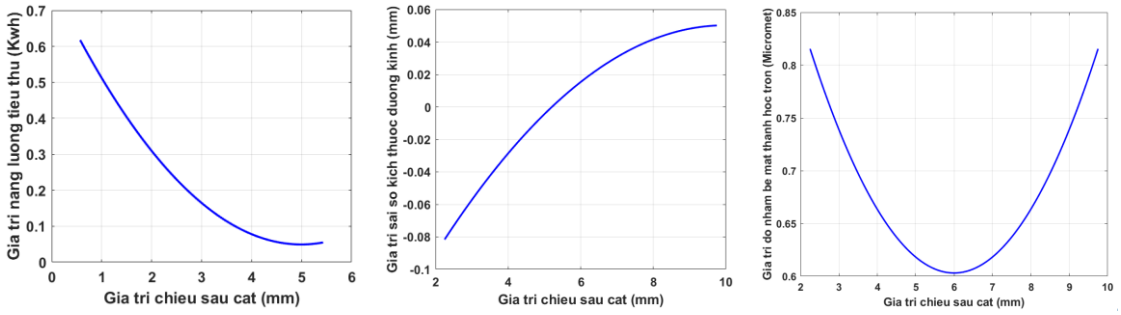
cho $-1.215 \le x2 \le 1.215$ và $x1 = x3 = -1.215$. Kết quả thể hiện trên hình 3.31.

*Ảnh hưởng của tốc độ trục chính (vận tốc cắt):*

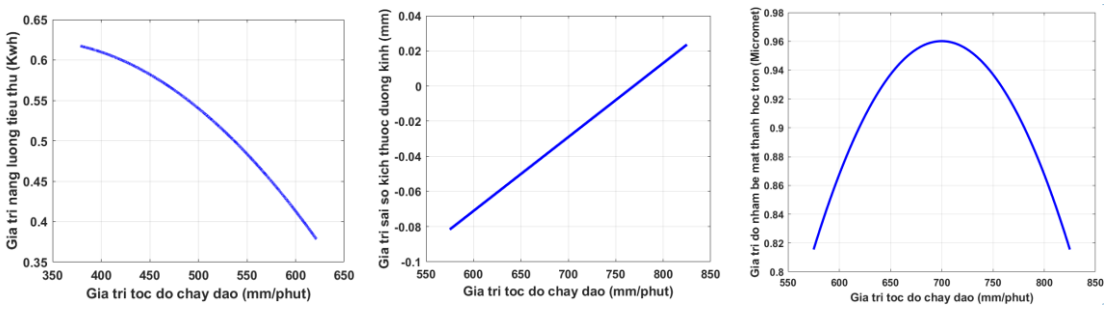
cho $-1.215 \le x3 \le 1.215$ và $x1 = x2 = -1.215$. Kết quả thể hiện trên hình 3.32.

*Đánh giá sơ bộ:*

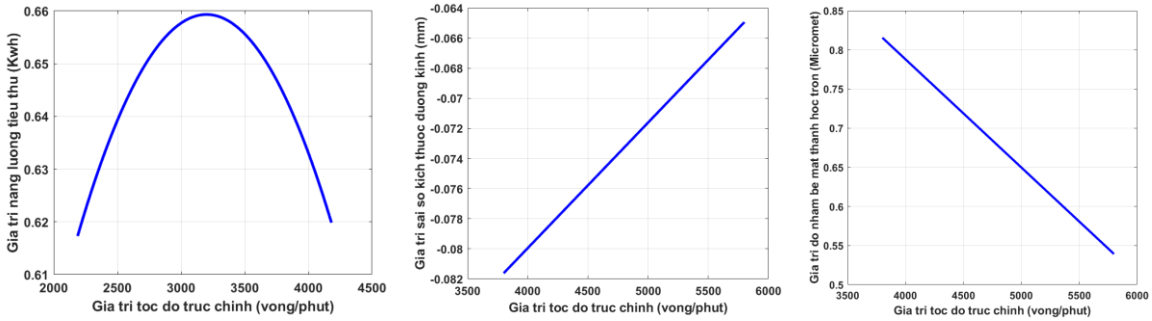
Khi gia công thô, chiều sâu cắt tăng, tốc độ chạy dao tăng thì năng lượng tiêu thụ có xu hướng giảm. Khi vận tốc cắt tăng, năng lượng tiêu thụ ban đầu tăng, sau đó giảm dần.




*Hình 3. 30. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt*




*Hình 3. 31. Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao*




*Hình 3. 32. Ảnh hưởng của vận tốc cắt*

Khi gia công tinh, giá trị sai số kích thước có chiều hướng tăng theo xu hướng dung sai dương. Khi vận tốc cắt tăng, giá trị độ nhám giảm. Khi chiều sâu cắt tăng thì độ nhám ban đầu giảm, sau đó tăng dần. Khi tốc độ chạy dao tăng thì ban đầu độ nhám tăng, sau đó giảm dần.

Cần nhắc lại rằng, những đánh giá trên đây chỉ mang tính sơ bộ, thể hiện xu hướng chứ chưa đánh giá đúng bản chất bởi các thông số công nghệ có mối quan hệ lẫn nhau.

## Kết luận Chương 3

Như vậy, chương này đã hoàn thành việc xây dựng mô hình thực nghiệm và các kịch bản thực nghiệm nhằm xác định mối quan hệ giữa các đại lượng như năng lượng (3.2), sai số kích thước (3.4) và độ nhám bề mặt (3.6) với các thông số công nghệ thông qua các phương trình toán học. Các thí nghiệm thử thông số được thực hiện trước các thí nghiệm chính thức cho phép đánh giá các phương án gia công và phương hướng thực hiện các thực nghiệm khả thi.

+ Các phương trình toán hồi quy được xác định trên cơ sở lý thuyết quy hoạch thực nghiệm trực giao cấp 2. Cụ thể:

Phương trình hồi quy mô tả mối quan hệ giữa năng lượng tiêu thụ và các thông số công nghệ khi phay thô cao tốc:

$$Y_{NL} = 0.18743 - 0.18375x_1 - 0.050742x_2 + 0.0392x_1x_2 +$$
$$+0.1162x_1^2 - 0.02873x_2^2 - 0.02626x_3^2$$

Phương trình hồi quy mô tả mối quan hệ giữa sai số kích thước và các thông số công nghệ khi phay tinh cao tốc:

$$Y_{ss} = 0.02365 + 0.02961x_1 - 0.01234x_3 - 0.018456x_1x_2 -$$
$$-0.01521x_2x_3 - 0.01989x_1^2$$

Phương trình hồi quy mô tả mối quan hệ giữa độ nhám bề mặt thành lỗ và các thông số công nghệ khi phay tinh cao tốc:

$$Y_{Nham} = 0.6097 - 0.11048x_3 + 0.1359x_1^2 - 0.0926x_2^2$$

+ Phương pháp phân tích phương sai ANOVA được áp dụng dựa trên phần mềm DESIGN EXPERT 12 để kiểm tra lại các kết quả tính toán. Việc kiểm tra cho thấy, không có sự sai khác giữa việc thực hiện tính toán theo lý thuyết và sử dụng phần mềm mô phỏng. Các phương trình hồi quy giữa hai phương pháp hoàn toàn trùng khớp.

+ Ảnh hưởng sơ bộ của từng thông số cắt đến xu hướng thay đổi của năng lượng tiêu thụ khi phay thô và tinh cao tốc đã được xem xét. Tuy nhiên, kết quả chỉ mang tính chất tham khảo bởi các thông số cắt có ảnh hưởng lẫn nhau và ảnh hưởng đồng thời đến các mục tiêu. Chương tiếp theo sẽ tập trung vào vấn đề tối ưu hóa đơn và đa mục tiêu các thông số công nghệ.

Các kết quả nghiên cứu của chương này được sử dụng để giải quyết bài toán tối ưu đơn mục tiêu và đa mục tiêu ứng với các bộ thông số công nghệ phù hợp nhất ở chương sau.

# CHƯƠNG 4. TỐI ƯU HÓA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ KHI PHAY CAO TỐC THÉP HỢP KIM SAU NHIỆT LUYỆN

Chương này tập trung vào các vấn đề sau:

Xây dựng thuật toán tối ưu hóa các thông số công nghệ đơn mục tiêu gồm năng lượng tiêu thụ, sai số kích thước và độ nhám bề mặt thành lỗ.

Xây dựng thuật toán tối ưu hóa các thông số công nghệ đa mục tiêu gồm sai số kích thước và độ nhám bề mặt dựa trên việc tìm nghiệm Pareto.

Thuật toán di truyền và thuật toán bầy đàn được xem xét sử dụng để giải các bài toán tối ưu.

Dựa trên các kết quả tối ưu đơn mục tiêu, ảnh hưởng kép của các thông số công nghệ cũng được xem xét và đánh giá.

Đề xuất phương án sử dụng mạng trí tuệ nhân tạo trong dự đoán các thông số công nghệ theo yêu cầu độ chính xác kích thước mong muốn dựa trên phương trình hồi quy.

## 4.1. Các phương pháp tối ưu hóa

Tối ưu hóa có thể được định nghĩa là quá trình tìm kiếm các giá trị biến tối ưu cho một hoặc nhiều hàm mục tiêu, đảm bảo một hay nhiều hàm mục tiêu đạt giá trị nhỏ nhất hoặc lớn nhất mong muốn trong khi vẫn đáp ứng các điều kiện ban đầu.

Bài toán tối ưu đơn mục tiêu: Tìm giá trị nhỏ nhất/lớn nhất của hàm $f(x_1, x_2, ..., x_n); n \in N^*$ với $X = \left\{ x \in R^n : h(x) \le 0; g(x) = 0 \right\}$. Trong đó, $f(x)$ là hàm mục tiêu, $x = \left[ x_1, x_2, ..., x_n \right]$ là véc tơ biến trong hàm mục tiêu, $n \in N^*$ là số lượng biến $x$ trong các hàm mục tiêu, $X$ là miền giới hạn của các biến $x$ và các điều kiện ràng buộc, $h(x), g(x)$ là các hàm ràng buộc dạng bất phương trình hoặc phương trình.

Bài toán tối ưu đa mục tiêu: tìm giá trị lớn nhất/nhỏ nhất của hàm mục tiêu $f(x) = \left[ f_1(x), \quad f_2(x), \quad ..., \quad f_p(x) \right]; X = \left\{ x \in R^n : h(x) \le 0; g(x) = 0 \right\}$. Trong đó, $f_1(x), f_2(x), ..., f_p(x)$ là các hàm mục tiêu thành phần.

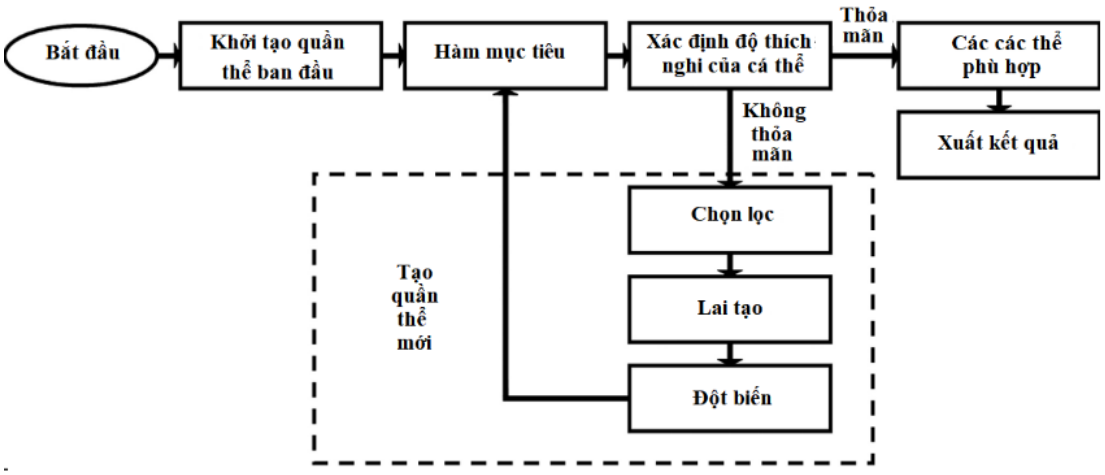
Để giải các bài toán tối ưu, các nhà khoa học đã phát triển rất nhiều phương pháp khác nhau như: phương pháp đơn hình, phương pháp leo đồi lặp ngẫu nhiên, phương pháp Gradient (chiếu), phương pháp tổng trọng số, phương pháp xấp xỉ, phương pháp nhân tử Lagrange hoặc các thuật toán hiện đại như: thuật toán di truyền (Genetic Algorithm – GA), thuật toán bầy đàn (Particle Swarm Optimization – PSO), thuật toán mạng nơ ron (Neutral Network – NN), …Trong đó, thuật toán GA và PSO được sử dụng nhiều hơn cả bởi tính phù hợp và hiện đại của chúng đối với các bài toán tối ưu.

### *4.1.1. Thuật toán di truyền (GA)*

Thuật toán di truyền phỏng theo các quá trình tiến hoá tự thích nghi của các quần thể sinh học để tối ưu hoá các hàm mục tiêu. Thuật toán này lần đầu tiên được phát triển bởi John Holland [144] và đã được áp dụng rất thành công trong nhiều lĩnh vực kinh tế và kỹ thuật. Các cá thể trải qua một quá trình phát triển và sinh sản để tạo ra những cá thể mới cho thế hệ tiếp theo. Trong quá trình tăng trưởng và phát triển, những cá thể xấu (theo một tiêu chuẩn nào đó hay có độ phù hợp thấp (trong môi trường) sẽ bị đào thải. Ngược lại, những cá thể tốt sẽ được giữ lại (chọn lọc) và được lai ghép (lai tạo) để tạo ra những cá thể mới cho thế hệ sau. Những cá thể mới được sinh ra mang những tính trạng của cá thể cha-mẹ (còn gọi là hiện tượng di truyền). Những cá thể được giữ lại có độ thích nghi khác nhau và quá trình lai ghép được thực hiện hoàn toàn ngẫu nhiên giữa các cá thể trong quần thể. Các cá thể được tạo ra trong quá trình lai ghép có thể sẽ xảy ra hiện tượng đột biến và tạo ra những cá thể khác với cá thể cha-mẹ. Cá thể này có thể tốt hơn hoặc xấu hơn cá thể cha-mẹ. Di truyền và đột biến là hai cơ chế có vai trò như nhau trong quá trình tiến hóa, mặc dù hiện

tượng đột biến xảy ra với xác suất nhỏ hơn nhiều so với xác suất của hiện tượng di truyền. Và quá trình chọn lọc và lai tạo là hai quá trình cơ bản xuyên suốt quá trình tiến hóa tự nhiên.

Hình 4.1 mô tả các bước thực hiện thuật toán di truyền. Điểm quan trọng nhất để đảm bảo tính hội tụ của thuật toán (tức là tính khả thi để tìm được giải pháp tối ưu) là việc xây dựng hàm thích nghi (hay còn gọi là hàm mục tiêu). Hàm mục tiêu là hàm dùng để đánh giá độ tốt của một lời giải hoặc cá thể. Hàm mục tiêu nhận vào tham số của mỗi cá thể và trả ra một giá trị thực. Tùy theo giá trị của số thực này mà ta biết độ tốt của cá thể đó so với mục tiêu đặt ra (chẳng hạn với bài toán tìm cực đại thì giá trị trả ra càng lớn thì cá thể càng tốt, và ngược lại, với bài toán tìm cực tiểu thì giá trị trả ra càng nhỏ thì cá thể càng tốt).




*Hình 4. 1. Sơ đồ thuật toán di truyền*

### *4.1.2. Thuật toán bầy đàn (PSO)*

Phương pháp tối ưu bầy đàn là một dạng của các thuật toán tiến hóa quần thể đã được biết đến trước đây như thuật giải di truyền (Genetic algorithm), Thuật toán đàn kiến (Ant colony algorithm). Tuy vậy, PSO khác với GA ở chỗ nó thiên về sử dụng sự tương tác giữa các cá thể trong một quần thể để khám phá không gian tìm kiếm. Tối ưu hóa bầy đàn, viết tắt là PSO, dựa trên hành vi

của một nhóm hoặc bầy đàn của loài côn trùng, chẳng hạn như kiến, mối, ong và một đàn chim. Một cá thể, một chim trong một đàn gọi là hạt trong một quần thể, mỗi một hạt sử dụng trí thông minh riêng của mình và trí tuệ quần thể hoặc nhóm của bầy đàn để thực hiện mục tiêu tìm kiếm. Thuật toán ra đời vào năm 1995 tại một hội nghị của IEEE bởi James Kennedy và Russell Eberhart [145]. Thuật toán có nhiều ứng dụng quan trọng trong tất cả các lĩnh vực mà ở đó đòi hỏi phải giải các bài toán về tối ưu hóa.

Trong bối cảnh tối ưu hóa đa biến, PSO được giả định là các quy định hoặc kích thước cố định với mỗi cá thể đặt ban đầu tại các địa điểm ngẫu nhiên trong không gian nhiều chiều. Mỗi cá thể có hai đặc điểm: vị trí và vận tốc. Mỗi cá thể lấy ngẫu nhiên không gian đang xét và nhớ vị trí tốt nhất (về nguồn thức ăn hoặc giá trị hàm mục tiêu) mà nó đã phát hiện ra. Các cá thể truyền đạt thông tin hoặc các vị trí tốt với nhau và điều chỉnh vị trí cá nhân và vận tốc của nó dựa trên các thông tin nhận được tại vị trí tốt nhất. Ví dụ, xem xét các hành vi của các con chim trong một đàn. Mặc dù mỗi con chim có một trí thông minh hạn chế nhưng chúng kiểm soát được hành vi theo ba nguyên tắc [146] cơ bản là: Đánh giá (evalution) - giá trị hàm mục tiêu được xác định cho các cá thể và khả năng nhớ giá trị tối ưu cục bộ của mỗi cá thể riêng lẻ; So sánh (comparison) - vị trí thực hiện tốt nhất cục bộ của mỗi cá thể được so sánh với nhau để tìm ra giá trị khả dĩ nhất, gọi là tối ưu toàn cục; Bắt chước (imitation) - các cá thể trong quần thể bắt chước hành động của các cá thể tốt hơn nhằm sớm tiếp cận giá trị mục tiêu. Vì vậy, các mô hình PSO được xây dựng mô phỏng như một tìm kiếm ngẫu nhiên các giá trị tối đa của hàm mục tiêu trong không gian thiết kế cho trước. Như vậy, dần dần qua nhiều lần lặp lại, giá trị tối ưu sẽ được tìm ra. Cụ thể, mô hình toán học được xây dựng như sau:

Xét bài toán tối ưu của hàm $f(x)$ trong không gian $n$ chiều. Mỗi vị trí trong không gian là một điểm tọa độ $n$ chiều. Hàm $f(x)$ gọi là hàm mục tiêu

xác định trong không gian $n$ chiều và nhận giá trị thực. Mục đích là tìm ra điểm cực tiểu của hàm $f(x)$ trong miền xác định nào đó. Ta bắt đầu xem xét sự liên hệ giữa bài toán tìm thức ăn với bài toán tìm cực tiểu của hàm theo cách như sau. Giả sử rằng số lượng thức ăn tại một vị trí tỉ lệ nghịch với giá trị của hàm $f(x)$ tại vị trí đó. Có nghĩa là ở một vị trí mà giá trị hàm $f(x)$ càng nhỏ thì số lượng thức ăn càng lớn. Việc tìm vùng chứa thức ăn nhiều nhất tương tự như việc tìm ra vùng chứa điểm cực tiểu của hàm $f(x)$ trên không gian tìm kiếm. Các bước thực hiện như sau:

**Bước 1.** Khởi tạo quần thể ban đầu

**Bước 2**. Khởi tạo vị trí và vận tốc ban đầu ngẫu nhiên cho các cá thể

**Bước 3**. Tính giá trị hàm mục tiêu ban đầu

Tính giá trị hàm mục tiêu ứng với mỗi cá thể trong đàn và tìm giá trị tốt nhất ban đầu của từng cá thể $p_{0best}$, giá trị tốt nhất ban đầu của cả đàn $g_{0best}$.

**Bước 4.** Cập nhật vị trí và vận tốc của các thể, cập nhật giá trị hàm mục tiêu

Tạo vòng lặp tìm kiếm, tính giá trị hàm mục tiêu cho từng cá thể trong các vòng lặp, cập nhật lại giá trị hàm mục tiêu tốt nhất của từng cá thể và của cả đàn trong từng vòng lặp.

**Bước 5**. Kiểm tra điều kiện hàm mục tiêu.

Nếu điều kiện chưa thỏa mãn thì quay lại bước 2. Nếu thỏa mãn thì chuyển Bước 6.

**Bước 6**. Dừng tìm kiếm.

Các thuật toán GA và PSO được đánh giá độ tin cậy và so sánh mức độ hiệu quả thông qua kết quả nghiên cứu của công trình [114]. Theo đó, thuật toán PSO có khả năng cho giá trị tối ưu ổn định hơn thuật toán GA. Ta chọn thuật toán PSO cho bài toán này. Sơ đồ thuật toán được mô tả chi tiết trong [7].

## 4.2. Tối ưu hóa đơn mục tiêu

### *4.2.1. Tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ khi phay thô cao tốc*

***a. Hàm mục tiêu***

Hàm mục tiêu chính là phương trình toán học thể hiện mối quan hệ giữa các thông số công nghệ với năng lượng tiêu thụ tổng thể trên máy CNC khi phay cao tốc thép hợp kim sau nhiệt luyện. Phương trình này đã được xây dựng ở Chương 3:

$$Y_{NL} = 0.18743 - 0.18375x_1 - 0.050742x_2 + 0.0392x_1x_2 + \\ +0.1162x_1^2 - 0.02873x_2^2 - 0.02626x_3^2 \quad (4.1)$$

**Mục tiêu**: cần tìm các thông số công nghệ tối ưu đảm bảo năng lượng tiêu thụ trong quá trình gia công là nhỏ nhất, với các điều kiện giới hạn cho phép ứng với khả năng gia công của máy CNC và dụng cụ cắt.

***b. Điều kiện biên***

Thuật toán được xây dựng trên cơ sở các điều kiện như sau: $-1.215 \le x_1, x_2, x_3 \le 1.215$, tương ứng giới hạn các thông số công nghệ:

Tốc độ cắt: $55 \le V_c \le 105(m/ph)$, tốc độ trục chính: $2188 \le n \le 4181(vg/ph)$

Tốc độ chạy dao: $375.5 \le F \le 621.5(mm/ph)$

Chiều sâu cắt: $0.57 \le t \le 5.43(mm)$

***c. Các thông số thuật toán bầy đàn (PSO)***

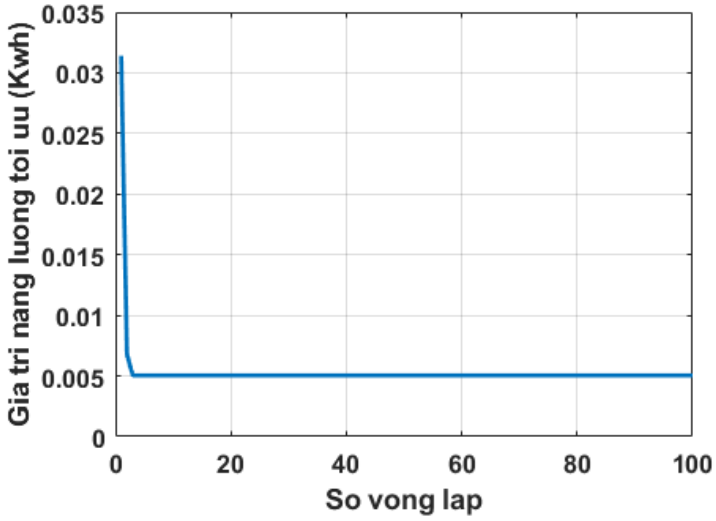
*Bảng 4. 1. Thông số thuật toán PSO*

| TT | Thông số | Ký hiệu | Giá trị |
|---|---|---|---|
| 1 | Số vòng lặp tìm kiếm | MaxIt | 100 |
| 2 | Kích thước quần thể bầy đàn | npop | 100 |
| 3 | Hệ số quán tính | w | 1 |
| 4 | Hệ số gia tốc từng cá thể | C1 | 2 |
| 5 | Hệ số gia tốc cả quần thể | C2 | 2 |

***d. Kết quả tối ưu***

Chương trình tính toán được xây dựng trên phần mềm MATLAB và được trình bày trong Phụ lục. Kết quả tính toán tối ưu như sau:

Giá trị tối ưu được tìm thấy sau vòng lặp thứ 7 và giá trị năng lượng nhỏ nhất đạt được sau có thể đạt được là $Y_{Nl\min} = 0.005(Kwh)$ (hình 4.2), tại $x_1 = 0.5857, x_2 = 1.215, x_3 = -1.215$. Các giá trị tối ưu này tương ứng với các thông số công nghệ: $t = 4.17(mm), F = 621.5(mm/ph), n = 2213(vg/ph)$ và $V_c = 55.6(m/ph)$.




*Hình 4. 2. Giá trị năng lượng tối ưu trong thuật toán PSO*

Năng lượng tiêu thụ nhỏ nhất đạt $0.005(Kwh)$ không có nghĩa là công suất tiêu thụ nhỏ vì mức năng lượng này còn phụ thuộc vào thời gian gia công. Nếu thời gian gia công nhỏ thì năng lượng cũng nhỏ. Chiều sâu cắt $t = 4.17(mm)$ với chiều sâu tổng là $10mm$ thì chỉ mất 3 lượt đưa dao xuống, với tốc độ chạy dao lớn nhất $F = 621.5(mm/phut)$, thời gian gia công sẽ rất nhỏ, do đó năng lượng sẽ nhỏ. Ở đây, công suất cắt có thể rất lớn nhưng do thời gian gia công rất nhỏ nên năng lượng tiêu thụ tổng nhỏ.

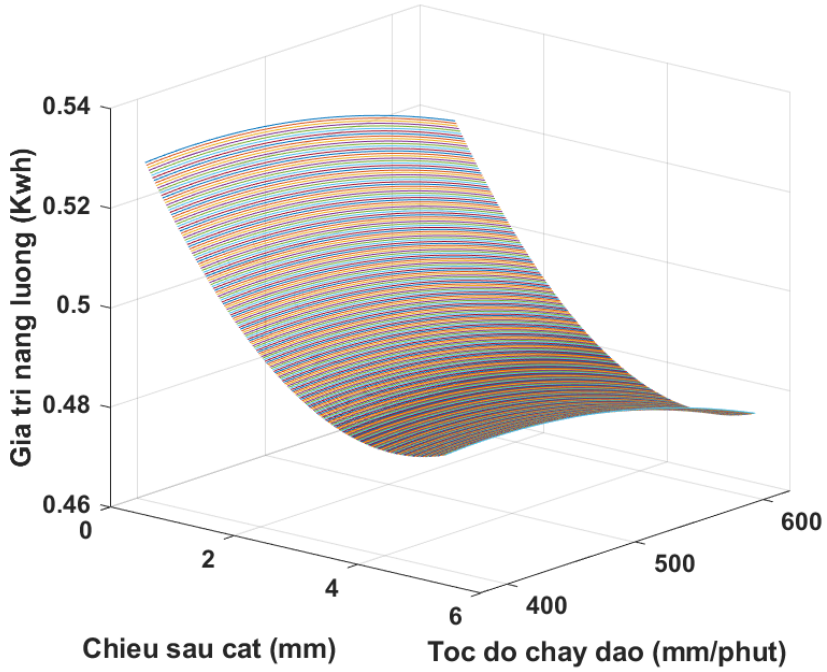
***e. Phân tích kết quả tối ưu***

*Đánh giá ảnh hưởng của chiều sâu cắt ($t$) và tốc độ chạy dao ($F$)*

Ứng với giá trị tối ưu vận tốc cắt $x_3 = -1.215$ hay $n = 2188(vong/phut)$ thì phương trình hồi quy năng lượng tiêu thụ phản ánh ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao có dạng:

$$Y_{NL} = 0.148753 - 0.18375x_1 - 0.050742x_2 + 0.0392x_1x_2 + \\ +0.1162x_1^2 - 0.02873x_2^2 \quad (4.2)$$

Từ hình 4.3 nhận thấy, năng lượng tiêu thụ càng lớn khi chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao càng nhỏ. Ngược lại, chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao càng lớn thì năng lượng tiêu thụ nhỏ. Khi tốc độ chạy dao cao nhất mà chiều sâu cắt nhỏ thì vẫn tiêu hao năng lượng lớn. Khi cố định vận tốc trục chính, chiều sâu cắt có ảnh hưởng tới năng lượng tiêu thụ nhiều hơn tốc độ chạy dao. Chiều sâu cắt nhỏ sẽ buộc dụng cụ cắt phải cắt nhiều lớp vật liệu theo chiều sâu hốc tròn. Mỗi lớp cắt gồm nhiều đường chạy dao ngang. Về cơ bản, thời gian gia công tăng lên rất cao. Năng lượng được xác định khi gia công thô, nghĩa là chạy dao từ phôi đặc, lực cắt lớn nên giá trị năng lượng tiêu thụ cũng lớn.

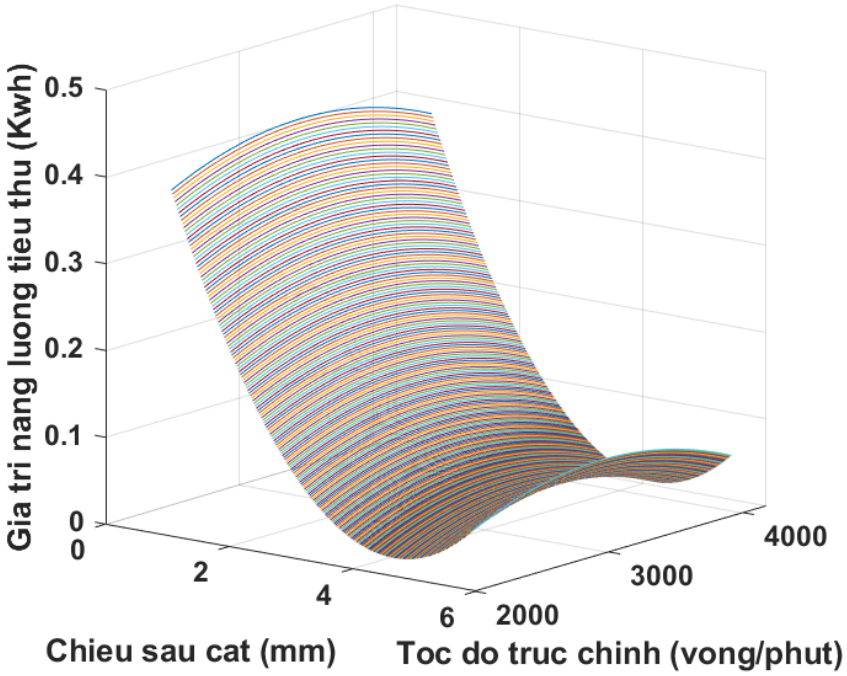



*Hình 4. 3. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao*

*Đánh giá ảnh hưởng của chiều sâu cắt ($t$) và vận tốc cắt ($V_c$)*

Ứng với giá trị tối ưu $x_2 = 1.215$ thì phương trình hồi quy năng lượng tiêu thụ phản ánh ảnh hưởng của chiều sâu cắt và vận tốc cắt có dạng:

$$Y_{NL} = 0.083367 - 0.1361x_1 + 0.1162x_1^2 - 0.02626x_3^2 \quad (4.3)$$




*Hình 4. 4. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ cắt*

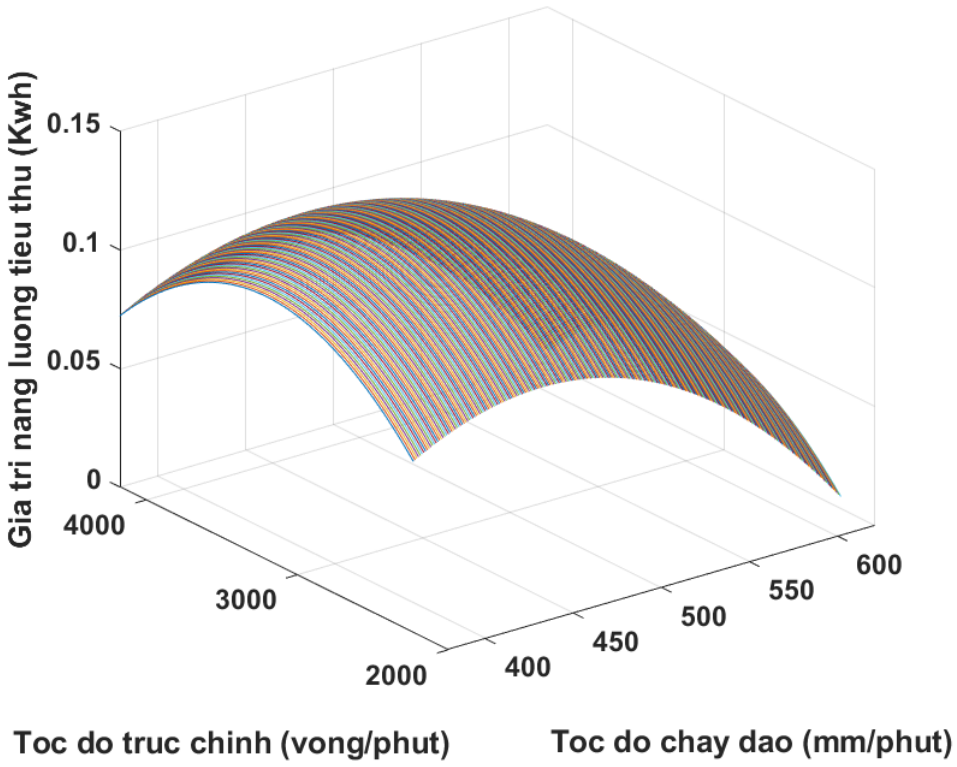
Dễ nhận thấy sự tương tự giữa hình 4.3 và hình 4.4, giá trị của chiều sâu cắt ảnh hưởng rất lớn đến năng lượng tiêu thụ, tốc độ cắt có ảnh hưởng nhưng không đáng kể. Việc tăng tốc độ cắt không làm tiêu hao nhiều năng lượng. Điểm này có thể được lý giải như sau: như phần chương 2 đã đề cập, năng lượng ban đầu để khởi động chuyển động của trục chính thường rất lớn. Tuy nhiên, khi trục chính đã chuyển động quay ổn định ở 1 tốc độ nào đó, việc tăng tốc độ trục chính lên cao hơn không gây tổn thất nhiều năng lượng nhờ quán tính của trục. Trong trường hợp này, giữ tốc độ chạy dao ở 1 giá trị cố định nhưng chiều sâu cắt càng nhỏ thì số lớp cắt càng lớn, số lớp cắt lớn dẫn tới thời gian gia công tăng. Thời gian gia công lớn thì năng lượng tiêu hao càng lớn.

Không những thế, năng lượng tiêu thụ có dấu hiệu giảm khi tiếp tục tăng tốc độ cắt.

*Đánh giá ảnh hưởng của tốc độ chạy dao ($F$) và vận tốc cắt ($V_c$)*

Ứng với giá trị tối ưu $x_1 = 0.5857$ thì phương trình hồi quy năng lượng tiêu thụ phản ánh ảnh hưởng của chiều sâu cắt và vận tốc cắt có dạng:

$$Y_{NL} = 0.11967 - 0.02774x_2 - 0.02873x_2^2 - 0.02626x_3^2 \quad (4.4)$$




*Hình 4. 5. Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao và tốc độ cắt*

Từ hình 4.5, dễ nhận thấy, khi cố định chiều sâu cắt ở 1 giá trị cố định, số lớp cắt cố định hay thời gian gia công lúc này chỉ còn phụ thuộc vào tốc độ chạy dao. Theo hình 4.5, năng lượng tiêu thụ sẽ nhỏ nhất khi tốc độ chạy dao lớn nhất và tốc độ cắt lớn nhất. Khi tốc độ cắt nhỏ nhất cũng cho phép năng lượng giảm. Dễ nhận ra, việc tăng hoặc giảm tốc độ cắt không làm ảnh hưởng nhiều đến năng lượng tiêu thụ như là khi tăng hay giảm tốc độ chạy dao. Nếu tốc độ chạy dao và tốc độ cắt ở mức độ trung bình (mức 0 trong thực nghiệm)

sẽ làm năng lượng tiêu hao rất lớn. Đối với gia công cao tốc, tốc độ trục chính thường rất lớn, như vậy xu hướng lập trình gia công nhằm giảm năng lượng tiêu thụ sẽ là cố gắng đẩy cao giá trị tốc độ chạy dao.

### *4.2.2. Nâng cao độ chính xác kích thước khi phay tinh cao tốc*

***a. Hàm mục tiêu***

Hàm mục tiêu chính là phương trình toán học thể hiện mối quan hệ giữa các thông số công nghệ với giá trị sai số khi phay tinh cao tốc thép hợp kim sau nhiệt luyện:

$$Y_{Saiso} = 0.02365 + 0.02961x_1 - 0.01234x_3 - 0.018456x_1x_2 - \\ -0.01521x_2x_3 - 0.01989x_1^2 \quad (4.5)$$

**Mục tiêu:** cần tìm các thông số công nghệ đảm bảo sai số kích thước gia công là nhỏ nhất.

***b. Điều kiện biên***

Thuật toán được xây dựng trên cơ sở các điều kiện như sau: $-1.215 \le x_1, x_2, x_3 \le 1.215$, tương ứng giới hạn các thông số công nghệ: tốc độ cắt là $95.5 \le V_c \le 145.7(m/ph)$, tốc độ trục chính là $3800 \le n \le 5800(vg/ph)$, tốc độ chạy dao: $575 \le F \le 825(mm/ph)$, chiều sâu cắt: $2.25 \le t \le 9.75(mm)$.

Điểm cần lưu ý, do đây là hàm mục tiêu về độ chính xác kích thước mà kích thước gia công luôn có dung sai. Ta cần đặt điều kiện cho giá trị hàm mục tiêu sao cho việc tìm giá trị nhỏ nhất phải nằm trong khoảng dung sai kích thước cho phép. Giả sử, trong trường hợp này, ta đặt dung sai kích thước đường kính lỗ tròn là $D = 22 \pm 0.02$. Điều này nghĩa là, giá trị hàm mục tiêu sai số phải đạt điều kiện: $-0.02 \le Y \le 0.02$. Tuy nhiên, do thuật toán PSO hay GA được thiết kế để tìm giá trị nhỏ nhất, nên điều kiện $-0.02 \le Y \le 0.02$ đã mặc định giá trị nhỏ nhất $Y_{\min} = -0.02$ (nếu xét về mặt toán học. Về mặt công nghệ, giá trị sai số nhỏ nhất khi nó tiến dần về 0). Do đó, bài toán đã đưa về dạng: tìm

$-1.215 \le x_1, x_2, x_3 \le 1.215$ sao cho $Y_{\min} = -0.02$. Hàm mục tiêu có dạng phi tuyến và có điều kiện hàm, nên trong trường hợp này, thuật toán GA được sử dụng.

***c. Các thông số thuật toán di truyền (GA)***

Các thông số thuật toán được mô tả như trong bảng 4.2.

*Bảng 4. 2. Thông số thuật toán GA*

| TT | Thông số | Ký hiệu | Giá trị |
|---|---|---|---|
| 1 | Số thế hệ tiến hóa | MaxGen | 50 |
| 2 | Kích thước quần thể ban đầu | npop | 100 |
| 3 | Tỉ lệ chọn lọc ngẫu nhiên | Se | 0.5 |
| 4 | Xác suất đột biến | Mu | 0.05 |

***d. Kết quả đáp ứng yêu cầu*** $Y_{\min} = -0.02\,(\text{mm})$

Giá trị nhỏ nhất $Y_{ss} = -0.02(mm)$ ứng với $x_1 = -0.772$, $x_2 = -0.4172$ và $x_3 = 0.6671$. Các giá trị tối ưu này tương ứng với các thông số công nghệ: $t = 3.68(mm), F = 658.3(mm/ph), n = 5534(vg/ph)$ và $V_c = 139(m/ph)$.

***e. Phân tích kết quả***

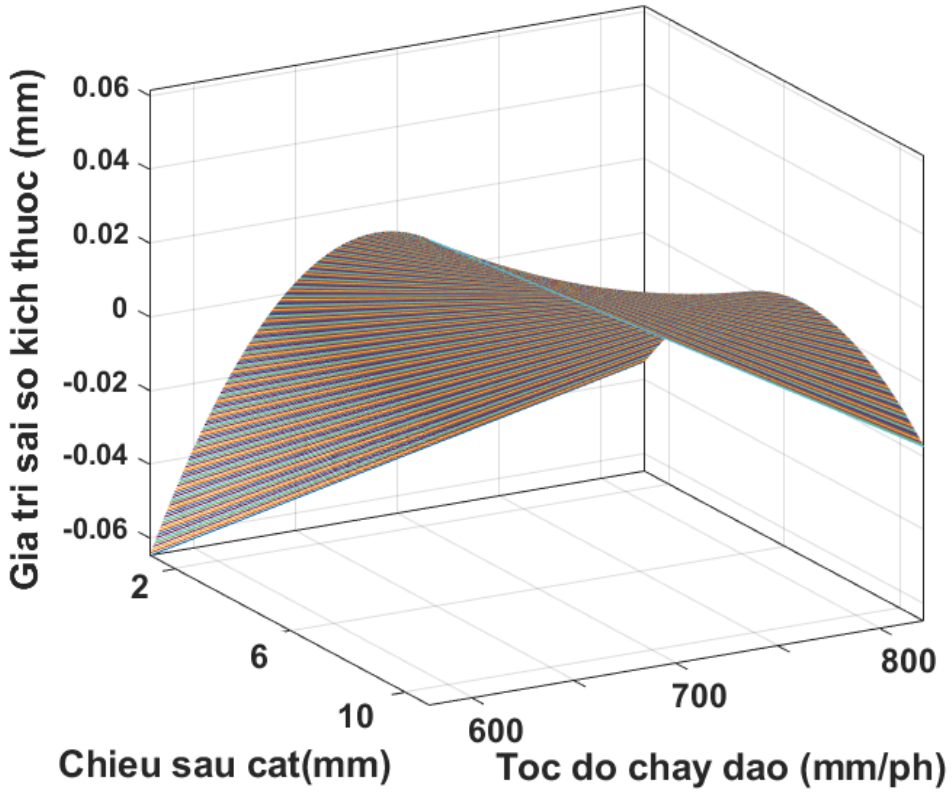
Cần chú ý rằng, độ chính xác kích thước và độ nhám bề mặt được đánh giá ở nguyên công phay tinh, nghĩa là lúc này hốc tròn đã được hình thành với lượng dư hai bên thành hốc tròn còn lại rất nhỏ, khoảng 0.1mm. Chiến lược chạy dao lúc này được lựa chọn theo kiểu chạy dao Profile (phay tinh thành hốc), ở mỗi chiều sâu cắt, dụng cụ cắt chỉ cần di chuyển hết 1 vòng đường kính hốc, không có bước chạy dao ngang như khi phay thô từ phôi đặc. Do đó, dù là vật liệu có độ cứng cao nhưng lực cắt cũng nhỏ hơn rất nhiều so với khi phay thôi, đây cũng là điều kiện để tăng giá trị chiều sâu cắt lên rất cao.

*Đánh giá ảnh hưởng của chiều sâu cắt ($t$) và tốc độ chạy dao ($F$)*

Ứng với giá trị $x_3 = 0.6671$ thì phương trình sai số kích thước phản ánh ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao có dạng:

$$Y_{ss} = 0.015418 + 0.02961x_1 - 0.018456x_1x_2 - 0.01014x_2 - 0.01989x_1^2 \qquad (4.6)$$

Theo hình 4.6, giá trị sai số tăng dần theo chiều âm khi giảm dần chiều sâu cắt (bởi sai số tiến dần về 0 mới là tốt nhất, tuy nhiên sẽ không bao giờ đạt đến 0 lý tưởng). Giá trị sai số tiến về 0 khi giữ nguyên tốc độ chạy dao và tăng dần chiều sâu cắt nhưng chỉ tăng đến một mức độ vừa phải (lân cận mức 0), nếu tiếp tục tăng thông số này sẽ làm tăng sai số. Việc tăng tốc độ chạy dao không ảnh hưởng nhiều đến sai số kích thước.

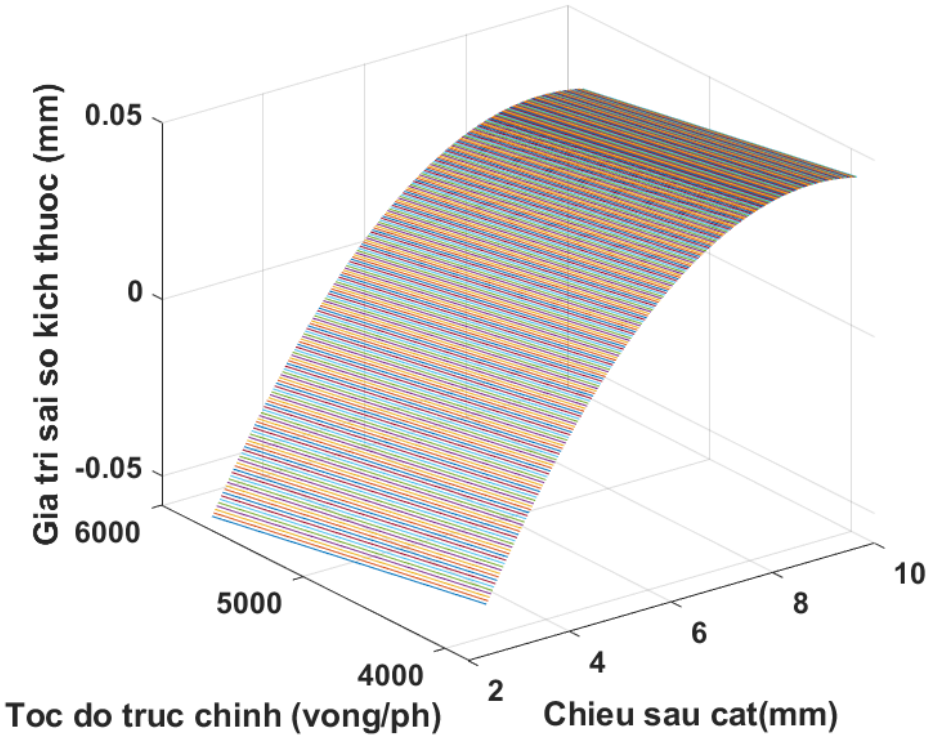



*Hình 4. 6. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao*

*Đánh giá ảnh hưởng của chiều sâu cắt ($t$) và vận tốc cắt ($V_c$)*

Ứng với giá trị $x_2 = -0.4172$ thì phương trình sai số kích thước phản ánh ảnh hưởng của chiều sâu cắt và vận tốc cắt có dạng:

$$Y_{ss} = 0.02365 + 0.03731x_1 - 0.006x_3 - 0.01989x_1^2 \quad (4.7)$$



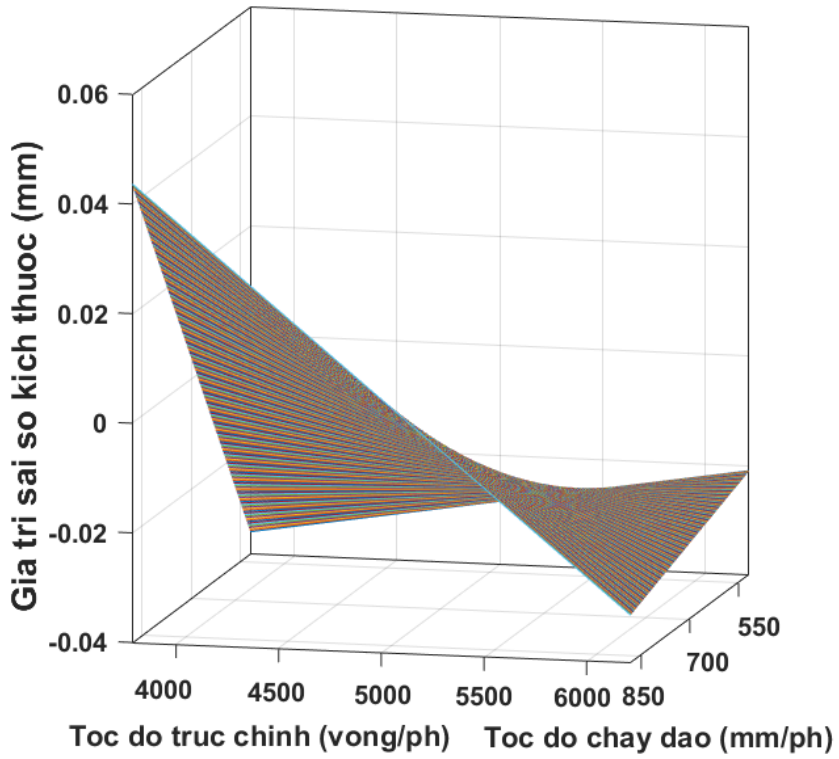

*Hình 4. 7. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ cắt*

Căn cứ vào hình 4.7, sự thay đổi tốc độ cắt không ảnh hưởng nhiều đến sai số. Chiều sâu cắt ảnh hưởng rất lớn. Tương tự như hình 4.6, sai số giảm dần khi tăng vừa phải giá trị chiều sâu cắt, nhưng tiếp tục tăng thì sai số cũng tăng trở lại.

*Đánh giá ảnh hưởng của tốc độ chạy dao ($F$) và vận tốc cắt ($V_c$)*

Ứng với giá trị $x_1 = -0.772$ thì phương trình sai số kích thước phản ánh ảnh hưởng của chiều sâu cắt và vận tốc cắt có dạng:

$$Y_{ss} = -0.01107 + 0.01425x_2 - 0.01234x_3 - 0.01521x_2x_3 \quad (4.8)$$




*Hình 4. 8. Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao và tốc độ cắt*

Hình 4.8 cho thấy, tốc độ chạy dao và tốc độ cắt tiến về mức trung bình thì sai số cũng tiến dần về 0. Tốc độ cắt nhỏ nhất hay lớn nhất và tốc độ chay dao lớn nhất tạo ra sai số lớn nhất.

### *4.2.3. Tối ưu hóa độ nhám bề mặt khi phay tinh cao tốc*

#### *a. Hàm mục tiêu*

Hàm mục tiêu giá trị độ nhám bề mặt thành lỗ khi phay tinh cao tốc thép hợp kim sau nhiệt luyện được xác định:

$$Y_{Nham} = 0.6097 - 0.11048x_3 + 0.1359x_1^2 - 0.0926x_2^2 \quad (4.9)$$

**Mục tiêu:** cần tìm các thông số công nghệ tối ưu đảm bảo độ nhám bề mặt thành lỗ là nhỏ nhất.

#### *b. Điều kiện biên*

Thuật toán được xây dựng trên cơ sở các điều kiện cụ thể như sau: $-1.215 \le x_1, x_2, x_3 \le 1.215$, tương ứng giới hạn các thông số công nghệ: tốc độ

cắt là $95.5 \le V_c \le 145.7(m/ph)$, tốc độ trục chính là $3800 \le n \le 5800(vg/ph)$, tốc độ chạy dao: $575 \le F \le 825(mm/ph)$, chiều sâu cắt: $2.25 \le t \le 9.75(mm)$.

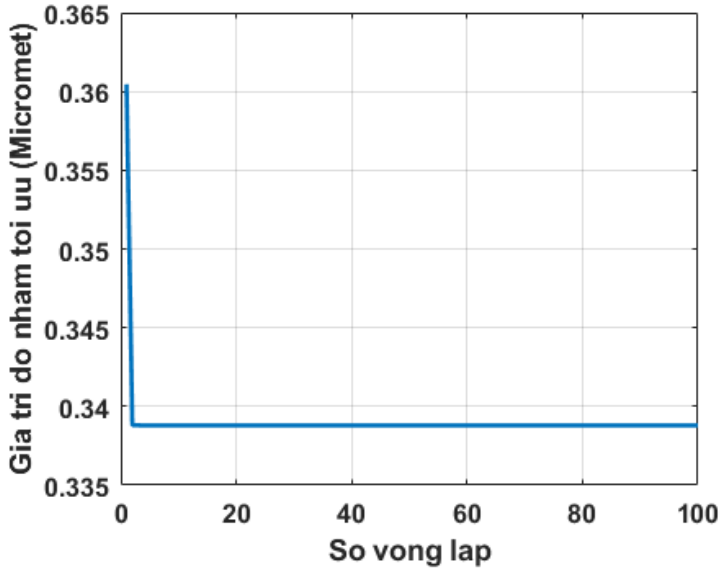
***c. Các thông số thuật toán bầy đàn (PSO)***

Bảng 4. 3. Thông số thuật toán PSO

| TT | Thông số | Ký hiệu | Giá trị |
|---|---|---|---|
| 1 | Số vòng lặp tìm kiếm | MaxIt | 100 |
| 2 | Kích thước quần thể bầy đàn | npop | 100 |
| 3 | Hệ số quán tính | w | 1 |
| 4 | Hệ số gia tốc từng cá thể | C1 | 2 |
| 5 | Hệ số gia tốc cả quần thể | C2 | 2 |

***d. Kết quả tối ưu***

Giá trị tối ưu được tìm thấy sau vòng lặp thứ 4 và giá trị độ nhám bề mặt nhỏ nhất có thể đạt được là $Y_{nham} = 0.34(\mu m)$ (hình 4.9), tại $x_1 = 0, x_2 = -1.215, x_3 = 1.215$. Các giá trị tối ưu này tương ứng với các thông số công nghệ: $t = 6(mm), F = 578.5(mm/ph), n = 5772(vg/ph)$ và $V_c = 145(m/ph)$.



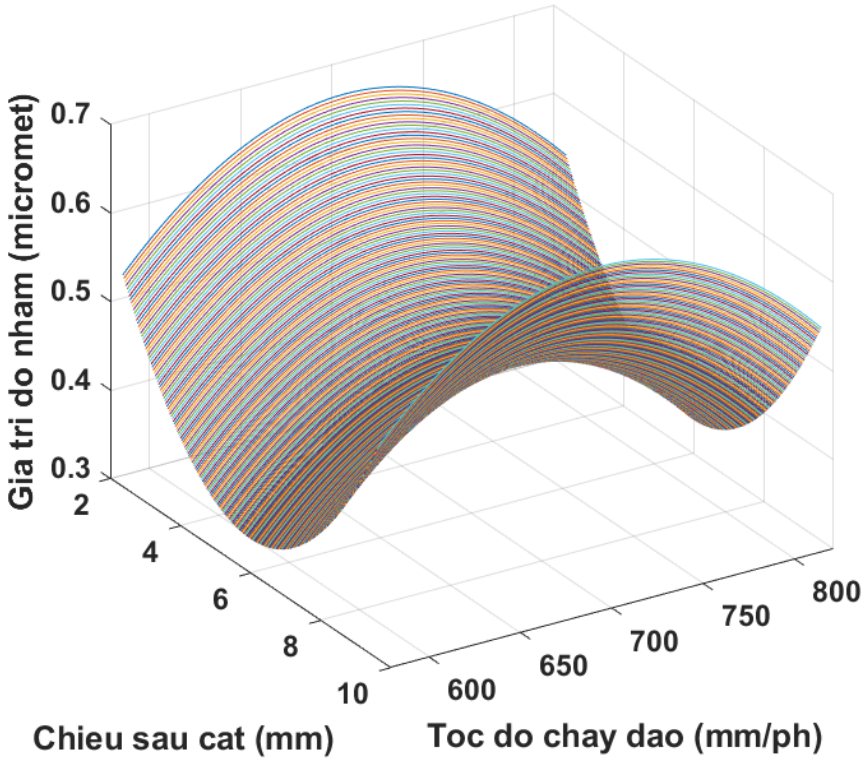

*Hình 4. 9. Giá trị độ nhám tối ưu*

***e. Phân tích kết quả tối ưu***

*Đánh giá ảnh hưởng của chiều sâu cắt ($t$) và tốc độ chạy dao ($F$)*

Ứng với giá trị tối ưu $x_3 = 1.215$ thì phương trình độ nhám bề mặt phản ánh ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao có dạng:

$$Y_{Nham} = 0.4755 + 0.1359x_1^2 - 0.0926x_2^2 \qquad (4.10)$$



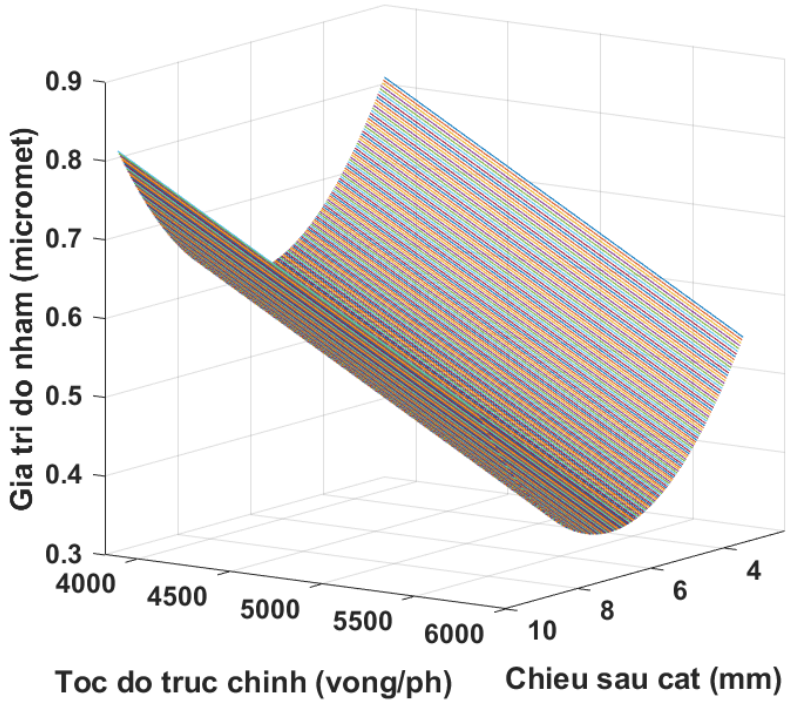

*Hình 4. 10. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao*

Chiều sâu cắt tăng dần hay giảm dần cùng với tốc độ chạy dao sẽ làm tăng giá trị độ nhám bề mặt. Ở mức 0 của thông số chiều sâu cắt ứng với tốc độ chạy dao thấp nhất hoặc cao nhất sẽ cho giá trị độ nhám thấp. Giá trị này sẽ tăng dần khi tăng tốc độ chạy dao. Tuy nhiên nếu tiếp tục tăng tốc độ chạy dao cao hơn nữa ứng với chiều sâu cắt cố định thì giá trị độ nhám giảm dần. Từ độ cong cảm quan của đồ thị 4.10, ta thấy chiều sâu cắt có xu hướng làm thay đổi giá trị độ nhám nhiều hơn so với tốc độ chạy dao.

*Đánh giá ảnh hưởng của chiều sâu cắt ($t$) và vận tốc cắt ($V_c$)*

Ứng với giá trị tối ưu $x_2 = -1.215$ thì phương trình hồi độ nhám bề mặt phản ánh ảnh hưởng của chiều sâu cắt và vận tốc cắt có dạng:

$$Y_{Nham} = 0.5603 - 0.11048x_3 + 0.1359x_1^2 \quad (4.11)$$




*Hình 4. 11. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ cắt*

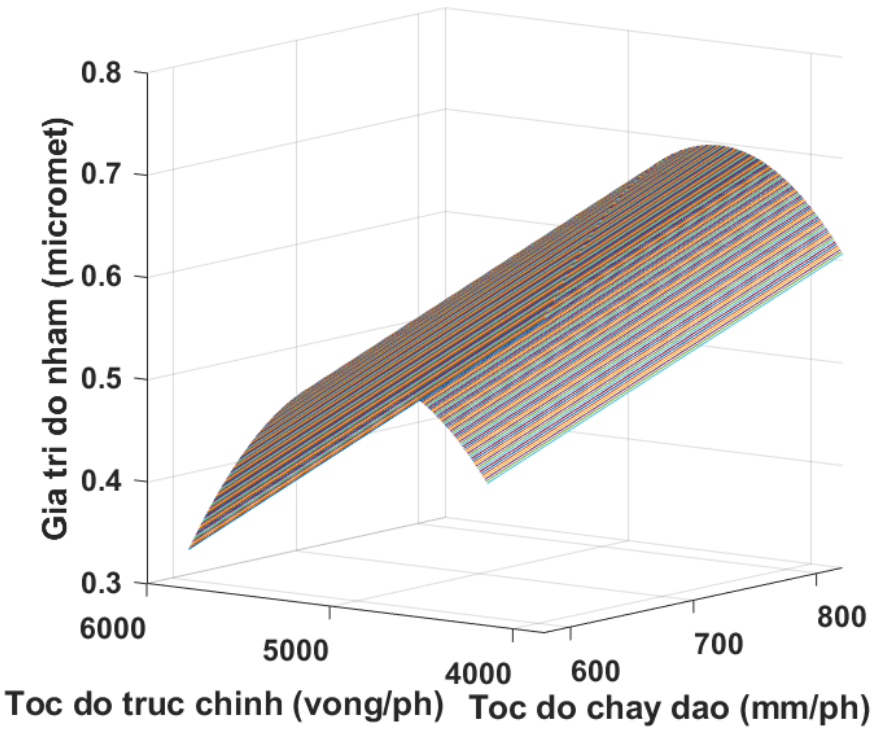
Hình 4.11 mô tả khá rõ ảnh hưởng phức tạp của thông số chiều sâu cắt tới giá trị độ nhám lớn hơn so với tốc độ cắt. Tốc độ cắt càng tăng thì giá trị độ nhám càng giảm, nghĩa là chất lượng bề mặt càng cao và ngược lại. Chất lượng bề mặt sẽ rất thấp nếu giảm dần tốc độ cắt, đồng thời tăng dần hay giảm dần chiều sâu cắt.

*Đánh giá ảnh hưởng của tốc độ chạy dao ($F$) và vận tốc cắt ($V_c$)*

Ứng với giá trị tối ưu $x_1 = 0$ thì phương trình độ nhám bề mặt phản ánh ảnh hưởng của chiều sâu cắt và vận tốc cắt có dạng:

$$Y_{Nham} = 0.6097 - 0.11048x_3 - 0.0926x_2^2 \quad (4.12)$$

Hình 4.12 thể hiện rõ tốc độ cắt tăng cao và tốc độ chạy dao nhỏ sẽ làm tăng chất lượng bề mặt khi phay tinh. Nếu giữ nguyên tốc độ cắt và tăng tốc độ chạy dao sẽ làm giảm dần chất lượng bề mặt, ứng với việc tăng dần giá trị độ nhám.




*Hình 4. 12. Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao và tốc độ cắt*

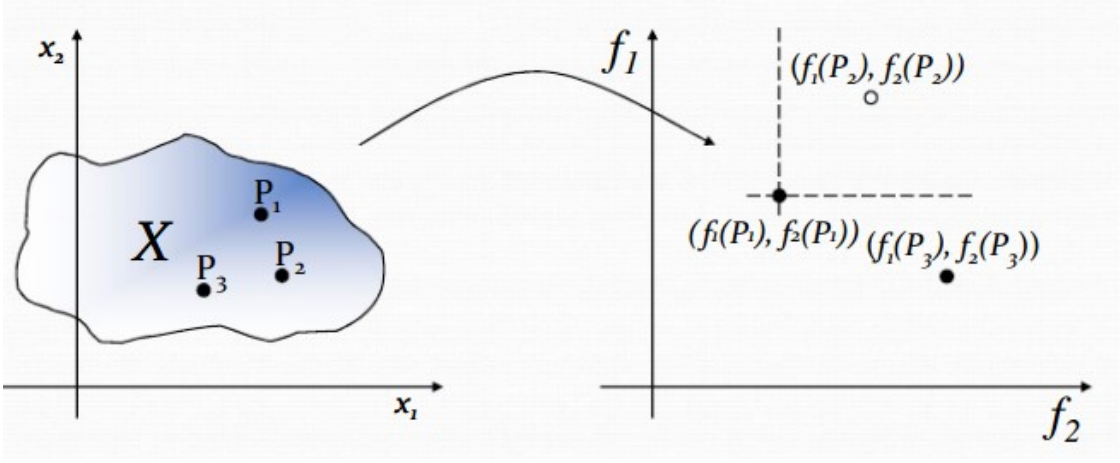
## 4.3. Tối ưu hóa đa mục tiêu

### *4.3.1. Phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu*

Tối ưu hóa nhiều mục tiêu có nghĩa là tìm phương án tốt nhất theo một nghĩa nhất định nào đó để đạt được (cực đại hay cực tiểu) nhiều mục tiêu cùng một lúc.

Một phương án thỏa mãn được nhiều mục tiêu thì ta gọi đó là phương án lý tưởng. Tuy nhiên, thực tế trong một bài toán tối ưu nhiều mục tiêu, thường các mục tiêu xung đột với nhau nên việc cố gắng làm tăng giá trị cực đại hay cực tiểu của mục tiêu này có thể làm giảm giá trị cực tiểu hay cực đại của mục tiêu khác. Vì vậy, để tìm được giá trị tối ưu cùng thỏa mãn các yêu cầu của các hàm mục tiêu là rất khó khăn và hiếm gặp. Cách tốt nhất là tìm một phương án

nhằm thỏa mãn tất cả các mục tiêu đặt ra trong một mức độ chấp nhận được và phương án như thế gọi là phương án thỏa hiệp của các hàm mục tiêu.




*Hình 4. 13. Mô hình nghiệm tối ưu đa mục tiêu*

Hình 4.13 mô tả mô hình tìm nghiệm tối ưu đa mục tiêu với hai không gian giá trị khác nhau (không gian biến và không gian hàm).

Về phương pháp tìm nghiệm cho bài toán tối ưu đa mục tiêu, có thể kể đến các phương pháp:

*a. Phương pháp tổng trọng số*

Về mặt lý thuyết, để giải bài toán tối ưu đa mục tiêu thì ta chuyển bài toán này về bài toán tối ưu một mục tiêu bằng cách vô hướng hoá các hàm mục tiêu. Có nhiều cách vô hướng hoá mà ứng với mỗi cách sẽ cho kết quả nghiệm tối ưu khác nhau. Phương pháp vô hướng hóa cơ bản thường được sử dụng là phương pháp tổng trọng số [147]. Bài toán đặt ra, tìm giá trị nhỏ nhất cho các hàm mục tiêu $f_1(x), f_2(x), ..., f_p(x)$:

$$\begin{aligned} &Min_{x\in X} f(x) = \left[ f_1(x), \quad f_2(x), \quad ..., \quad f_p(x) \right]; \\ &X = \left\{ x \in R^n : h(x) \le 0; g(x) = 0 \right\} \end{aligned} \tag{4.13}$$

Trong đó:

$p$: số hàm mục tiêu

$n$: số lượng biến $x$ trong các hàm mục tiêu

$X$ : miền giới hạn của các biến $x$ và các điều kiện ràng buộc

$x$ : các biến trong hàm mục tiêu

$h(x), g(x)$ : các hàm ràng buộc dạng bất phương trình hoặc phương trình.

Hàm mục tiêu tổng theo phương pháp tổng trọng số được xây dựng như sau:

$$\phi(x, \mathrm{w}) = \sum_{i=1}^{p} \mathrm{w}_i f_i(x) \tag{4.14}$$

Trong đó:

$\mathrm{w}_i$ : trọng số đánh giá mức độ ảnh hưởng của hàm $f_i(x)$ trong hàm mục tiêu tổng $\phi(x, \mathrm{w})$ với $\sum_{i=1}^{p} \mathrm{w}_i = 1$ và $\mathrm{w}_i \in [0,1]; i = 1,.., p$.

Tuy nhiên, phương pháp tổng trọng số có một số hạn chế như:

Các nghiệm tối ưu phân bố không đều trên miền giới hạn.

Số lượng nghiệm tối ưu được tìm là rất hạn chế.

Người giải phải tự thiết lập các giá trị trọng số $\mathrm{w}_i$.

Để khắc phục các hạn chế, phương pháp tổng trọng số chấp nhận được được phát triển theo hướng chuẩn hóa các hàm $f_i(x)$ như sau:

$$\phi(x, \mathrm{w}) = \mathrm{w}_1 \frac{f_1(x)}{\overline{f}_1(x)} + \mathrm{w}_2 \frac{f_2(x)}{\overline{f}_2(x)} + ... + \mathrm{w}_p \frac{f_p(x)}{\overline{f}_p(x)} \text{ với } \sum_{i=1}^{p} \mathrm{w}_i = 1 \tag{4.15}$$

Trong đó, $\overline{f}_i(x); i = 1,.., p$ là hàm chuẩn hóa của hàm $f_i(x)$. Tuy nhiên, vấn đề chọn được giá trị trọng số $\mathrm{w}_i$ phù hợp vẫn là thử thách rất lớn.

*b. Phương pháp tối ưu đa mục tiêu sử dụng thuật toán thông minh*

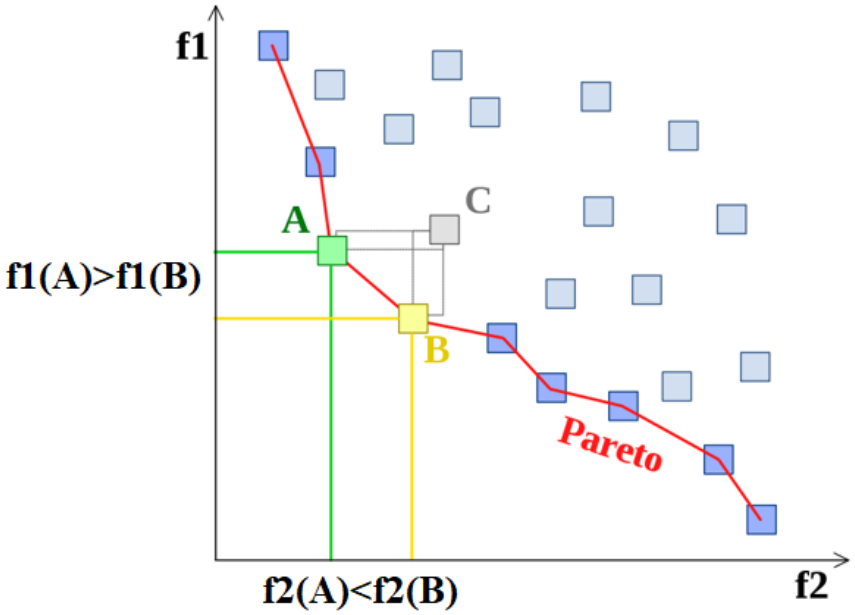
Gần đây, có một số cách tiếp cận mới rất hiệu quả để tìm các nghiệm tối ưu phù hợp với bài toán tối ưu đa mục tiêu (nghiệm Pareto). Đó là sử dụng các thuật toán thông minh như thuật toán di truyền cải thiện (MOGA, NSGA II) [148], thuật toán bầy đàn (PSO), thuật toán trí tuệ nhân tạo (mạng nơ ron – Neural Network, học sâu - Deep Learning, học tăng cường – Reinforcement

Learning). Điểm chung của các phương pháp này là tìm được đường biên của các nghiệm tối ưu Pareto. Với sự phát triển mạnh mẽ của ngành khoa học máy tính, tính hiệu quả của các thuật toán ngày càng được cải thiện nên các phương pháp tối ưu sử dụng thuật toán thông minh dần chiếm ưu thế hơn các phương pháp truyền thống trước đây. Do đó, luận án sử dụng các thuật toán GA hoặc PSO trong phần tối ưu đa mục tiêu này.

*c. Nghiệm tối ưu Pareto và đường biên Pareto*

Nghiệm tối ưu Pareto là nghiệm $x^* \in X$ nếu không tồn tại một nghiệm chấp nhận $x \neq x^*; x, x^* \in X$ sao cho: $x$ trội hơn $x^*$ (có thể hiểu, nghiệm Pareto là những nghiệm $x^*$ tạo ra các giá trị tối ưu mà không bị chi phối bởi các giá trị của các nghiệm $x$ nào khác).

Đường biên Pareto là đường tạo bởi tập hợp các nghiệm tối ưu Pareto (Hình 4.14).




*Hình 4. 14. Ví dụ về đường biên Pareto*

Điểm C nằm trong miền các giải pháp khả thi nhưng không nằm trên đường biên Pareto bởi nó bị chi phối bởi các điểm khác (A, B). Các điểm A, B

nằm trên đường biên Pareto vì nó không bị chi phối bởi bất kì điểm nào khác ngoài các điểm cùng nằm trên đường biên với nó. Như vậy, ứng với từng hàm mục tiêu, giá trị nhỏ hơn luôn được ưu tiên hơn các giá trị lớn hơn. Tuy nhiên, các giải pháp tối ưu trên đường biên không hẳn là thỏa mãn mong muốn của tất cả các hàm mục tiêu nhưng đó là những giá trị tối ưu khả thi nhất. Ví dụ, nếu chọn điểm tối ưu A thì thỏa mãn được hàm $f_2(x)$ do $f_2(A) < f_2(B)$ nhưng không thỏa mãn được mong muốn của hàm $f_1(x)$ do $f_1(A) > f_1(B)$. Việc chọn giải pháp nào hoàn toàn phụ thuộc vào mong muốn chủ quan về việc xác định hàm mục tiêu nào cần thiết hơn, quan trọng hơn.

### *4.3.2. Tối ưu hóa đa mục tiêu khi phay tinh cao tốc thép hợp kim sau nhiệt luyện*

Trong trường hợp này, cần tìm được bộ thông số công nghệ phù hợp khi phay tinh cao tốc đảm bảo sai số kích thước là nhỏ nhất, độ nhám bề mặt thành lỗ là tốt nhất (nghĩa là giá trị độ nhám là nhỏ nhất).

Hàm mục tiêu sai số kích thước như sau:

$$Y_{ss} = 0.02365 + 0.02961x_1 - 0.01234x_3 - 0.018456x_1x_2 - \\ -0.01521x_2x_3 - 0.01989x_1^2 \quad (4.16)$$

Hàm mục tiêu độ nhám như sau:

$$Y_{Nham} = 0.6097 - 0.11048x_3 + 0.1359x_1^2 - 0.0926x_2^2 \quad (4.17)$$

Điều kiện biên về chế độ công nghệ như sau: $-1.215 \le x_1, x_2, x_3 \le 1.215$, tương ứng giới hạn các thông số công nghệ: tốc độ cắt là $95.5 \le V_c \le 145.7(m/ph)$, tốc độ trục chính là $3800 \le n \le 5800(vg/ph)$, tốc độ chạy dao: $575 \le F \le 825(mm/ph)$, chiều sâu cắt: $2.25 \le t \le 9.75(mm)$ và $es \le Y_{saiso} \le ES(mm)$. Trong đó: $es, ES$ lần lượt là giới hạn trên và giới hạn dưới của dung sai kích thước đường kính. Đây chính là điều kiện giới hạn giá trị cho hàm mục tiêu, mang tính chất phi tuyến. Chính điều này làm tăng tính phức tạp

đối với thuật toán PSO. Do đó, bài toán đa mục tiêu có điều kiện này được giải bằng cách sử dụng thuật toán di truyền GA.

Do tính chất khác biệt của hàm mục tiêu sai số kích thước (giá trị nhỏ nhất là giá trị tối ưu nhưng chưa chắc là tốt nhất, bởi sai số tiến về 0 mới là tốt nhất) nên cần chia trường hợp đối với các khoảng dung sai kích thước khác nhau, nhằm có dữ liệu đánh giá tổng thể hơn và thực tế hơn. Hàm mục tiêu sai số kích thước được chia làm 3 trường hợp ứng với 3 miền giới hạn hàm mục tiêu sai số khác nhau.

**Trường hợp 1 (TH1):** $es = -0.06, ES = 0.06(mm)$ (vùng sai số rộng)

**Trường hợp 2 (TH2):** $es = -0.025, ES = 0.025(mm)$ (vùng sai số hẹp)

**Trường hợp 3 (TH3):** $es = 0, ES = 0.02$ (vùng sai số dương)

Các thông số thuật toán di truyền cho bài toán tối ưu đa mục tiêu được mô tả trong bảng 4.4.

*Bảng 4. 4. Thông số thuật toán GA*

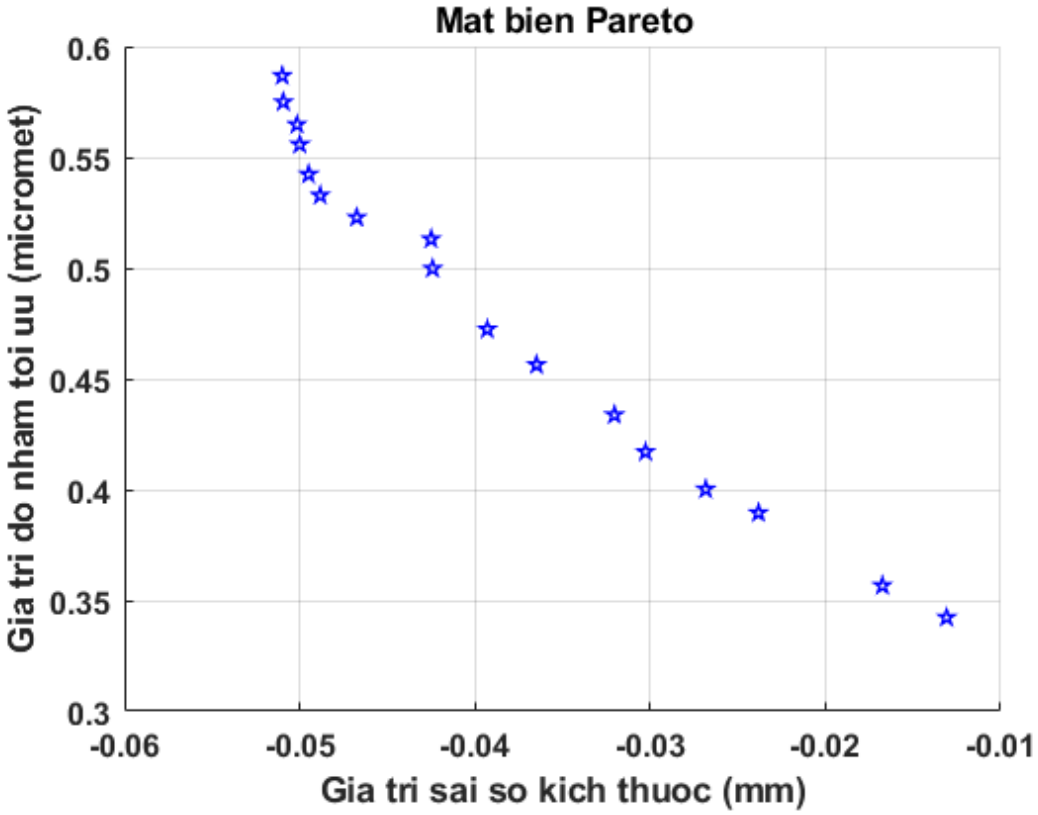
| TT | Thông số | Ký hiệu | Giá trị |
|---|---|---|---|
| 1 | Số thế hệ tiến hóa | MaxGen | 50 |
| 2 | Kích thước quần thể ban đầu | npop | 100 |
| 3 | Tỉ lệ chọn lọc ngẫu nhiên | Se | 0.5 |
| 4 | Xác suất đột biến | Mu | 0.05 |

Kết quả bài toán tối ưu đa mục tiêu cho các trường hợp được thể hiện dưới đây.

**Trường hợp 1 (TH1):** $es = -0.06, ES = 0.06(mm)$ (vùng sai số rộng)

Theo kết quả trên hình 4.15, vị trí lấy nghiệm tối ưu đa mục tiêu tốt nhất là vị trí có độ nhám nhỏ nhất và giá trị sai số nằm lân cận giá trị 0, ứng với vị trí $y_{nham} = 0.342(\mu m)$ và $y_{ss} = -0.013(mm)$. Các giá trị này đạt được khi

$t = 6(mm)$, $F = 820(mm/ph)$ và $n = 5760(vg/ph)$. Bảng 4.5 mô tả một số vị trí tối ưu đa mục tiêu khác trên mặt biên Pareto.




*Hình 4. 15. Kết quả tối ưu đa mục tiêu cho TH1*

*Bảng 4. 5. Bộ các thông số tối ưu đa mục tiêu cho TH1*

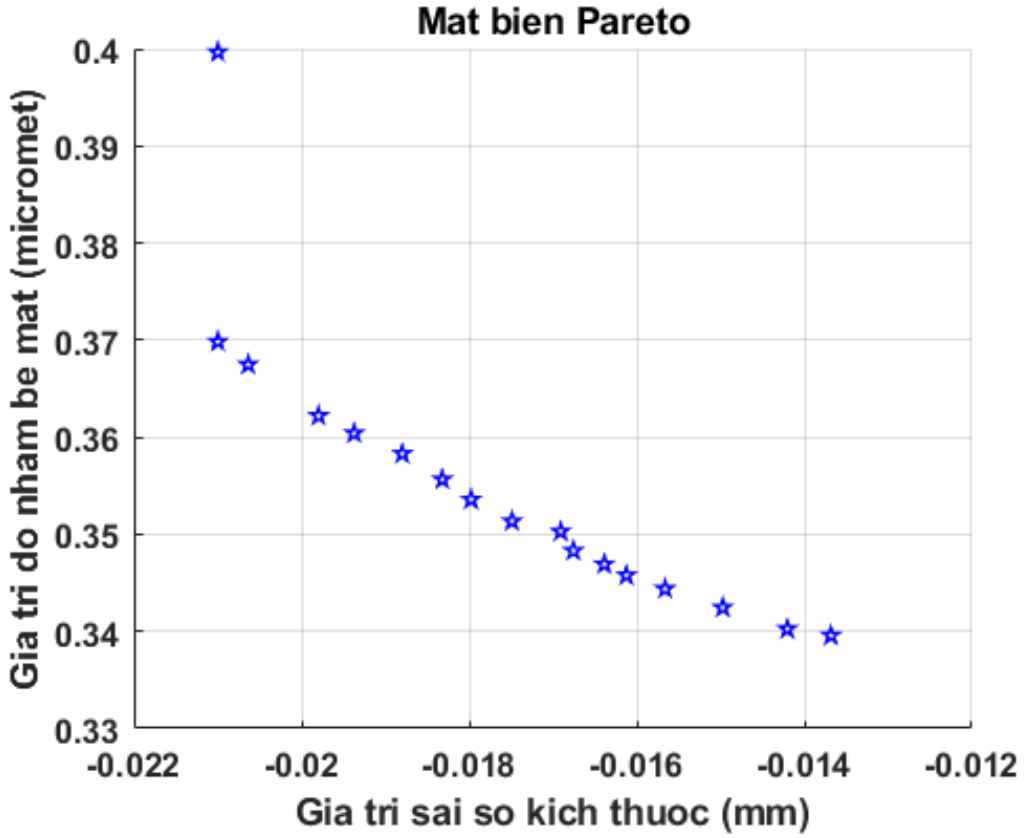
| TT | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $Y_{ss}$ | $Y_{nham}$ | t (mm) | F (mm/ph) | n (vg/ph) | $V_c$ (m/ph) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -1.0772 | -1.1508 | 0.6324 | -0.051 | 0.575 | 2.8 | 584.9 | 5305.9 | 133.3 |
| 2 | -1.0772 | -1.1273 | 0.5697 | -0.051 | 0.587 | 2.8 | 587.3 | 5255.7 | 132.0 |
| 3 | -1.0765 | -1.1510 | 0.8034 | -0.050 | 0.556 | 2.8 | 584.9 | 5442.7 | 136.7 |
| 4 | -1.0556 | -1.1484 | 1.0523 | -0.047 | 0.523 | 2.8 | 585.2 | 5641.8 | 141.7 |
| 5 | -0.8148 | 1.2065 | 1.1899 | -0.032 | 0.434 | 3.6 | 820.7 | 5751.9 | 144.5 |
| 6 | -1.0772 | -1.1273 | 0.5697 | -0.051 | 0.587 | 2.8 | 587.3 | 5255.7 | 132.0 |
| 7 | -0.7491 | 1.2066 | 1.2141 | -0.030 | 0.417 | 3.8 | 820.7 | 5771.2 | 145.0 |
| 8 | -1.0655 | -1.1820 | 0.6324 | -0.050 | 0.565 | 2.8 | 581.8 | 5305.9 | 133.3 |
| 9 | -0.6573 | 1.2066 | 1.2080 | -0.027 | 0.400 | 4.0 | 820.7 | 5766.4 | 144.9 |
| 10 | -0.5718 | 1.1935 | 1.2017 | -0.024 | 0.389 | 4.3 | 819.3 | 5761.4 | 144.7 |
| 11 | -0.9138 | 1.2042 | 1.2001 | -0.036 | 0.456 | 3.3 | 820.4 | 5760.0 | 144.7 |

*Bảng 4.5. Bộ các thông số tối ưu đa mục tiêu cho TH1 (tiếp)*

| TT | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $Y_{ss}$ | $Y_{nham}$ | t (mm) | F (mm/ph) | n (vg/ph) | $V_c$ (m/ph) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 | -1.0498 | 1.1787 | 1.1864 | -0.042 | 0.500 | 2.9 | 817.9 | 5749.1 | 144.4 |
| 13 | -1.0714 | -1.1830 | 0.8497 | -0.049 | 0.542 | 2.8 | 581.7 | 5479.8 | 137.7 |
| 14 | -0.3039 | 1.2065 | 1.1840 | -0.017 | 0.357 | 5.1 | 820.7 | 5747.2 | 144.4 |
| 15 | -0.9763 | 1.2042 | 1.2001 | -0.039 | 0.472 | 3.1 | 820.4 | 5760.0 | 144.7 |
| 16 | -1.0498 | 1.1162 | 1.1864 | -0.042 | 0.513 | 2.9 | 811.6 | 5749.1 | 144.4 |
| 17 | -1.0757 | -1.1496 | 1.0119 | -0.049 | 0.533 | 2.8 | 585.0 | 5609.6 | 140.9 |
| 18 | 0.0160 | 1.2065 | 1.2009 | -0.013 | 0.342 | 6.0 | 820.7 | 5760.7 | 144.7 |

**Trường hợp 2 (TH2):** $es = -0.025, ES = 0.025(mm)$ (vùng sai số hẹp)

Đánh giá tương tự cho các trường hợp TH2 (vùng sai số hẹp) và TH3 (vùng sai số dương). Kết quả TH2 thể hiện ở hình 4.16 và bảng 4.6. Kết quả TH3 thể hiện ở hình 4.17 và bảng 4.7.




*Hình 4. 16. Kết quả tối ưu đa mục tiêu cho TH2*

*Bảng 4. 6. Bộ các thông số tối ưu đa mục tiêu cho TH2*

| TT | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $Y_{ss}$ | $Y_{nham}$ | t (mm) | F (mm/ph) | n (vg/ph) | $V_c$ (m/ph) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.4606 | 1.2093 | 1.2065 | -0.020 | 0.370 | 4.62 | 820.9 | 5765.2 | 144.8 |
| 2 | -0.2128 | 1.2122 | 1.2133 | -0.016 | 0.346 | 5.36 | 821.2 | 5770.6 | 145.0 |
| 3 | -0.5221 | 1.1254 | 1.1752 | -0.021 | 0.400 | 4.43 | 812.5 | 5740.2 | 144.2 |
| 4 | -0.4040 | 1.2111 | 1.2118 | -0.020 | 0.362 | 4.79 | 821.1 | 5769.5 | 144.9 |
| 5 | -0.1361 | 1.2117 | 1.2114 | -0.015 | 0.342 | 5.59 | 821.2 | 5769.2 | 144.9 |
| 6 | -0.2697 | 1.2113 | 1.2080 | -0.017 | 0.350 | 5.19 | 821.1 | 5766.4 | 144.9 |
| 7 | -0.3632 | 1.2108 | 1.2093 | -0.019 | 0.358 | 4.91 | 821.1 | 5767.4 | 144.9 |
| 8 | -0.2295 | 1.2115 | 1.2134 | -0.016 | 0.347 | 5.31 | 821.2 | 5770.7 | 145.0 |
| 9 | -0.5221 | 1.1254 | 1.1752 | -0.021 | 0.400 | 4.43 | 812.5 | 5740.2 | 144.2 |
| 10 | -0.3380 | 1.2110 | 1.2111 | -0.018 | 0.356 | 4.99 | 821.1 | 5768.8 | 144.9 |
| 11 | -0.3179 | 1.2113 | 1.2131 | -0.018 | 0.354 | 5.05 | 821.1 | 5770.5 | 145.0 |
| 12 | -0.4442 | 1.2102 | 1.2079 | -0.021 | 0.367 | 4.67 | 821.0 | 5766.3 | 144.8 |
| 13 | 0.0029 | 1.2121 | 1.2139 | -0.014 | 0.340 | 6.01 | 821.2 | 5771.1 | 145.0 |
| 14 | -0.0617 | 1.2116 | 1.2135 | -0.014 | 0.340 | 5.81 | 821.2 | 5770.8 | 145.0 |
| 15 | -0.1832 | 1.2114 | 1.2132 | -0.016 | 0.344 | 5.45 | 821.1 | 5770.5 | 145.0 |
| 16 | -0.3867 | 1.2113 | 1.2109 | -0.019 | 0.360 | 4.84 | 821.1 | 5768.7 | 144.9 |
| 17 | -0.2515 | 1.2118 | 1.2132 | -0.017 | 0.348 | 5.25 | 821.2 | 5770.6 | 145.0 |
| 18 | -0.2920 | 1.2115 | 1.2134 | -0.017 | 0.351 | 5.12 | 821.2 | 5770.7 | 145.0 |

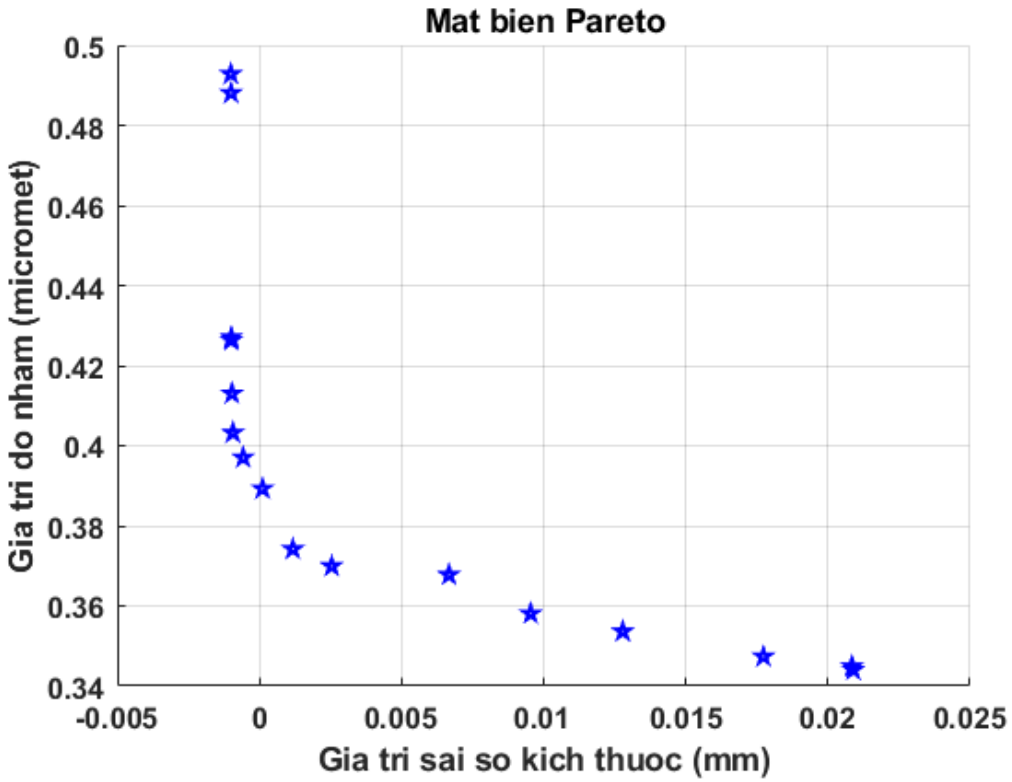
**Trường hợp 3 (TH3):** $es = 0, ES = 0.02$ (vùng sai số dương)

*Bảng 4. 7. Bộ các thông số tối ưu đa mục tiêu cho TH3*

| TT | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $Y_{ss}$ | $Y_{nham}$ | t (mm) | F (mm/ph) | n (vg/ph) | $V_c$ (m/ph) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.3013 | -0.0403 | 1.1684 | -0.001 | 0.493 | 5.1 | 696.0 | 5734.7 | 144.1 |
| 2 | 0.2268 | 0.9299 | 0.9984 | -0.001 | 0.426 | 6.7 | 793.0 | 5598.7 | 140.6 |
| 3 | -0.2827 | -0.0088 | 1.1994 | -0.001 | 0.488 | 5.2 | 699.1 | 5759.5 | 144.7 |
| 4 | -0.4961 | -1.0912 | 1.1737 | -0.001 | 0.403 | 4.5 | 590.9 | 5739.0 | 144.2 |
| 5 | -0.4895 | -1.0322 | 1.1821 | -0.001 | 0.413 | 4.5 | 596.8 | 5745.7 | 144.3 |
| 6 | -0.1827 | -1.2134 | 1.2121 | 0.021 | 0.344 | 5.5 | 578.7 | 5769.6 | 144.9 |
| 7 | -0.3131 | -1.2124 | 1.2067 | 0.013 | 0.354 | 5.1 | 578.8 | 5765.3 | 144.8 |
| 8 | 0.2384 | 0.9278 | 1.0014 | -0.001 | 0.427 | 6.7 | 792.8 | 5601.1 | 140.7 |
| 9 | -0.4892 | -1.1382 | 1.2040 | 0.000 | 0.389 | 4.5 | 586.2 | 5763.2 | 144.8 |
| 10 | -0.4647 | -1.2115 | 1.2059 | 0.003 | 0.370 | 4.6 | 578.9 | 5764.8 | 144.8 |

*Bảng 4.7. Bộ các thông số tối ưu đa mục tiêu cho TH3 (tiếp)*

| TT | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $Y_{ss}$ | $Y_{nham}$ | t (mm) | F (mm/ph) | n (vg/ph) | $V_c$ (m/ph) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 11 | -0.2347 | -1.2120 | 1.2115 | 0.018 | 0.347 | 5.3 | 578.8 | 5769.2 | 144.9 |
| 12 | -0.3627 | -1.2117 | 1.2091 | 0.010 | 0.358 | 4.9 | 578.8 | 5767.3 | 144.9 |
| 13 | -0.1827 | -1.2134 | 1.2042 | 0.021 | 0.345 | 5.5 | 578.7 | 5763.4 | 144.8 |
| 14 | -0.3013 | -0.0403 | 1.1684 | -0.001 | 0.493 | 5.1 | 696.0 | 5734.7 | 144.1 |
| 15 | -0.4946 | -1.1106 | 1.1922 | -0.001 | 0.397 | 4.5 | 588.9 | 5753.7 | 144.5 |
| 16 | -0.4828 | -1.2028 | 1.2062 | 0.001 | 0.374 | 4.6 | 579.7 | 5765.0 | 144.8 |
| 17 | -0.4013 | -1.1886 | 1.2042 | 0.007 | 0.368 | 4.8 | 581.1 | 5763.4 | 144.8 |
| 18 | -0.1827 | -1.2134 | 1.2121 | 0.020 | 0.344 | 5.5 | 578.7 | 5769.6 | 144.9 |




*Hình 4. 17. Kết quả tối ưu đa mục tiêu cho TH3*

## 4.4. Đề xuất ứng dụng mạng trí tuệ nhân tạo trong xác định vùng thông số công nghệ khả thi

Đề xuất này dựa trên ý tưởng, căn cứ vào cơ sở dữ liệu có được từ phương trình hồi quy, giới hạn vùng giá trị các thông số công nghệ và giới hạn giá trị của các hàm mục tiêu, ta có thể xây dựng mạng nơ tron trí tuệ nhân tạo nhằm

dự đoán giá trị các thông số công nghệ theo yêu cầu đầu vào của hàm mục tiêu. Cụ thể, có thể ứng dụng mạng nơ tron đã được huấn luyện này để tìm được bộ thông số công nghệ khả thi cho các yêu cầu bất kỳ (trong giới hạn cho phép) về sai số kích thước hoặc giá trị độ nhám mong muốn. Riêng vấn đề năng lượng tiêu thụ khi phay thô cao tốc ta chưa xem xét trong trường hợp này bởi có nhiều yếu tố ngẫu nhiên khó kiểm soát hơn so với các thực nghiệm thông thường như sự thay đổi đột ngột của điện áp, cường độ dòng điện trong khi gia công và đo đạc.

Khi đi sâu phân tích cụ thể, có hai bài toán cần mô tả như sau:

### *4.4.1. Bài toán thuận*

Cho véc tơ $\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & ... & y_n \end{bmatrix}^T$ là tập hợp của $n$ hàm mục tiêu. Véc tơ biến $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & ... & x_m \end{bmatrix}^T$. Trong đó, hàm $y_i = f(x_1, x_2, ..., x_m); i = 1..n$ là các hàm mục tiêu của $m$ biến $x_j; j = 1..m$. Đưa về hàm tổng quát là $\mathbf{y} = f(\mathbf{x}); \mathbf{y} \in R^n, \mathbf{x} \in R^m$. Nếu cho trước tập hợp giá trị véc tơ $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & ... & x_m \end{bmatrix}^T$, yêu cầu tìm giá trị véc tơ hàm mục tiêu $\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 & ... & y_n \end{bmatrix}^T$ thì đó có thể coi là bài toán thuận. Có thể thiết kế mạng trí tuệ nhân tạo để giải quyết vấn đề này. Tài liệu [149] đã xem xét bài toán này với 1 hàm mục tiêu về độ nhám $y_1 = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$. Kết quả giải mạng nơ tron bài toán thuận cho phép dự đoán được kết quả hàm mục tiêu từ việc cho trước các giá trị $x_j; j = 1..4$ (hiểu đơn giản, cho trước giá trị các thông số công nghệ như chiều sâu cắt ($x_1$), tốc độ chạy dao ($x_2$), vận tốc cắt ($x_3$) và bước dao ngang ($x_4$), dự đoán giá trị độ nhám bề mặt ($y_1$)). Tuy nhiên, vấn đề này cũng khá đơn giản vì khi đã xây dựng được phương trình hồi quy với độ chính xác đủ tin cậy thì không nhất thiết phải sử dụng mạng nơ ron mà có thể thay thế trực tiếp

các giá trị cho trước $x_1, x_2, x_3, x_4$ vào phương trình hồi quy để tìm giá trị hàm mục tiêu.

### *4.4.2. Bài toán ngược*

Đặt ngược lại vấn đề, giả sử yêu cầu công nghệ cần độ nhám bề mặt đạt giá trị nào đó (cho trước giá trị yêu cầu $y_1$), vậy chế độ công nghệ nên chọn như thế nào? Tức là giá trị $x_1, x_2, x_3, x_4$ phải là bao nhiêu để đáp ứng yêu cầu độ nhám đó? Đây là bài toán có ứng dụng thực tiễn gia công cao và phù hợp với thực tế. Ngay cả khi đã có phương trình hồi quy cũng chưa thể dễ dàng tìm được các giá trị này. Thử thách để giải được bài toán này là rất lớn, đặc biệt khi yêu cầu chất lượng sản phẩm không chỉ là độ nhám ($y_1$), mà còn sai số kích thước ($y_2$), năng lượng tiêu thụ ($y_3$), lực cắt ($y_4$), rung động ($y_5$), …nghĩa là đa hàm mục tiêu ($y_i; i = 1..n$) và đa biến ($x_j; j = 1..n$). Trường hợp này, dùng mạng trí tuệ nhân tạo phương án khả thi nhất để giải quyết. Luận án này chỉ tập trung giải quyết bài toán ngược cho 1 hàm mục tiêu về sai số kích thước bởi nó bao gồm không chỉ giới hạn về giá trị các biến mà còn giới hạn về cả giá trị hàm mục tiêu (nghĩa là kích thước phải nằm trong dung sai kích thước cho phép).

Theo đó, đầu vào là giá trị sai số kích thước yêu cầu, đầu ra là bộ thông số công nghệ ($x_1, x_2, x_3$) dự đoán. Độ tin cậy của kết quả dự đoán dựa trên độ tin cậy của phương trình hồi quy. Độ tin cậy của phương trình hồi quy sai số kích thước được xây dựng ở Chương 3 là 95% thì độ chính xác dự đoán của mạng trí tuệ nhân tạo cũng phải đạt trên 95%. Các bước thực hiện như sau:

**Bước 1**. Lập bộ dữ liệu từ hệ phương trình hồi quy để huấn luyện mạng nơ ron.

**Bước 2**. Xây dựng cấu trúc mạng và huấn luyện mạng nơ tron

**Bước 3**. Đánh giá độ tin cậy của mạng nơ tron

**Bước 4**. Kiểm tra với một số ví dụ.

### 4.4.3. *Lập bộ dữ liệu để huấn luyện mạng trí tuệ nhân tạo*

Bộ dữ liệu được dùng để huấn luyện mạng có thể được dùng theo 2 phương án. Phương án 1 là bộ giá trị ($x_1, x_2, x_3$) được sử dụng cho thực nghiệm và giá trị sai số được đo được trực tiếp qua các thực nghiệm tương ứng. Phương án 2 là bộ giá trị ($x_1, x_2, x_3$) cho ngẫu nhiên trong khoảng cho phép và giá trị sai số tìm được khi thay bộ giá trị biến ngẫu nhiên vào phương trình hồi quy. Cần chú ý rằng, bộ dữ liệu huấn luyện mạng càng lớn thì độ chính xác càng cao và ngược lại. Phương án 1 khó có thể thực hiện quá nhiều thí nghiệm để lấy dữ liệu bởi chi phí thời gian và kinh tế rất lớn. Phương án 2 có thể sử dụng một số lượng nhỏ thực nghiệm để xây dựng PTHQ. Khi đã có PTHQ thì bộ dữ liệu huấn luyện được tạo ra từ bộ $x_1, x_2, x_3$ ngẫu nhiên là rất lớn, đảm bảo mạng nơ ron cho độ chính xác cao. Luận án này sử dụng phương án 2.

### 4.4.4. *Xây dựng cấu trúc mạng và huấn luyện mạng nơ ron*

Để huấn luyện mạng nơ ron nhằm tìm ra mối quan hệ tiềm ẩn giữa các thông số công nghệ và giá trị hàm mục tiêu yêu cầu ($y_d$) trong PTHQ thì mạng tổng thể được xây dựng theo 03 mạng nhỏ ứng với ba giá trị biến $x_1, x_2, x_3$. Cụ thể như bảng 4.8.

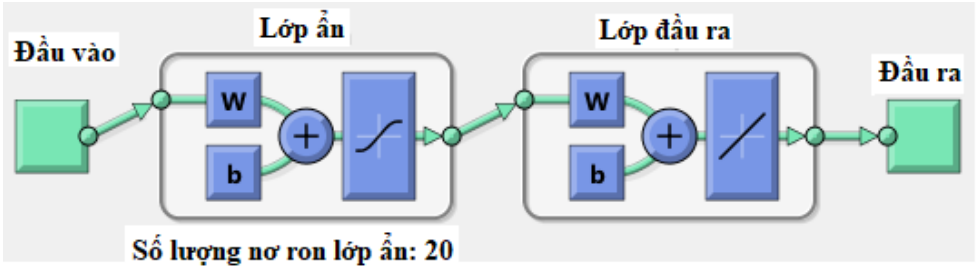
*Bảng 4. 8. Thông số các mạng nơ ron và điều kiện biên*

| TT | Thông số chung | Mạng số 1 | Mạng số 2 | Mạng số 3 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Loại hình mạng | Lan truyền tiến (feedforward) | | |
| 2 | Số đầu vào | 01 ($y_d$) | 02 ($y_d$ và $x_1$) | 03 ($y_d$, $x_1$, $x_2$) |
| 3 | Số đầu ra | 01 ($x_1$) | 01 ($x_2$) | 01 ($x_3$) |
| 4 | Số lớp ẩn (hidden layers) | 01 | 01 | 01 |

*Bảng 4.8. Thông số các mạng nơ ron và điều kiện biên (tiếp)*

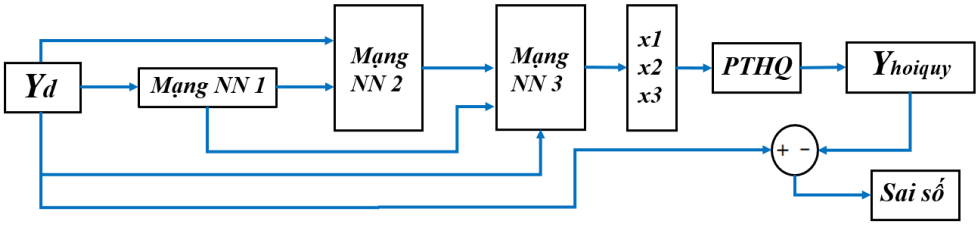
| TT | Thông số chung | Mạng số 1 | Mạng số 2 | Mạng số 3 |
|---|---|---|---|---|
| 5 | Số lượng nơ ron trong lớp ẩn | 20 | 20 | 20 |
| 6 | Hàm kích hoạt (active function) | *trainlm* | *trainlm* | *Trainlm* |
| 7 | Điều kiện sai số cho phép của hàm mục tiêu: $-0.02 \le y_{saiso} \le 0.02(mm)$ | | | |
| 8 | Điều kiện các biến công nghệ cần tìm ở đầu ra $-1.215 \le x_1, x_2, x_3 \le 1.215$ | | | |

Mô hình mạng được mô tả như hình 4.18. Sơ đồ mạng tổng thể được mô tả như hình 4.19.




*Hình 4. 18. Mô hình mạng nơ ron*

Các mạng NN1, NN2 và NN3 đều sử dụng cấu trúc mạng lan truyền tiến nên không có giá trị của mạng ở phía sau bị suy luận ngược lại. Nghĩa là giá trị đã tìm được ở mạng trước đó sẽ không đổi thay đổi và sẽ là đầu vào cho mạng tiếp theo mà không bị truy hồi ngược.




*Hình 4. 19. Mô hình mạng tổng thể*

### 4.4.5. *Đánh giá độ tin cậy của mạng nơ ron*

Để dễ hình dung, bản chất của mạng nơ ron là đi tìm hàm lỗi trong quá trình học dữ liệu đầu vào và tìm cách tối ưu hàm lỗi đó. Lúc này, mạng nơ ron được coi là đã được huấn luyện theo đúng yêu cầu.

Sai số cho từng giá trị hàm mục tiêu đơn lẻ nhỏ hơn 5% và được xác định như sau:

$$Lsaiso = \frac{\left|y_d - y_{hoiquy}\right|}{\left|y_d\right|}100\% \tag{4.18}$$

Trong đó:

$y_d$ : là giá trị hàm mục tiêu yêu cầu được cho trước.

$y_{hoiquy}$ : là giá trị thu được từ việc thay $x_1, x_2, x_3$ (tìm được nhờ mạng nơ ron) thay ngược trở vào PTHQ.

Sai số tổng thể cho toàn bộ các giá trị hàm mục tiêu (trong trường hợp yêu cầu $k$ giá trị hàm mục tiêu khác nhau) nhỏ hơn 5%. Lúc này, sai số tổng được xác định:

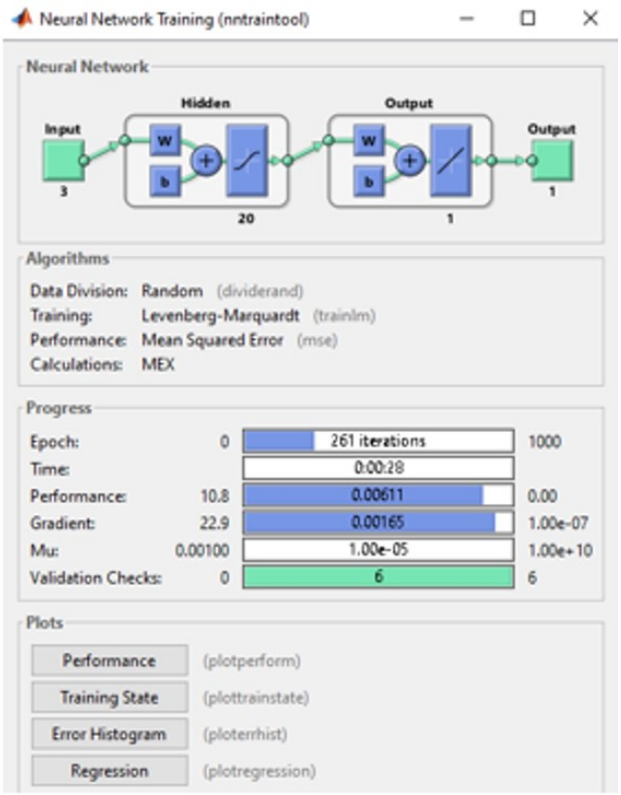
$$Tsaiso = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\frac{\left|y_{d_i} - y_{hoiquy_i}\right|}{\left|y_{d_i}\right|}100\% \tag{4.19}$$

### 4.4.6. Dự đoán thông số công nghệ cho các hàm mục tiêu

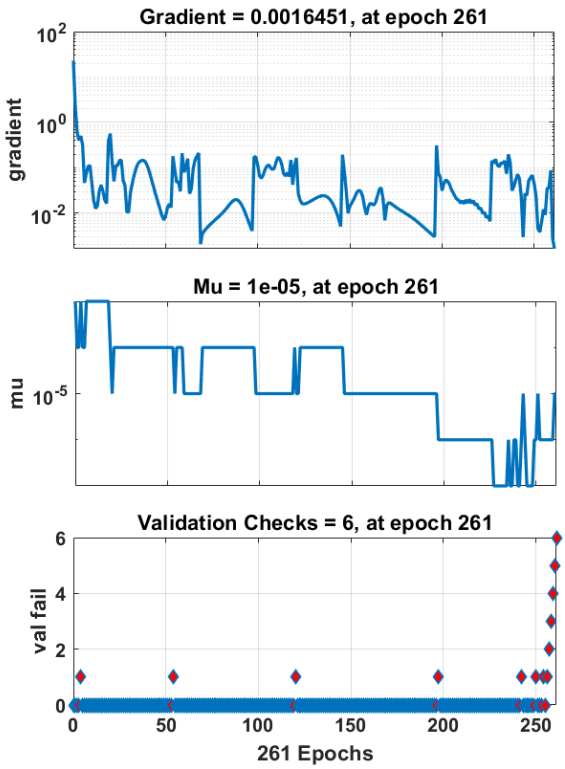
Xây dựng mạng nơ ron tổng trong phần mềm MATLAB (chương trình lập trình được trình bày trong phần Phụ lục). Ta có kết quả như sau:

Mạng nơ ron đạt được kết quả huấn luyện như mong muốn ở lần huấn luyện thứ 261 cho mạng số 3 (hình 4.20, 4.21).

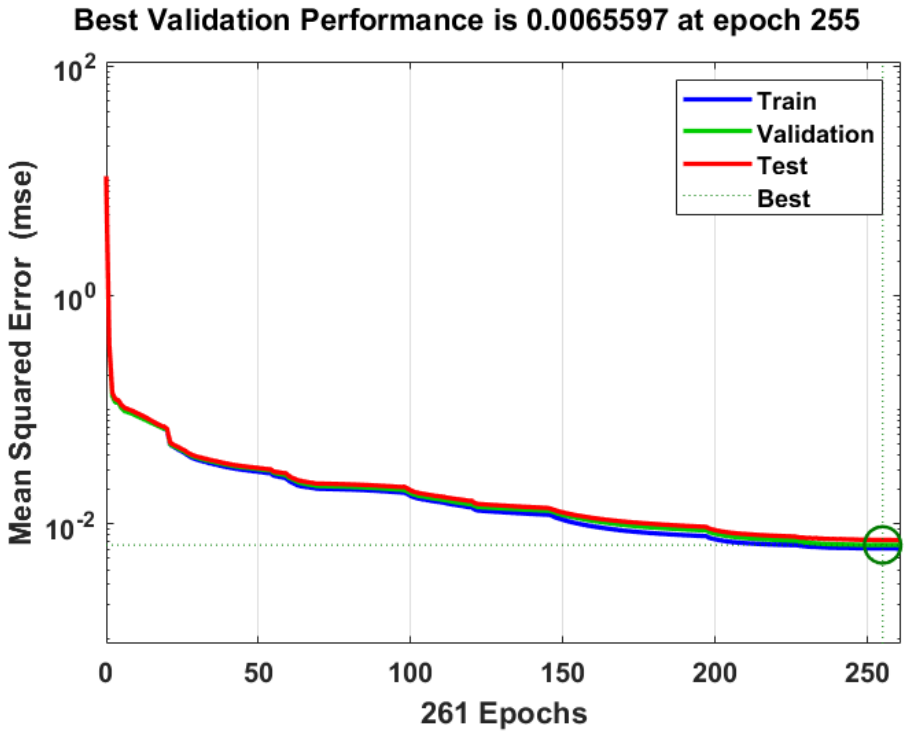
Sai số huấn luyện mạng được xác định bằng việc sử dụng công cụ đánh giá lỗi bình phương trung bình (Mean Squared Error – MSE) với hiệu suất đánh giá lỗi trung bình được mô tả trên hình 4.22, 4.23.



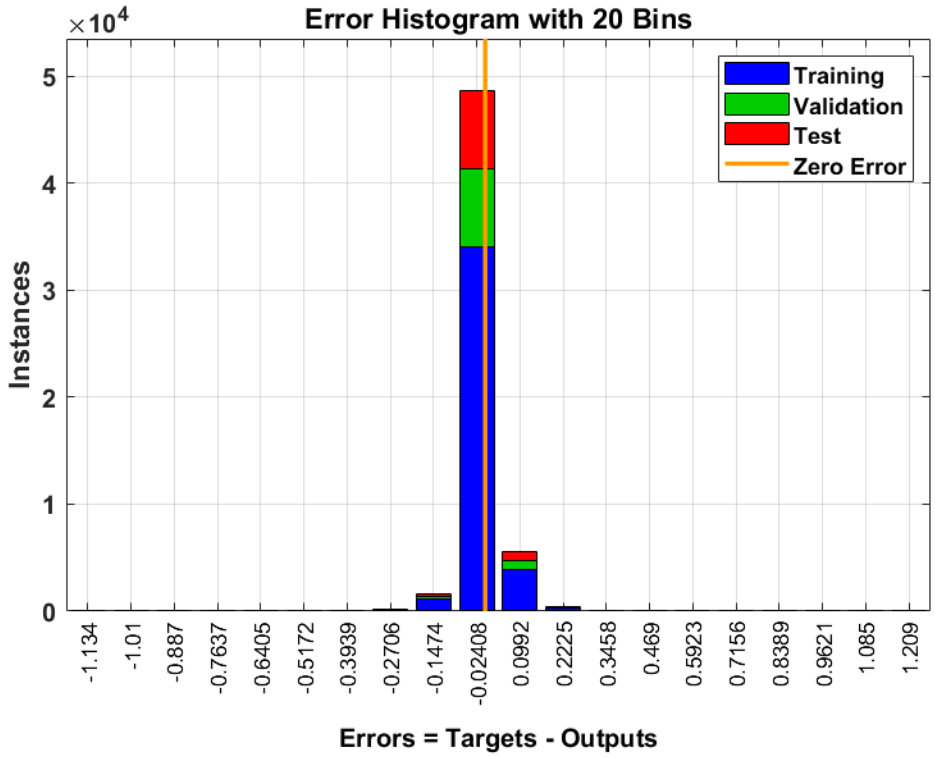

*Hình 4. 20. Kết quả huấn luyện mạng nơ ron*




*Hình 4. 21. Kết quả huấn luyện mạng nơ ron (b)*

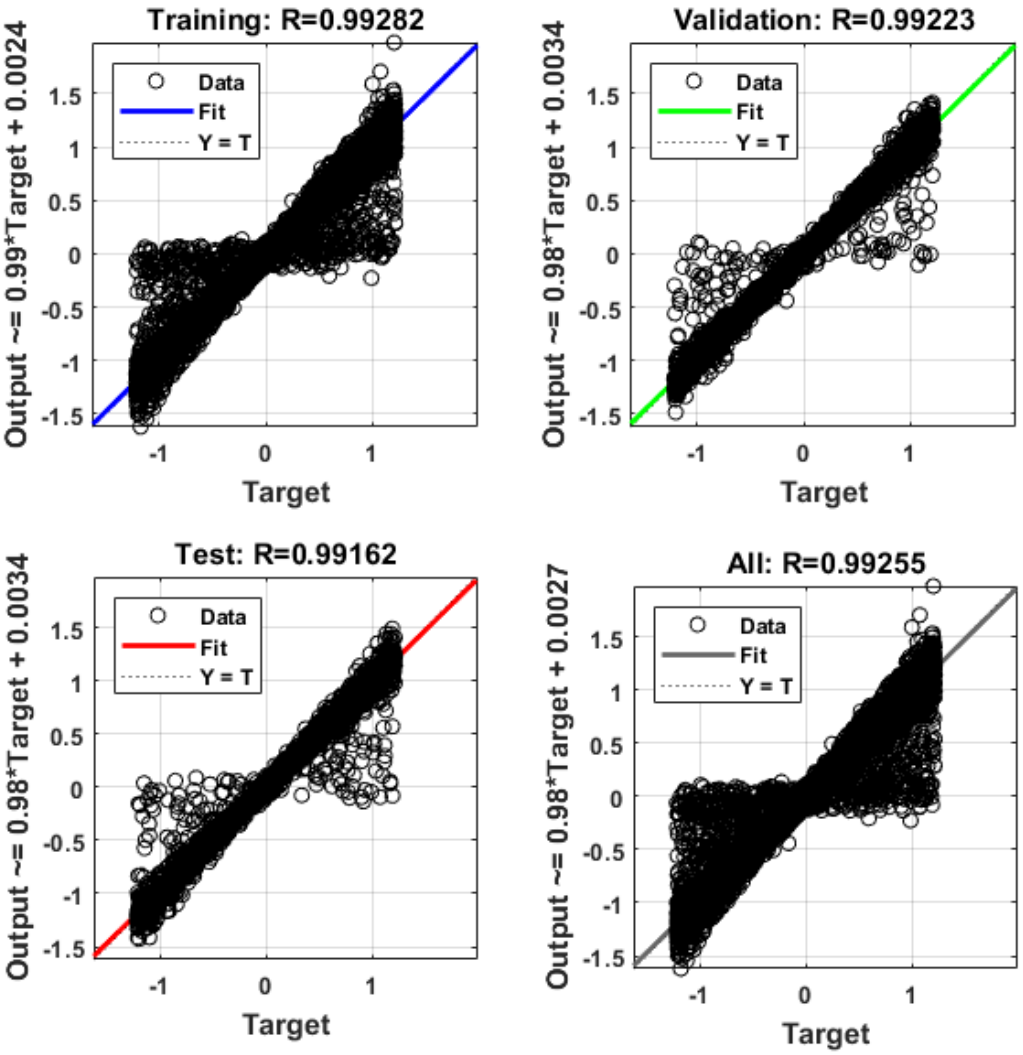



*Hình 4. 22. Kết quả đánh giá sai số bình phương cực tiểu*




*Hình 4. 23. Tỉ lệ phân chia dữ liệu và sai số trong huấn luyện mạng*

Theo đó, giá trị lỗi nhỏ nhất trong quá trình huấn luyện và hiệu chỉnh của mạng nơ ron là 0.00656 (hình 4.21a). Phân bố dữ liệu huấn luyện, hiệu chỉnh, kiểm tra và lỗi của quá trình được mô tả trên hình 4.21b.

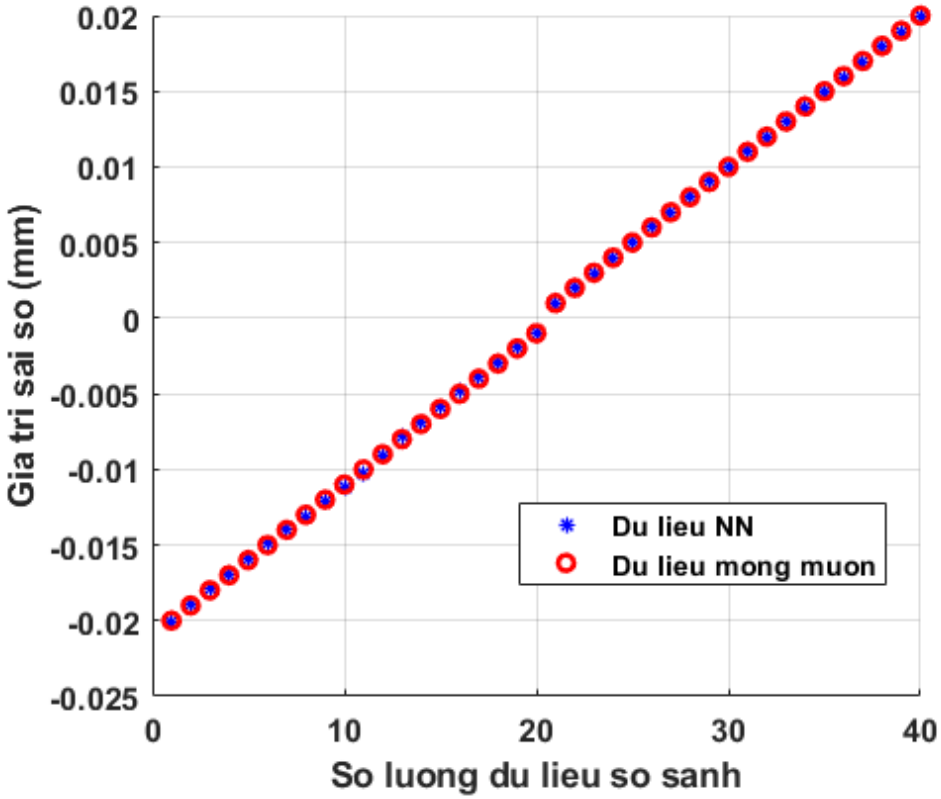



*Hình 4. 24. Phân bố dữ liệu giữa đầu ra của mạng và dữ liệu đích*

Hình 4.24 mô tả phân bố các giá trị đặt (giá trị đích) và giá trị dự đoán của mạng trong quá trình huấn luyện, hiệu chỉnh và kiểm tra. Kết quả dự đoán cho độ chính xác tổng thể lên tới hơn 99%.

Dựa trên mạng nơ ron đã được huấn luyện, áp dụng cho một dãy các giá trị hàm mục tiêu mong muốn, ta có thể tìm được bộ thông số công nghệ dự đoán tương ứng. Hình 4.25 so sánh các giá trị hàm mục tiêu mong muốn và giá

trị tính được từ kết quả đầu ra của mạng nơ ron. Bảng 4.9 mô tả rõ các thông số đã nêu cũng như sai lệch dự đoán cho từng giá trị và sai lệch tổng cho tất cả các giá trị dự đoán. Dù là giá trị đơn lẻ hay giá trị sai số tổng (1.206%), kết quả luôn đảm bảo nhỏ hơn sai số cho phép 5%. Điều này nói lên tính tin cậy của mạng nơ ron được xây dựng và huấn luyện. Bảng 4.10 thể hiện các giá trị thông số công nghệ dự đoán tương ứng với các yêu cầu đầu vào về sai số kích thước của hàm mục tiêu.




*Hình 4. 25. So sánh dữ liệu hàm mục tiêu từ mạng nơ ron và dữ liệu đích*

*Bảng 4. 9. Bảng giá trị hàm mục tiêu giữa giá trị đặt (dữ liệu đích) và giá trị dự đoán từ mạng nơ ron*

| TT | Giá trị đặt | Giá trị dự đoán | Sai lệch (%) | x1 | x2 | x3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.02 | -0.02009 | 0.428278 | -0.75565 | -0.39441 | 0.710787 |
| 2 | -0.019 | -0.01893 | 0.365873 | -0.71309 | -0.46785 | 0.994918 |
| 3 | -0.018 | -0.01792 | 0.453919 | -0.69878 | -0.46783 | 0.982877 |

*Bảng 4.9. Bảng giá trị hàm mục tiêu giữa giá trị đặt (dữ liệu đích) và giá trị dự đoán từ mạng nơ ron (tiếp)*

| TT | Giá trị đặt | Giá trị dự đoán | Sai lệch (%) | x1 | x2 | x3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 4 | -0.017 | -0.01691 | 0.524583 | -0.69142 | -0.46858 | 0.883015 |
| 5 | -0.016 | -0.01593 | 0.469157 | -0.68517 | -0.46318 | 0.773442 |
| 6 | -0.015 | -0.01485 | 1.026225 | -0.66807 | -0.48867 | 0.777647 |
| 7 | -0.014 | -0.0139 | 0.745157 | -0.61086 | -0.45976 | 1.282064 |
| 8 | -0.013 | -0.01321 | 1.585602 | -0.54871 | -0.12575 | 1.280588 |
| 9 | -0.012 | -0.01207 | 0.573605 | -0.52636 | -0.05722 | 1.226744 |
| 10 | -0.011 | -0.01114 | 1.265802 | -0.51493 | -0.0879 | 1.221293 |
| 11 | -0.01 | -0.01022 | 2.175991 | -0.50478 | -0.12991 | 1.22061 |
| 12 | -0.009 | -0.00907 | 0.800146 | -0.48195 | -0.0497 | 1.156167 |
| 13 | -0.008 | -0.00775 | 3.251218 | -0.43092 | 0.297029 | 1.026929 |
| 14 | -0.007 | -0.00688 | 1.798159 | -0.39755 | 0.445155 | 0.988039 |
| 15 | -0.006 | -0.00585 | 2.609097 | -0.38726 | 0.408151 | 0.968807 |
| 16 | -0.005 | -0.00484 | 3.207499 | -0.37419 | 0.389305 | 0.948601 |
| 17 | -0.004 | -0.0039 | 2.510766 | -0.34944 | 0.448023 | 0.922523 |
| 18 | -0.003 | -0.0029 | 3.379628 | -0.33376 | 0.440157 | 0.901998 |
| 19 | -0.002 | -0.0019 | 5.490793 | -0.31944 | 0.42103 | 0.882631 |
| 20 | -0.001 | -0.00093 | 7.267068 | -0.2932 | 0.463935 | 0.861254 |
| 21 | 0.001 | 0.001006 | 0.637368 | -0.23327 | 0.530337 | 0.830197 |
| 22 | 0.002 | 0.001972 | 1.424731 | -0.19158 | 0.566846 | 0.824533 |
| 23 | 0.003 | 0.00299 | 0.330728 | -0.17497 | 0.548405 | 0.80482 |
| 24 | 0.004 | 0.00401 | 0.261628 | -0.16283 | 0.522226 | 0.782111 |
| 25 | 0.005 | 0.005023 | 0.459602 | -0.14891 | 0.499793 | 0.759887 |
| 26 | 0.006 | 0.006035 | 0.574157 | -0.13978 | 0.465947 | 0.735733 |
| 27 | 0.007 | 0.007033 | 0.471844 | -0.11927 | 0.458143 | 0.715428 |
| 28 | 0.008 | 0.008025 | 0.309463 | -0.08312 | 0.480286 | 0.700739 |
| 29 | 0.009 | 0.009024 | 0.270573 | -0.06535 | 0.462848 | 0.67939 |
| 30 | 0.01 | 0.01002 | 0.197417 | -0.06039 | 0.419349 | 0.653865 |
| 31 | 0.011 | 0.011004 | 0.035655 | -0.05507 | 0.371364 | 0.63012 |
| 32 | 0.012 | 0.011982 | 0.153454 | -0.04698 | 0.325355 | 0.608355 |
| 33 | 0.013 | 0.012967 | 0.251043 | -0.02716 | 0.309933 | 0.587603 |
| 34 | 0.014 | 0.01397 | 0.215328 | 0.012741 | 0.342593 | 0.568365 |
| 35 | 0.015 | 0.014958 | 0.277903 | 0.035372 | 0.332568 | 0.545942 |

*Bảng 4.9. Bảng giá trị hàm mục tiêu giữa giá trị đặt (dữ liệu đích) và giá trị dự đoán từ mạng nơ ron (tiếp)*

| TT | Giá trị đặt | Giá trị dự đoán | Sai lệch (%) | x1 | x2 | x3 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 36 | 0.016 | 0.015935 | 0.407703 | 0.041811 | 0.287734 | 0.520301 |
| 37 | 0.017 | 0.016918 | 0.487133 | 0.050934 | 0.245484 | 0.49518 |
| 38 | 0.018 | 0.01791 | 0.500117 | 0.075897 | 0.244205 | 0.469114 |
| 39 | 0.019 | 0.018903 | 0.511612 | 0.099557 | 0.23876 | 0.442017 |
| 40 | 0.02 | 0.019896 | 0.52022 | 0.116933 | 0.21735 | 0.413887 |
| **Giá trị sai số tổng** | | | **1.205656** | | | |

*Bảng 4. 10. Giá trị các thông số công nghệ dự đoán tương ứng*

| TT | x1 | t (mm) | x2 | F (mm/ph) | x3 | Vc (m/ph) | n (vg/ph) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -0.75565 | 3.7 | -0.39441 | 660.6 | 0.710787 | 134.9 | 5368.6 |
| 2 | -0.71309 | 3.9 | -0.46785 | 653.2 | 0.994918 | 140.6 | 5595.9 |
| 3 | -0.69878 | 3.9 | -0.46783 | 653.2 | 0.982877 | 140.3 | 5586.3 |
| 4 | -0.69142 | 3.9 | -0.46858 | 653.1 | 0.883015 | 138.3 | 5506.4 |
| 5 | -0.68517 | 3.9 | -0.46318 | 653.7 | 0.773442 | 136.1 | 5418.8 |
| 6 | -0.66807 | 4.0 | -0.48867 | 651.1 | 0.777647 | 136.2 | 5422.1 |
| 7 | -0.61086 | 4.2 | -0.45976 | 654.0 | 1.282064 | 146.3 | 5825.7 |
| 8 | -0.54871 | 4.4 | -0.12575 | 687.4 | 1.280588 | 146.3 | 5824.5 |
| 9 | -0.52636 | 4.4 | -0.05722 | 694.3 | 1.226744 | 145.2 | 5781.4 |
| 10 | -0.51493 | 4.5 | -0.0879 | 691.2 | 1.221293 | 145.1 | 5777.0 |
| 11 | -0.50478 | 4.5 | -0.12991 | 687.0 | 1.22061 | 145.1 | 5776.5 |
| 12 | -0.48195 | 4.6 | -0.0497 | 695.0 | 1.156167 | 143.8 | 5724.9 |
| 13 | -0.43092 | 4.7 | 0.297029 | 729.7 | 1.026929 | 141.2 | 5621.5 |
| 14 | -0.39755 | 4.8 | 0.445155 | 744.5 | 0.988039 | 140.4 | 5590.4 |
| 15 | -0.38726 | 4.8 | 0.408151 | 740.8 | 0.968807 | 140.0 | 5575.0 |
| 16 | -0.37419 | 4.9 | 0.389305 | 738.9 | 0.948601 | 139.6 | 5558.9 |
| 17 | -0.34944 | 5.0 | 0.448023 | 744.8 | 0.922523 | 139.1 | 5538.0 |
| 18 | -0.33376 | 5.0 | 0.440157 | 744.0 | 0.901998 | 138.7 | 5521.6 |
| 19 | -0.31944 | 5.0 | 0.42103 | 742.1 | 0.882631 | 138.3 | 5506.1 |
| 20 | -0.2932 | 5.1 | 0.463935 | 746.4 | 0.861254 | 137.9 | 5489.0 |
| 21 | -0.23327 | 5.3 | 0.530337 | 753.0 | 0.830197 | 137.3 | 5464.2 |
| 22 | -0.19158 | 5.4 | 0.566846 | 756.7 | 0.824533 | 137.1 | 5459.6 |
| 23 | -0.17497 | 5.5 | 0.548405 | 754.8 | 0.80482 | 136.7 | 5443.9 |

*Bảng 4.10. Giá trị các thông số công nghệ dự đoán tương ứng (tiếp)*

| TT | x1 | t (mm) | x2 | F (mm/ph) | x3 | Vc (m/ph) | n (vg/ph) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 24 | -0.16283 | 5.5 | 0.522226 | 752.2 | 0.782111 | 136.3 | 5425.7 |
| 25 | -0.14891 | 5.6 | 0.499793 | 750.0 | 0.759887 | 135.8 | 5407.9 |
| 26 | -0.13978 | 5.6 | 0.465947 | 746.6 | 0.735733 | 135.4 | 5388.6 |
| 27 | -0.11927 | 5.6 | 0.458143 | 745.8 | 0.715428 | 135.0 | 5372.3 |
| 28 | -0.08312 | 5.8 | 0.480286 | 748.0 | 0.700739 | 134.7 | 5360.6 |
| 29 | -0.06535 | 5.8 | 0.462848 | 746.3 | 0.67939 | 134.2 | 5343.5 |
| 30 | -0.06039 | 5.8 | 0.419349 | 741.9 | 0.653865 | 133.7 | 5323.1 |
| 31 | -0.05507 | 5.8 | 0.371364 | 737.1 | 0.63012 | 133.2 | 5304.1 |
| 32 | -0.04698 | 5.9 | 0.325355 | 732.5 | 0.608355 | 132.8 | 5286.7 |
| 33 | -0.02716 | 5.9 | 0.309933 | 731.0 | 0.587603 | 132.4 | 5270.1 |
| 34 | 0.012741 | 6.0 | 0.342593 | 734.3 | 0.568365 | 132.0 | 5254.7 |
| 35 | 0.035372 | 6.1 | 0.332568 | 733.3 | 0.545942 | 131.5 | 5236.8 |
| 36 | 0.041811 | 6.1 | 0.287734 | 728.8 | 0.520301 | 131.0 | 5216.2 |
| 37 | 0.050934 | 6.2 | 0.245484 | 724.5 | 0.49518 | 130.5 | 5196.1 |
| 38 | 0.075897 | 6.2 | 0.244205 | 724.4 | 0.469114 | 130.0 | 5175.3 |
| 39 | 0.099557 | 6.3 | 0.23876 | 723.9 | 0.442017 | 129.5 | 5153.6 |
| 40 | 0.116933 | 6.4 | 0.21735 | 721.7 | 0.413887 | 128.9 | 5131.1 |

## Kết luận chương 4

Một số kết quả nghiên cứu tối ưu đơn mục tiêu và đa mục tiêu cho năng lượng tiêu thụ, sai số kích thước và độ nhám bề mặt trên cơ sở các phương trình hồi quy và các thuật toán tối ưu như PSO và GA đã được thể hiện đầy đủ trong nội dung chương này. Kết quả tối ưu đơn và đa mục tiêu cho phép xác định giá trị tối ưu cùng với bộ thông số công nghệ tương ứng.

+ Đối với năng lượng tiêu thụ khi phay thô cao tốc, trong phạm vi chế độ cắt thực nghiệm thì chiều sâu cắt có ảnh hưởng rất lớn đến thời gian gia công nói riêng và năng lượng tiêu thụ nói chung. Khi phay thô từ phôi đặc, chiều sâu cắt càng nhỏ thì thời gian gia công càng lớn, năng lượng tiêu thụ càng cao mặc dù công suất gia công không lớn hơn so với khi gia công với chiều sâu cắt lớn.

+ Độ nhám bề mặt khi phay tinh cao tốc hốc tròn bị ảnh hưởng nhiều nhất bởi tốc độ cắt và tốc độ chạy dao. Ở cùng mức chiều sâu cắt, tốc độ cắt càng lớn và tốc độ chạy dao thấp thì chất lượng bề mặt càng cao.

+ Đối với sai số kích thước khi phay tinh cao tốc, tốc độ trục chính hay tốc độ cắt ảnh hưởng không nhiều đến sai số. Chiều sâu cắt có ảnh hưởng lớn đến sai số, sau đó đến tốc độ chạy dao. Do đặc thù của độ chính xác kích thước với miền dung sai cụ thể, giá trị sai số tiến về 0 thì sản phẩm đạt chất lượng tốt nhất nên hàm mục tiêu sai số kích thước chỉ cho phép đánh giá ảnh hưởng của các cặp thông số cắt, vấn đề tìm giá trị tối ưu chưa được giải quyết thỏa đáng. Đây chính là lý do cần xây dựng mô hình mạng trí tuệ nhân tạo để tìm ra phương án xác định bộ thông số cắt phù hợp với từng miền dung sai.

+ Mạng trí tuệ nhân tạo được đề xuất sử dụng nhằm dự đoán các bộ giá trị thông số công nghệ tương ứng với đầu vào là giá trị bất kỳ sai số kích thước trong khoảng cho phép. Mô hình mạng được xây dựng với độ chính xác huấn luyện cao hơn 95%.

# KẾT LUẬN CHUNG

Thách thức của ngành gia công sản xuất hiện đại luôn là nâng cao chất lượng sản phẩm, tăng năng suất và giảm chi phí chế tạo. Trong bối cảnh khoa học phát triển mạnh mẽ như ngày nay, gia công cao tốc là một trong những công nghệ sản xuất hàng đầu được lựa chọn để phát triển trong nền sản xuất hiện nay. Trong gia công cao tốc, nhiều yếu tố được xem xét trong quá trình gia công như lực cắt, nhiệt cắt, rung động, mòn dụng cụ, nhám bề mặt, biến dạng, hình thái phoi, độ chính xác kích thước, năng lượng tiêu thụ. Trong số đó, chất lượng bề mặt, độ chính xác kích thước và năng lượng tiêu thụ luôn là một trong các tiêu chí hàng đầu để đánh giá chất lượng và giá thành sản phẩm. Gia công cao tốc vật liệu cứng nói chung và gia công phay thép hợp kim cứng nói riêng có những lợi ích nhất định, đặc biệt lợi ích về khía cạnh kinh tế. Tuy nhiên, loại hình gia công này cũng tiềm ẩn nhiều thách thức cần giải quyết.

Luận án đã tập trung giải quyết được những vấn đề chính như sau:

**Một là**, đánh giá được tổng quan tình hình nghiên cứu về gia công cao tốc vật liệu có độ cứng cao với các yếu tố ảnh hưởng như lực cắt, nhiệt cắt, rung động, độ nhám, năng lượng tiêu thụ, …Từ đó đưa ra đánh giá và đề xuất giải quyết những vấn đề chưa được quan tâm cụ thể.

**Hai là**, nghiên cứu tổng quan các mô hình tính toán năng lượng trong quá trình gia công cao tốc hợp kim cứng trên máy CNC, để từ đó chọn lọc phương pháp tiếp cận nghiên cứu phù hợp.

**Ba là**, xây dựng mô hình thực nghiệm gia công thô và gia công tinh cao tốc thép hợp kim SKD11 sau nhiệt luyện đạt độ cứng 55HRC, xây dựng được các mô hình toán học mô tả mối quan hệ giữa các thông số công nghệ với các yếu tố năng lượng tiêu thụ, độ chính xác kích thước và độ nhám bề mặt thông qua Phương pháp thực nghiệm quy hoạch trực giao cấp 2 và kiểm tra bằng mô đun ANOVA trên phần mềm DESIGN EXPERT 12.

**Bốn là**, ứng dụng các thuật toán tối ưu như thuật toán GA, thuật toán PSO, phương pháp tìm nghiệm Pareto để giải quyết các bài toán đơn mục tiêu và đa mục tiêu. Từ đó tìm được các bộ thông số công nghệ tối ưu đáp ứng yêu cầu đầu ra của bài toán. Đánh giá được ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới các yếu tố.

**Năm là**, đề xuất mô hình dự đoán các bộ thông số công nghệ dựa trên phương trình hồi quy và thuật toán trí tuệ nhân tạo phục vụ cho các yêu cầu độ chính xác kích thước cụ thể với sai số từng giá trị và sai số tổng thể đều nhỏ hơn 5%.

# CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ

[1] Dương Xuân Biên, **Đào Văn Dưỡng**, Nguyễn Văn Công, Đinh Đức Mạnh, Nguyễn Văn Đức (2015), "Nghiên cứu ảnh hưởng của chiến lược chạy dao tới chất lượng gia công các dạng thành mỏng khi phay cao tốc hợp kim nhôm Al6061", Tạp chí Cơ khí Việt Nam, pp. 26-33.

[2] **Đào Văn Dưỡng**, Lại Anh Tuấn, Đỗ Tiến Lập, Dương Xuân Biên (2020), "Nghiên cứu tổng quan về tính toán năng lượng tiêu thụ trên các máy gia công CNC", Tạp chí Khoa học và Công nghệ, Đại học Bách khoa Đà Nẵng, vol 18 (8), pp. 18-24.

[3] **Dao Van Duong**, Lai Anh Tuan, Do Tien Lap, Pham Van Tuan, Le Cong Doan, Ngo Tan Loc (2021), "Optimization of high-speed cutting parameters oriented improves the dimensional accuracy of alloy steel SKD11", International Journal of Engineering Research and Technology, vol 10 (6), pp. 522-527.

[4] **Dao Van Duong**, Lai Anh Tuan, Do Tien Lap, Pham Van Tuan, Le Cong Doan, Ngo Tan Loc (2021), "Optimization of cutting parameters in high-speed milling of hardened alloy steels SKD11 after heat treatment to minimize energy consumption based on PSO algorithm", International Journal of Engineering Innovations and Research, vol 10 (4), pp. 186-194.

[5] **Dao Van Duong,** Lai Anh Tuan, Do Tien Lap, Nguyen Tai Hoai Thanh, Pham Van Tuan, Le Cong Doan, Ngo Tan Loc (2021), "Optimization of cutting parameters in high-speed milling of hardened alloy steels SKD11 to improve the surface roughness", Tạp chí Cơ khí Việt Nam, pp. 99 – 103.

[6] **Dao Van Duong,** Duong Xuan Bien, Do Tien Lap, Le Cong Doan, Ngo Tan Loc, Duong Van Nguy (2021), "Multi objective optimization of dimension accuracy and surface roughness in high-speed finishing milling

for the hard steel alloy after heat-treatment", IFToMM Asian Mechanisms and Machine Science Conference (ASIAN MMS 2021), pp. 899-910.

# TÀI LIỆU THAM KHẢO

## Tiếng Việt

[1] Trần Văn Địch (2004), *Công nghệ CNC*, NXB Khoa học và kỹ thuật Hà Nội.

[2] Nguyễn Trọng Bình (2003), *Tối ưu hóa quá trình gia công cắt gọt*, NXB Giáo dục.

[3] Trần Văn Địch, Nguyễn Trọng Bình, Nguyễn Thế Đạt, Nguyễn Viết Tiếp, Trần Xuân Việt (2006), *Công nghệ chế tạo máy*, NXB Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội.

[4] Nguyễn Doãn Ý (2007), *Quy hoạch thực nghiệm*. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.

[5] Nguyễn Doãn Ý (2009), *Xử lý số liệu thực nghiệm trong kỹ thuật*. NXB KH&KT, Hà Nội.

[6] Nguyễn Ngọc Kiên (2014), *Ứng dụng phương pháp trí tuệ nhân tạo và phân tích Taguchi để xác định chế độ cắt tối ưu khi gia công trên máy phay CNC*, Luận án tiến sỹ, Đại học Bách khoa Hà Nội.

[7] Hoàng Tiến Dũng (2015), *Nghiên cứu tối ưu hóa một số thông số công nghệ khi phay cao tốc*, Luận án tiến sỹ, Đại học Bách khoa Hà Nội.

[8] Nguyễn Thanh Bình (2016), *Nghiên cứu ảnh hưởng của chế độ cắt đến một số thông số đặc trưng khi phay cao tốc bề mặt khuôn*, Luận án tiến sỹ, Đại học Bách khoa Hà Nội.

[9] Phạm Thị Hoa (2017), *Nghiên cứu quá trình tạo phoi khi phay cao tốc hợp kim nhôm Al6061*, Luận án tiến sỹ, Đại học Bách khoa Hà Nội.

[10] Trần Quang Khánh (2007), *Giáo trình cơ sở MatLab tập 1*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật.

**Tiếng Anh**

[11] J. Peklenik, J. R. Gartner, "Workpiece accuracy criterion for the dynamic machine tool acceptance test", *International Journal of Machine Tool Research*, 7, 1967, pp. 303 – 324.

[12] A. S. Shouckry, "The effect of cutting conditions on dimensional accuracy", *Wear*, 80, 1982, pp. 197-205.

[13] R. F. Recht, "A Dynamic Analysis of High-Speed Machining", *Journal of Engineering for Industry*, 1985, Vol. 107, pp. 309-315.

[14] Robert I. King, Handbook of High-speed Machining Technology, 1985.

[15] T. D. Marusich, "Modelling and simulation of high-speed machining", *International journal for Numerical methods in Engineering***,** 38, 1995, pp. 3675-3694**.**

[16] T. Kitagawa, "Temperatureand wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti-6A1-6V-2Sn", *Wear*, 202, 1997, pp. 142-148.

[17] S. Smith, "Current Trends in High-speed machining", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1997, Vol. 119, pp. 664-666.

[18] M. Alauddin, "Cutting forces in the end milling of Inconel 718", *Journal of Materials Processing Technology*, 77, 1998, pp. 153–159.

[19] T. Altan, "High Performance Machining for Diel/Mold Manufacturing - R&D in Progress", *IFIP*, 1999, pp. 293-314.

[20] H. Schulz, "The History of High-Speed Machining", *Revista de Ciência and Tecnologia*, 13, 1999, pp. 9-18.

[21] C.E. Becze, "High-speed five-axis milling of hardened tool steel", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 2000, pp. 869–885.

[22] F. Draganescu, “Models of machine tool efficiency and specific consumed energy”, *Journal of Materials Processing Technology*, 141, 2003, pp. 9–15.

[23] S. W. Kim, “Evaluation of machinability by cutting environments in high-speed milling of difficult-to-cut materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, 111, 2001, pp 256-260.

[24] M. Mitsuishi, “Development of an Intelligent High-Speed Machining Center”, 2001, pp 01-06.

[25] R. Sharma, Latest Trends in Machining, 2001, pp. 01-201.

[26] T. Ueda, “Temperature on Flank Face of Cutting Tool in High-Speed Milling”, 2001, pp. 01-04.

[27] J. Barry, “The Mechanisms of Chip Formation in Machining Hardened Steels”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2002, Vol. 124, pp. 528-535.

[28] N. R. Dhar, “Machining of AISI 4140 steel under cryogenic cooling-tool wear, surface roughness and dimensional deviation”, *Journal of Materials Processing Technology*, 123, 2002, pp. 483-489.

[29] Z. Q. Liu, “Wear patterns and mechanisms of cutting tools in high-speed face milling”, *Journal of Materials Processing Technology*, 129, 2002, pp. 222-226.

[30] Pasko, “High-Speed Machining (HSM) – The Effective Way of Modern Cutting”, *International Workshop CA Systems and Technologies*, 2002, pp. 72-79.

[31] T. Insperger, “Multiple chatter frequencies in milling processes”, *Journal of Sound and Vibration*, 262, 2003, pp. 333–345.

[32] K. A. Risbood, “Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process”, *Journal of Materials Processing Technology*, 132, 2003, pp. 203-214.

[33] X.J. Ren, “Cutting temperatures in hard turning chromium hard facings with PCBN tooling”, *Journal of Materials Processing Technology*, 147, 2004, pp. 38-44.

[34] U. Seker, “The effect of feed rate on the cutting forces when machining with linear motion”, *Journal of Materials Processing Technology*, 146, 2004, pp. 403-407.

[35] E. O. Ezugwu, “Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 2005, pp. 1375-1385.

[36] F. Cus, “Machining and Optimization Of 3d Sculptured Surfaces in Ball end Milling Based on Combined Artificial Intelligence Methods”, 2005, pp. 01-06.

[37] T. Ozel, “Effects of cutting-edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 25, 2005, pp. 262-269.

[38] M. de J. Ramírez, “Surface Roughness Modeling Based on Surface Roughness Feature Concept for High-Speed Machining”, *IMECE2005-82256*.

[39] N. A. Abukhshim, “Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high-speed machining”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46, 2006, pp. 782-800.

[40] M. Rahman, “A review on High-Speed Machining of Titanium Alloys”, *JSME International Journal*, Series C, Vol. 49, No.1, 2006, pp. 11-20.

[41] J. Rech, “A multi-view approach to the tribological characterization of cutting tool coatings for steels in high-speed dry turning”, *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, Vol. 1, No. 1, 2006, pp. 27-44.

[42] T. L. Schmitz, “Part Accuracy in High-Speed Machining: Preliminary Results”, *MSEC2006-2110*.

[43] R.A. Ekanayake, “An Experimental Investigation of High-Speed End Milling”, *ACAM*, 2007, pp. 01-07.

[44] N. R. Dhar, “Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 2007, pp. 754-759.

[45] A. B. Abdullah, “The Effect of Feed Rate and Cutting Speed to Surface Roughness”, *Asian Journal of Scientific Research*, 1, 2008, pp. 12-21.

[46] E. Abele, “High Speed Milling of Titanium Alloys”, *APEM Journal*, 3, 2008, pp. 131-140.

[47] A. Aggarwal, “Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi’s technique-A comparative Analysis”, *Journal of Materials Processing Technology*, 200, 2008, pp. 373-384.

[48] F. M. Aneiro, “Turning hardened steel using coated carbide at high cutting speeds”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 30 (2), 2008, pp. 104-109.

[49] Y. Karpat, “Analytical and Thermal Modeling of High-Speed Machining with Chamfered Tools”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 130 / 011001, 2008, pp. 01-15.

[50] D. I. Lalwani, “Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 206, 2008, pp. 167-179.

[51] F. Mahfoudi, “High-speed turning for hard material with PCBN inserts: tool wear analysis”, *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, Vol. 3, Nos. 1/2, 2008, pp. 62-79.

[52] P. Zeman, “Milling of Ti6Al4V Alloy with Cemented Carbide Tools”, *3rd ICMEN*, 2008, pp. 155-164.

[53] A. Bhattacharya, “Estimating the effect of cutting parameters on surface finish and power consumption during high-speed machining of AISI 1045 steel using Taguchi design and ANOVA”, *Prod. Eng. Res. Devel*, 3, 2009, pp. 31–40.

[54] T. L. Schmitz, “Machining Dynamics”, 2009, Springer, Boston, MA.

[55] C. W. Park, “Energy Consumption Reduction Technology in Manufacturing - A Selective Review of Policies, Standards, and Research**”,** *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 10, No. 5, 2009, pp. 151-173.

[56] R. Evans, Ed Platt, “Aluminum High Speed Machining Metalworking Fluid Performance in Aluminum High Speed Machining”, *Department of Industrial & Manufacturing Engineering*, The Pennsylvania State University, 2009.

[57] S. Seguy, G. Dessenin, L. Arnaud, T. Insperger, “Chatter control by spindle speed variation in high-speed milling”, *ICSAAM 2009*, Tarbes, France.

[58] H. Aouici, M.A. Yallese, B. Fnides, T. Mabrouki, “Machinability investigation in hard turning of AISI H11 hot work steel with CBN tool”, *MECHANIKA*, 86, 2010, pp. 71-77.

[59] N.J.M. van Dijk, E. J. J. Doppenberg, R. P. H. Faassen, N. van de Wouw, J. A. J. Oosterling, “Automatic IN-process Chatter Avoidance in the High-Speed Milling Process”, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 132, 2010, pp. 1-14.

[60] J. S. Senthilkumaar, P. elvarani, R. M. Arunachalam3, “Selection of Machining Parameters Based on The Analysis of Surface Roughness and Flank Wear in Finish Turning and Facing of Inconel 718 Using Taguchi Technique”, *Emirates Journal for Engineering Research*, 15, 2010, pp. 7-14.

[61] H. H. Shahabi, M. M. Ratnam, “Prediction of surface roughness and dimensional deviation of workpiece in turning: a machine vision approach”, *Int J Adv Manuf Technol*, 27, 2010, pp. 213–226.

[62] Z. Zhao, Y. Xiao, Y. Zhu, Bai Liu, “Influence of Cutting Speed on Cutting Force in High-speed Milling”, *Advanced Materials Research*, 139-141, 2010, pp. 835-838.

[63] F. Klocke, K. Arntz, G. F. Cabral, M. Stolorz, M. Busch, “Characterization of Tool Wear in High-Speed Milling of Hardened Powder Metallurgical Steels”, *Advances in Tribology*, 2011, pp. 1-13.

[64] N. Diaz, E. Redelsheimer, D. Dornfeld, “Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use”, *Glocalized Solutions for Sustainability in Manufacturing:*

*Proceedings of the 18th CIRP International 263 Conference on Life Cycle Engineering*, 2011, pp. 263-267.

[65] P. T. Mativenga, M. F. Rajemi, "Calculation of optimum cutting parameters based on minimum engorge footprint", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60, 2011, pp. 149-152.

[66] R. S. Pawade, Suhas S. Joshi, "Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA)", *Int J Adv Manuf Technol*, 56, 2011, pp. 47-62.

[67] R. Schlosser, F. Klocke, D. Lung, "Sustainabilty in Manufacturing – Energy Consumption of Cutting Processes", *Advances in* Sustainable Manufacturing, 2011, pp. 85-89.

[68] G. List, G. Sutter, A. Bouthiche, "Cutting temperature prediction in the high-speed machining by numerical modeling of chip formation and its dependence with crater wear", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 54-55, 2011, pp. 1-9.

[69] Hanafi, A. Khamlichi, F. M. Cabrera, E. Almansa, "Optimazation of cutting for sustainable machining of PEEK-CF30 using TIN tools", *Journal of Cleaner Production*, 33, 2012, pp. 1-9.

[70] A. Balasubramanian, S. Venkatesan, "Optimization of process parameters using response surface methodology for the removal of phenol by emulsion liquid membrane", *Polish Journal of Chemical Technology*, 2012, pp. 46-49.

[71] S. Honghua, L. Peng, F. Yucan, X. Jiuhua, "Tool Life and Surface Integrity in High-speed Milling of Titanium Alloy TA15 with PCD/PCBN Tools", *Chinese Journal of Aeronautics*,25, 2011, pp. 784-790.

[72] Q. Wang, F. Liu, X. Wang, “Multi-objective optimization of machining parameters considering energy consumption”, *Int J Adv Manuf Technol*, 71, 2013, pp. 1133–1142.

[73] J. Yan, L. Li, “Multi-objective optimazion of milling parameter- the trade-offs between energy, production rate and cutting quality”, *Journal of Cleaner Production*, 2013, pp. 1-10.

[74] V. A. Balogun, P. T. Mativenga, “Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes”, *Journal of Cleaner Production*, 41, 2012, pp. 179-186.

[75] R. A. Bhushan, “Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC paeticle composites”, *Journal of Cleaner Production*, 39, 2013, pp. 242-254.

[76] M. L. Calvanese, P. Albertelli, A. Matta, M. Taisch, “Analysis of Energy Consumption in CNC Machining Centers and Determination of Optimal Cutting Conditions”, *20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, 2013, pp. 227-232.

[77] R. B. Silva, A. R. Machado, E. O. Ezugwu, J. Bonney, W. F. Sales, “Tools life and wear mechanisms in high speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under vaious coolant pressure”, *Journal of Materials Processing Technolory*, 213, 2013, pp. 1459-1464.

[78] A.N. Fang, P. S. Pai, N. Edwards, “A comparative study of high-speed machining of Ti–6Al–4V and Inconel 718 - part I: effect of dynamic tool edge wear on cutting forces”, *Int J Adv Manuf Technol*, 2013.

[79] V. Francis, R.S. Singh, N. Singh, A.R. Rizvi, S. Kumar, “Application of Taguchi method and anova in optimization of cutting parameters for

material removal rate and surface roughness in turning operation", *Journal Impact Factor*, 3, 2013, pp. 47 – 53.

[80] D.V.V. Krishna Prasad and K. Bharathi, "Multi-Objective Optimization of Milling Parameters for Machining Cast Iron on Machining Centre", *Research Journal of Engineering Sciences*, 2013, pp. 35-39.

[81] S. M. Reddy, "Optimization of surface roughness in high-speed end milling operation using taguchi's method", *Journal Impact Factor*, 4, 2013, pp. 249-258.

[82] G. Sridhar, P. R. Babu, "Cutting parameter optimization for minimizing machining distortion of thin wall thin floor avionic components using Taguchi technique", *Journal Impact Factor*, 4, 2013, pp. 71-78.

[83] X. Tian, J. Zhao, Jiabang Zhao, Z. Gong, Y. Dong, "Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools", *Int J Adv Manuf Technol*, 2013.

[84] A. R. Yildiz, "Cuckoo search algorithm for the selection of optimal machining parameters in milling operations", *Int J Adv Manuf Technol*, 2013, pp. 55-61.

[85] S. Jia, R. Tang, J. Lv, "Therblig-based energy demand modeling methodology of machining process to support intelligent manufacturing", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2014, pp.913-934.

[86] A. Aramcharoen, P. T. Mativenga2, "Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy", *Journal of Cleaner Production*, 2014.

[87] W. Akhtara, J. Sunb, W. Chenc, P. Sund, "A Simple GA Based Approach for Multi-objective Optimization of Machining Parameters*", Advanced Materials Research*, 2014, pp.402-407.

[88] X.Cui, J. Zhao, "Cutting performance of coated carbide tools in high-speed face milling of AISI H13 hardened steel", *Int J Adv Manuf Technol*, 2014, pp. 1811–1824.

[89] S. Kannan, N. Baskar, B. Sureshkumar, "Selection of Machining Parameters In Face Milling Operations For Copper Work Piece Material Using Response Surface Methodology And Genetic Algorithm", *Design and Research Conference*, 2014, pp. 1-6.

[90] EIA, *U.S. Energy-Related Carbon Dioxide Emissions*, 2014.

[91] R. D Patel, N. V. Oza, S. N. Bhavsar, "Prediction of Surface Roughness in CNC Milling Machine by Controlling Machining Parameters Using Ann", *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research India*, 4, 2014, pp.353-359.

[92] B. N. Pathak, K. L. Sahoo, M. Mishra, "Effect of Machining Parameters on Cutting Forces and Surface Roughness in Al-(1-2) Fe-1V-1Si Alloys", *Materials and Manufacturing Processes*, 28, 2013, pp. 463-469.

[93] A. Singh, A. Agrawal, "Comparison of Dimensional Repeatability and Accuracy for Deformation Machining Stretching Mode with Sheet Metal Components", *Design and Research Conference*, 2014, pp. 306-1 – 306-5.

[94] A. Singh, R. Khanna, K. Goyal, P. Kumar, "Optimization of Input Process Parameters in CNC Milling Machine of EN24 Steel", *Ijrmet,* 1, 2014, pp. 40-46.

[95] Z. Wang, M. Ranman, “High speed machining”, *Comprehensive Materials Processing*, 11, 2014, pp. 221-252.

[96] H. S. Yoon, J. Y. Lee, M. S. Kim, S. H. Ahn, “Empirical power – consumption model for material removal in three-axis milling”, *Journal of Cleaner Production*, 2014, pp. 1-9.

[97] Y. Altintas, S. Tulsyan, “Prediction of part machining cycle times via virtual CNC”, *Cirp Annals – Manufacturing Technology*, 2015, pp. 1-4.

[98] A. S. Awale, K. H. Inamdar, “Review on High-Speed Machining of Hard Material”, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 3, 2015, pp. 517-524.

[99] M. Iqbal, M. Konneh, M. H. Bin, K. A. Abdallah, M. F. B. Binting, “Cutting temperature in high-speed milling of silicon carbide using diamond coated tool”, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 2015, pp. 62-66.

[100] G. Kant, K. S. Sangwan, “Predictive Modelling for Energy Consumption in Machining using Artificial Neural Network”, *Procedia CIRP*, 37, 2015, pp. 205-210.

[101] P. Krishnakumara, K. Rameshkumarb, K. I. Ramachandranc, “Tool Wear Condition Prediction Using Vibration Signals in High-Speed Machining (HSM) of Titanium (Ti-6Al-4V) Alloy”, *Procedia Computer Science*, 50, 2015, pp. 270-275.

[102] V. D. Patil, P. Mrs. S. P. Kamble, P. Mr. S. T. Bagde, “Analysis on Multi Objective Optimization of CNC End Milling Machining Parameters of (Al 2024-T4)”, *Journal of emerging technologies and innovative research*, S 2015, pp. 728-732.

[103] M. P. Sealy, Z. Y. Liu, D. Zhang, Y. B. Guo, Z. Q. Liu, “Energy consumption and modeling in precision hard milling”, *Journal of Cleaner Production*, 2015, pp. 1-11.

[104] P. Albertelli, A. Keshari, A. Matta, “Energy oriented multi cutting parameter optimization in face milling”, *Journal of Cleaner Production*, 2016, pp. 1-17.

[105] K. He, R. Tong, Z. Zhang, “Energy Consumption Prediction System of Mechanical Processes Based on Empirical Models and Computer-Aided Manufacturing”, *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2016, pp. 1-10.

[106] S. Anwar, S. U. Z. Khan, “Optimization of the end milling parameters for improving surface roughness using taguchi method”, *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 2016, pp. 6-9.

[107] A. Franco, C. A. A Rashed, L. Romoli, “Analysis of energy consumption in micro-drilling processes”, *Journal of Cleaner Production*, 2016, pp. 1-23.

[108] Z. Kang, S. Honghua, H. Linjiang, L. Yingzhi, “Vibration control of HSM of thin-wall titanium alloy components based on finite element simulation”, *Materials Science Forum*, 2016, pp. 304-310.

[109] M. A. Kiprawi, A. Yassin, S. T. S. Shazali, M. S. Islam, M. A. M. Said, “Study of cutting-edge temperature and cutting force of end mill tool in high-speed machining”, *MATEC Web of Conferences*, 87, 2016, pp. 1-5.

[110] H. S. Park, T. T. Nguyen, X. P. Dang, “Multi-objective optimization of turning process of hardened material for energy efficiency”, *International journal of precision engineering and manufacturing, 2016,* pp. 1-9.

[111] L. Zhou, J. Li, F. Li, Q. Meng, J. Li, X. Xu, “Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review”, *Journal of Cleaner Production*, 2016, pp. 3721-3734.

[112] C. Li, X. Chen, Y. Tang, L. Li, “Selection of optimum parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost”, *Journal of Cleaner Production*, 2017, pp. 1-22.

[113] A. Dadgari, D. Huo, D. Swailes, “The effect of machining toolpath on surface roughness and dimensinal accuracy for high-speed micro milling”, *Solid State Phenomena*, 261, 2017, pp. 69-76.

[114] K. S. Sangwan, G. Kant, “Optimization of Machining Parameters for Improving Energy Efficiency using Integrated Response Surface Methodology and Genetic Algorithm Approach”, *The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering*, 2017, pp. 517-522.

[115] M. Sekar, “Machining Chatter Analysis for High-Speed Milling Operations”, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 247, 2017, pp. 1-12.

[116] T. Sathish, N. Tamizharasan, S. T. B. Siva, K. E. Varu, B. Radhakrishman, “Optimisation of surface roughness in CNC milling process using RMS”, *International journal of mechanical engineering*, 2017, pp. 5-12.

[117] S. Yousefi, M. Zohoor, M. Faraji, “The variations of dimensional accuracy in dry hard turning operation”, *The 25th Annual International Conference on Mechanical Engineering ISME2017-2352 ISME2017*, Tarbiat Modares university, Tehran, Iran, 2017, pp. 415-416.

[118] H. Zhang, Z. Deng, Y. Fu, L. Wan, W. Liu, “Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on cutting specific energy consumption”, *Journal of cleaner production*, 2017, pp. 1-20.

[119] Web: http://steeljis.com/jis_steel_datasheet.php?name_id=159

[120] W. Cai, F. Liu , X. Zhou, J. Xie, "Fine energy consumption allowance of workpieces in the mechanical manufac turing industry", *Energy* ,114, 2016, pp. 623-633.

[121] T. Gutowski,J. Dahmus, A.Thiriez, "Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes", *13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*, Leuven, May 31 st-June 2nd, 2006.

[122] Y. He, F. Liu, T. Wu, F. Zhong, B. Peng, "Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining", *Proc. IMechE Vol. 226 Part B: J. Engineering Manufacture*, pp. 255-266, 2014.

[123] S. Kara, W. Li, "Unit process energy consump tion models for material removal processes", *CIRP Annals - Manufacturing Technology 60*, pp. 37–40, 2011.

[124] Q. Yi, C. Li, Y. Tang, X. Chen, "Multi-obj ective parameter optimization of CNC machining for low carbon manufacturing", *Journal of Cleaner Production*, pp. 1-9, 2015.

[125] M. Mori, M. Fujishima, Y. Inamasu, Y. Oda, "A study on energy efficiency improvement for machine tools", *CIRP Annals - Manufacturing Technology 60,* pp. 145–148, 2011.

[126] C. Li, L. Li, Y. Tang, "A comprehensive approach to parameters optimization of energy-aware CNC milling*", J Intell Manuf,* pp. 1-16, 2016.

[127] Y. Altintas, A. Verl, C. Brecher, L. Uriarte, G. Pritschow, "Machine tool feed drives", *CIRP Annals - Manufacturing Technology 60*, pp. 779–796, 2011.

[128] L. Jingxiang, R. Tang, S. Jia, "Therblig-based energy supply modeling of computer numerical control machine tools", *Journal of Cleaner Production 65*, pp. 168-177, 2014.

[129] S. Gara, W. Bouz, M. Ben, M. Hbaie, "Cost and time calculation in rough NC turning", *Int J Adv Manuf Technol*, 40, pp. 971–981, 2009.

[130] O. L. Avram, P. Xirouchakis, "Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system", *Journal of Cleaner Production* 19, pp. 699-711, 2011.

[131] D. Y. Ohm, Drivetech, Inc, "Selection of Servor motors and drivers", *http://www.drivetechinc.com/,* 2006.

[132] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, Electric Machinery-6th *Edition, Mc Graw Hill*, 2003.

[133] H. Gürocak, Industrial Control - Motor Selection_Drivers_Controller Turning_Applications, *John Wiley & Sons*, Ltd, 2016.

[134] D. Zarko, "Fundamentals of Mechanical Comp onents for Electric Drives", *Lectures of Department of Electric Machines and Drive*s, University of Zagreb, 2018.

[135] L. Jingxiang, R. Tang, S. Jia, Y. Liu, "Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools", *Journal of Cleaner Production xxx* , pp. 1-11, 2015.

[136] S. Kalparkjian, Manufacturing Processes for Engineering Materials, *Addison Wesley Publishing Company, Reading, Ma*, 839pp, 1984.

[137] J. Li, Y. Lu, H. Zhao, P. Li, Y. Yao, "Optimization of cutting parameters for energy saving", *Int J Adv Manuf Technol*, 70, pp. 117–124, 2014.

[138] W. Beyer, Handbook of Tables for Probability and Statistics 2nd Edition, *CRC Press*, 2017.

[139] Web: https://www.yg1.kr/toolselection/milling

[140] Web: https://www.gmc-instruments.de/en/products/mavowatt-230-set

[141] Web: http://extechvietnam.com/san-pham

[142] Web: https://www.mitutoyo.com/wp-content

[143] Web: https://www.zeiss.co.in/metrology/products

[144] Bies, Robert R.; Muldoon, Matthew F.; Pollock, Bruce G.; Manuck, Steven; Smith, Gwenn; Sale, Mark E. (2006). "A Genetic Algorithm-Based, Hybrid Machine Learning Approach to Model Selection". *Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics*. 33 (2): 196–221.

[145] J. Kennedy, and R. Eberhart, Particle swarm optimization, *in Proc. of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks, Piscataway*, NJ, pp. 1942–1948, 1995.

[146] Jim Pugh and Alcherio Martinoli, "Distributed Adaptation in Multi-Robot Search using Particle Swarm Optimization", *SAB'08 Proceedings of the 10th international conference on simuliation of adaptive behavior: From Animals to Animats,* 2008.

[147] A. M. Jubril, " A nonlinear weights selection in weighted sum for convex multi-objective optimization", *Mathematics Subject Classification*, 27, 2012, pp. 357-372.

[148] K. O. Alawode, G. A. Adegboyega, J.A. Muhideen, "NSGA-II/EDA Hybrid Evolutionary Algorithm for Solving Multi-objective Economic/Emission Dispatch Problem", *Electric Power Components and Systems*, 2018.

[149] Pham Van Tuan, Ho Viet Hai, Duong Quoc Dung, Doan Tat Khoa, Do Tien Lap, "Prediction of surface roughness when processing 40X annealing steel using rotary blade bit by artificail intelligence method", *Tạp chí Giao thông vận tải*, 4/2019.

# PHỤ LỤC

## 1. Mã chương trình tối ưu đơn mục tiêu sử dụng thuật toán GA

## a. Thuật toán GA

```
%% Problem Definition
CostFunction = @(x) myfitness(x);      % Cost Function
nVar = 3;            % Number of Decision Variables
VarSize = [1 nVar];   % Size of Decision Variables Matrix
VarMin = lb;         % Lower Bound of Variables
VarMax = ub;         % Upper Bound of Variables
% Number of Objective Functions
nObj = numel(CostFunction(unifrnd(VarMin, VarMax, VarSize)));
%% Parameters
MaxIt = 50;      % Maximum Number of Iterations
nPop = 100;       % Population Size
pCrossover = 0.5;                         % Crossover Percentage
nCrossover = 2*round(pCrossover*nPop/2);  % Number of Parnets (Offsprings)
pMutation = 0.4;                          % Mutation Percentage
nMutation = round(pMutation*nPop);        % Number of Mutants
mu = 0.05;                  % Mutation Rate
sigma = 0.1*(VarMax-VarMin);  % Mutation Step Size
%% Initialization
empty_individual.Position = [];
empty_individual.Cost = [];
empty_individual.Rank = [];
empty_individual.DominationSet = [];
empty_individual.DominatedCount = [];
empty_individual.CrowdingDistance = [];
pop = repmat(empty_individual, nPop, 1);
for i = 1:nPop
   pop(i).Position = unifrnd(VarMin, VarMax, VarSize);
   pop(i).Cost = CostFunction(pop(i).Position);
end
% Non-Dominated Sorting
[pop, F] = NonDominatedSorting(pop);
% Calculate Crowding Distance
pop = CalcCrowdingDistance(pop, F);
% Sort Population
[pop, F] = SortPopulation(pop);
%% Main Loop
for it = 1:MaxIt
   % Crossover
   popc = repmat(empty_individual, nCrossover/2, 2);
   for k = 1:nCrossover/2
      i1 = randi([1 nPop]);
      p1 = pop(i1);
      i2 = randi([1 nPop]);
      p2 = pop(i2);
      [popc(k, 1).Position, popc(k, 2).Position] = Crossover(p1.Position, p2.Position);
      popc(k, 1).Cost = CostFunction(popc(k, 1).Position);
      popc(k, 2).Cost = CostFunction(popc(k, 2).Position);
    end
   popc = popc(:);
```

```
    % Mutation
    popm = repmat(empty_individual, nMutation, 1);
    for k = 1:nMutation
        i = randi([1 nPop]);
        p = pop(i);
        popm(k).Position = Mutate(p.Position, mu, sigma);
        popm(k).Cost = CostFunction(popm(k).Position);
    end
    % Merge
    pop = [pop
         popc
         popm]; %#ok
     % Non-Dominated Sorting
    [pop, F] = NonDominatedSorting(pop);
    % Calculate Crowding Distance
    pop = CalcCrowdingDistance(pop, F);
    % Sort Population
    pop = SortPopulation(pop);
    % Truncate
    pop = pop(1:nPop);
     % Non-Dominated Sorting
    [pop, F] = NonDominatedSorting(pop);
   % Calculate Crowding Distance
    pop = CalcCrowdingDistance(pop, F);
    % Sort Population
    [pop, F] = SortPopulation(pop);
    % Store F1
    F1 = pop(F{1});
    % Show Iteration Information
    disp(['Iteration ' num2str(it) ': Number of F1 Members = ' num2str(numel(F1))]);
end
```

## b. Hàm mục tiêu sai số đường kính

```
function y=myfitness(x)
% Ham sai so duong kinh
y=0.023651+0.029605*x(1)-0.01234*x(3)-0.01845611*x(1)*x(2)...
    -0.01520593*x(2)*x(3)-0.01989*(x(1)^2);
end
```

## c. Khai báo điều kiện ràng buộc cho hàm mục tiêu

```
function [c,c_eq]= Constrain(x)
% Gia tri dung sai can duoi
e1=-0.02;
e2=0.02;
c1=e1-(0.023651+0.029605*x(1)-0.01234*x(3)-0.01845611*x(1*x(2)-0.01520593*x(2)*x(3)-
0.01989*(x(1)^2));
c2=0.023651+0.029605*x(1)-0.01234*x(3)-0.01845611*x(1)*x(2)-0.01520593*x(2)*x(3)-
0.01989*(x(1)^2)-e2;
```

```
c=[c1;c2];
c_eq=[0;0];
end
```

## 2. Mã chương trình tối ưu đơn mục tiêu sử dụng thuật toán PSO

## a. Thuật toán PSO

```
function out = Thuattoan_PSO(problem, params)
    %% Problem Definiton
    CostFunction = problem.CostFunction;  % Cost Function
    nVar = problem.nVar;        % Number of Unknown (Decision) Variables
    VarSize = [1 nVar];         % Matrix Size of Decision Variables
    VarMin = problem.VarMin;    % Lower Bound of Decision Variables
    VarMax = problem.VarMax;    % Upper Bound of Decision Variables
    %% Parameters of PSO
    MaxIt = params.MaxIt;   % Maximum Number of Iterations
    nPop = params.nPop;     % Population Size (Swarm Size)
    w = params.w;           % Intertia Coefficient
    wdamp = params.wdamp;   % Damping Ratio of Inertia Coefficient
    c1 = params.c1;         % Personal Acceleration Coefficient
    c2 = params.c2;         % Social Acceleration Coefficient
    % The Flag for Showing Iteration Information
    ShowIterInfo = params.ShowIterInfo;
    MaxVelocity = 0.2*(VarMax-VarMin);
    MinVelocity = -MaxVelocity;
    %% Initialization
    % The Particle Template
    empty_particle.Position = [];
    empty_particle.Velocity = [];
    empty_particle.Cost = [];
    empty_particle.Best.Position = [];
    empty_particle.Best.Cost = [];
    % Create Population Array
    particle = repmat(empty_particle, nPop, 1);
    % Initialize Global Best
    GlobalBest.Cost = inf;
    % Initialize Population Members
    for i=1:nPop
        % Generate Random Solution
        particle(i).Position = unifrnd(VarMin, VarMax, VarSize);
        % Initialize Velocity
        particle(i).Velocity = zeros(VarSize);
        % Evaluation
        particle(i).Cost = CostFunction(particle(i).Position);
        % Update the Personal Best
        particle(i).Best.Position = particle(i).Position;
        particle(i).Best.Cost = particle(i).Cost;
        % Update Global Best
        if particle(i).Best.Cost < GlobalBest.Cost
            GlobalBest = particle(i).Best;
        end
    end
    % Array to Hold Best Cost Value on Each Iteration
    BestCosts = zeros(MaxIt, 1);
    %% Main Loop of PSO
    for it=1:MaxIt
```

```
        for i=1:nPop
            % Update Velocity
            particle(i).Velocity = w*particle(i).Velocity ...
                + c1*rand(VarSize).*(particle(i).Best.Position - particle(i).Position) ...
                + c2*rand(VarSize).*(GlobalBest.Position - particle(i).Position);
            % Apply Velocity Limits
            particle(i).Velocity = max(particle(i).Velocity, MinVelocity);
            particle(i).Velocity = min(particle(i).Velocity, MaxVelocity);
            % Update Position
            particle(i).Position = particle(i).Position + particle(i).Velocity;
            % Apply Lower and Upper Bound Limits
            particle(i).Position = max(particle(i).Position, VarMin);
            particle(i).Position = min(particle(i).Position, VarMax);
            % Evaluation
            particle(i).Cost = CostFunction(particle(i).Position);
            % Update Personal Best
            if particle(i).Cost < particle(i).Best.Cost
                particle(i).Best.Position = particle(i).Position;
                particle(i).Best.Cost = particle(i).Cost;
                % Update Global Best
                if particle(i).Best.Cost < GlobalBest.Cost
                    GlobalBest = particle(i).Best;
                end
            end
        end
        % Store the Best Cost Value
        BestCosts(it) = GlobalBest.Cost;
        % Display Iteration Information
        if ShowIterInfo
            disp(['Iteration ' num2str(it) ': Best Cost = ' num2str(BestCosts(it))]);
        end
        % Damping Inertia Coefficient
        w = w * wdamp;
    end
    out.pop = particle;
    out.BestSol = GlobalBest;
    out.BestCosts = BestCosts;
end
```

## b. Hàm mục tiêu năng lượng tiêu thụ

```
function y=myfitness(x)
% Ham muc tieu nang luong
y=0.187743-0.183751*x(1)-0.050742*x(2)+0.0392*x(1)*x(2)+...
   +0.116201*(x(1)^2)-0.02873*(x(2)^2)-0.02626*(x(3)^2);
end
```

TẠP CHÍ

# CƠ KHÍ VIỆT NAM

ISSN 0866 - 7056

VIETNAM MECHANICAL ENGINEERING JOURNAL

CƠ QUAN CỦA TỔNG HỘI CƠ KHÍ VIỆT NAM

• Website: cokhivietnam.vn

- Ngành Thép tăng trưởng mạnh
- Gia nhiệt cục bộ cho lòng khuôn phun ép nhựa bằng khí nóng
- Doanh nghiệp Việt vẫn bị động trước thềm hội nhập AEC

SỐ 4 năm 2015

TẠP CHÍ
CƠ KHÍ VIỆT NAM
VIETNAM MECHANICAL ENGINEERING JOURNAL
CƠ QUAN CỦA TỔNG HỘI CƠ KHÍ VIỆT NAM

**TỔNG BIÊN TẬP**
ThS. **DƯƠNG THANH BÌNH**

**PHÓ TỔNG BIÊN TẬP**
PGS,TS. **NGUYỄN CHÍ SÁNG**
KS. **LÊ VĂN TUẤN**
PGS,TS. **ĐẶNG VĂN NGHÌN**
Nhà báo **NGUYỄN TIẾN DŨNG**

**HỘI ĐỒNG BIÊN TẬP**
TS. **ĐỖ HỮU HÀO** (Chủ tịch)
GS,TSKH. **BÀNH TIẾN LONG** (P. Chủ tịch)
KS. **TẠ QUANG MAI** (P. Chủ tịch)
TSKH. **PHAN XUÂN DŨNG**
PGS,TS. **HÀ MINH HÙNG**
PGS,TS. **TRƯƠNG VIỆT ANH**
PGS,TS. **ĐINH VĂN CHIÊN**
GS,TSKH. **PHẠM VĂN LANG**
TS. **TRẦN ĐỨC QUÝ**
TS. **LƯƠNG VĂN TIÊN**
PGS,TS. **VŨ NGỌC PI**
ThS. **NGUYỄN TIẾN V�best**
GS,TS. **CHU VĂN ĐẠT**
TS. **NGUYỄN VĂN CHƯƠNG**
GS,TS. **NGUYỄN TRỌNG GIẢNG**
PGS,TS. **ĐÀM XUÂN HIỆP**
PGS,TS. **TRẦN VĨNH HƯNG**
PGS,TS. **ĐÀO QUANG KẾ**
PGS,TS. **NGUYỄN VĂN BAY**
PGS,TS. **ĐÀO DUY TRUNG**
PGS,TS. **LÊ THU QUỲ**
TS. **NGUYỄN TIẾN VINH**
TS. **DƯƠNG VĂN TÀI**
TS. **LÊ MINH LƯ**

**THƯ KÝ TÒA SOẠN**
HÀ DUY KHÁNH

**THIẾT KẾ MỸ THUẬT**
ĐÀO NGỌC MY

**TÒA SOẠN TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM**
Số 4 Phạm Văn Đồng, P. Mai Dịch,
Cầu Giấy, Hà Nội
**Điện thoại:** (04) 37 920 651 – 0904 177 637
**Fax:** (04) 37 920 650
**E – mail:** tcckvietnam@gmail.com
**Văn phòng đại diện:**
**1. Tại TP. Hồ Chí Minh:**
Số 17/6 Nguyễn Phúc Chu, P.15, Q. Tân Bình,
TP. Hồ Chí Minh
**2. Tại tỉnh Quảng Ninh:**
Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng,
Liên Phương, Phương Đông, Uông Bí, Quảng Ninh
**Điện thoại:** (033) 6 292 168 - 0904 116 189
**E – mail:** minhthuan.tcckvn@gmail.com
**3. Tại Thái Nguyên:**
Số 234 Phú Xá, TP. Thái Nguyên, tỉnh Thái Nguyên
**Điện thoại:** (0280) 3847 110 - 0974 905 578
**Fax:** (0280) 384 7453
**E – mail:** tcckvn.vpddtn@gmail.com
***
**Giấy phép xuất bản**
Số 884/GP-BTTTT, ngày 09 tháng 6 năm 2011
**In tại:** Nhà in Khoa học Công nghệ Hà Nội
**Giá: 30.000 đồng**

# TRONG SỐ NÀY

Trang

**TIN TỨC VÀ SỰ KIỆN** (4-9)

- Ngành Thép tăng trưởng mạnh..... 6
- Từ 01/7/2015, xe máy điện phải đăng ký, nộp lệ phí trước bạ..... 7

**VẤN ĐỀ HÔM NAY** (10-14)

- Sản xuất cơ khí vướng nhiều "nút thắt"..... 10
- Sản phẩm công nghiệp hỗ trợ: Khoảng cách lớn với..... 11

**NGHIÊN CỨU - TRAO ĐỔI** (15-53)

1. **Đỗ Thành Trung, Phạm Sơn Minh, Phan Thế Nhân, Phùng Huy Dũng:** Gia nhiệt cục bộ cho lòng khuôn phun ép nhựa bằng khí nóng..... 15
2. ThS. **Lương Khánh Tình**, TS. **Nguyễn Viết Tân:** Xác định biến dạng của nền đất và góc nghiêng dọc cầu hai nhịp TMM khi tải trọng qua cầu là xe xích..... 21
3. PGS,TS. **Nguyễn Văn Vịnh**, ThS, NCS. **Bùi Thanh Danh**, ThS. **Nguyễn Thùy Chi:** Nghiên cứu động lực học của cổng trục phục vụ lao lắp dầm cầu Super-t trong trường hợp mang hàng di chuyển..... 26
4. ThS. **Dương Xuân Biên**, ThS. **Nguyễn Văn Công**, KS. **Đinh Đức Mạnh**, KS. **Nguyễn Văn Đức, Nguyễn Trung Kiên, Đoàn Văn Dưỡng:** Nghiên cứu ảnh hưởng của chiến lược chạy dao tới chất lượng gia công các dạng thành mỏng khi phay cao tốc hợp kim nhôm Al6061..... 33
5. **Giản Thị Thu Hường, Phan Kim Ngân:** Nghiên cứu ảnh hưởng của thông số mật độ sợi ngang đến một số tính chất cơ lý của vải dệt thoi Cotton/Spandex..... 40
6. TS. **Nguyễn Danh Sơn:** Xác định lực cản xới đất khi thi công đất cứng..... 44
7. **Dao Van Doan, Nguyen Van Hung:** Dynamic of high speed underwater projectile..... 48

**DOANH NGHIỆP VÀ HỘI NHẬP** (54-56)

- Doanh nghiệp Việt vẫn bị động trước thềm hội nhập AEC..... 54

**CÔNG NGHỆ MỚI VÀ SẢN PHẨM MỚI** (57)

- Hệ thống hàn ống tự động..... 57
- Robot quét keo đế giày..... 57

**CƠ KHÍ THẾ GIỚI** (58)

- BMW tung xe đạp phiên bản đặc biệt..... 58
- Arrinera Hussarya - siêu xe Ba Lan chính thức ra mắt..... 58

**VĂN HOÁ XÃ HỘI** (59-60)

- Ký ức 30/4 của các phóng viên chiến trường..... 59

# NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CHIẾN LƯỢC CHẠY DAO TỚI CHẤT LƯỢNG GIA CÔNG CÁC DẠNG THÀNH MỎNG KHI PHAY CAO TỐC HỢP KIM NHÔM AL6061

## RESEARCH ON THE INFLUENCE OF MACHINING STRATEGIES ON PROCESSING QUALITY VARIOUS TYPES OF THIN-WALLED ON HIGH SPEED MILLING FOR ALUMINUM ALLOY 6061

ThS. **Dương Xuân Biên**[1], ThS. **Nguyễn Văn Công**[1], KS. **Đinh Đức Mạnh**[1],
KS. **Nguyễn Văn Đức**[1], **Nguyễn Trung Kiên**[2], **Đoàn Văn Dưỡng**[3]
[1]Học viện Kỹ thuật Quân sự
[2]Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng
[3]Trường Cao đẳng nghề Đồng Nai

**TÓM TẮT**

*Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu ảnh hưởng của các chiến lược chạy dao khi phay cao tốc cho các chi tiết hợp kim nhôm dạng thành mỏng tới độ bóng bề mặt, độ chính xác kích thước và thời gian gia công. Kết quả của bài báo là cơ sở cho việc xác định chiến lược phay cao tốc hợp lý cho các dạng thành mỏng khác nhau.*

**Từ khóa:** *Chiến lược chạy dao, phay cao tốc, thành mỏng.*

**ABSTRACT**

*This paper presents the result of research on the fluence of machining strategies on surface roughness, dimension accuracy and machining time on high speed milling for aluminum alloy thin-walled parts. Since then we brought out conclude reasonable milling strategy for various types of thin-walled.*

**Keywords:** *Machining strategy, high speed milling, thin-walled.*

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Gia công cao tốc là một trong những công nghệ gia công cắt gọt hiện đại hiện nay. Loại hình gia công này cho phép nâng cao năng suất, độ chính xác, chất lượng bề mặt hơn rất nhiều so với gia công truyền thống.

Hai lĩnh vực được ứng dụng công nghệ gia công cao tốc nhiều nhất là chế tạo khuôn mẫu và gia công các chi tiết dạng thành mỏng phục vụ công nghiệp hàng không và vũ trụ. Vấn đề gia công các chi tiết thành mỏng thực sự là thử thách rất lớn đối với các nhà chế tạo trước đây. Để đảm bảo gia công được cần giải quyết tốt các vấn đề rung động, va đập, biến dạng…Chi tiết có dạng thành mỏng là những chi tiết có kết cấu thành hay gân với tỉ lệ bề dày b so với chiều cao h như sau [15]: $b/h > \frac{1}{100}$ (thành siêu mỏng), ($\frac{1}{5} \le b/h < \frac{1}{100}$ thành mỏng). Có thể chia làm các loại thành mỏng như: Dạng cánh, chữ "T", dạng chữ "I" (tên gọi là do tác giả đề xuất dựa trên hình dáng của chúng) (hình 1)

*Hình 1. Các dạng thành mỏng và kết cấu thực tế*

Hầu hết các chi tiết dạng thành mỏng được ứng dụng trong lĩnh vực hàng không và công nghệ vũ trụ bởi ưu điểm nổi trội của chúng là nhẹ và kết cấu bền hơn so với các mối lắp ghép có chức năng tương đương nhờ tính chất nguyên khối của chúng. Thời gian và chi phí cho công việc quản lý, kiểm kê chi tiết cũng sẽ giảm đi rất nhiều so với các hệ thống lắp ghép. Lĩnh vực ứng dụng của các chi tiết thành mỏng rất đặc dụng và khó có thể thay thế vị trí của nó. Chi tiết dạng thành mỏng cũng gặp nhiều trong công nghệ chế tạo khuôn, các dạng đầu cực của công nghệ xung với những khe không đủ nhỏ để dùng laser nhưng cũng không đủ lớn để gia công phay mà phải dùng đến những điện cực dạng thành mỏng.

Tuy có nhiều ưu điểm nhưng việc gia công các chi tiết dạng thành mỏng vấp phải một loạt những khó khăn trong công nghệ gia công như: Hệ thống công nghệ, phương pháp gia công, chế độ cắt,… cùng những ảnh hưởng đến chất lượng chi tiết trong quá trình gia công như rung động, biến dạng. Việc giải quyết được những vấn đề này luôn là thử thách khi gia công.

Mảng gia công tốc độ cao dành cho lĩnh vực thành mỏng còn nhiều mới mẻ ở trong nước. Đã có một số nghiên cứu được công bố như [1] liên quan đến ảnh hưởng của chế độ cắt tới độ bóng bề mặt cho hợp kim nhôm nhưng mới chỉ dừng lại ở dạng phay mặt đơn giản với một chiến lược chạy dao cụ thể. Tài liệu [2] đánh giá ảnh hưởng của chế độ cắt tới độ chính xác khi phay cao tốc vật liệu cứng với chiến lược phay Pocket. Tài liệu [3] đánh giá ảnh hưởng của chế độ cắt khi phay cao tốc hợp kim nhôm thành mỏng nhưng cũng chỉ với một loại thành mỏng cơ bản và một chiến lược chạy dao. Ngoài ra còn một số bài viết liên quan đến phay cao tốc giới thiệu tổng quan, chưa đi vào cụ thể.

Trên thế giới, gia công cao tốc thành mỏng đã được nghiên cứu và đã có nhiều công trình công bố về gia công thành mỏng. Tài liệu [6] đánh giá ảnh hưởng của các thông số cắt tới biến dạng của thành mỏng thông qua lực cắt. Tác giả F.J. Campa và các đồng nghiệp trong [7] đánh giá đặc trưng động lực học khi gia công thành mỏng ở dạng đáy. [8] đánh giá khá đầy đủ trên nhiều mặt khi gia công thành mỏng như đặc trưng động lực học, dao cụ, lực cắt, biến dạng và rung động. Tác giả J.Bertil [8] đánh giá ảnh hưởng của dao cụ thông qua dao động đến chất lượng của chi tiết thành mỏng. Tuy nhiên, vấn đề về chiến lược chạy dao dùng cho cụ thể loại hình thành mỏng thì còn ít được nhắc đến.

## 2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

### 2.1. Các chiến lược chạy dao cơ bản

Chiến lược chạy dao thường được nhắc đến như là phương pháp cắt khi ứng dụng các phần mềm mô phỏng CAD/CAM trong gia công. Đây cũng là một trong nhiều yếu tố có ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng gia công chi tiết. Kiểu chạy dao khác nhau, cách vào và ra dao, thứ tự cắt khác nhau đều có ảnh hưởng đến lực cắt, va đập, rung động và biến dạng của thành mỏng. Vấn đề chiến lược chạy dao ít được nhắc đến trong các công trình được công bố trong và ngoài nước vì rất khó khăn để đưa ra mô hình toán học chính xác mô tả kiểu chạy dao trong các phần mềm phân tích, dự đoán. Do vậy, con đường thực nghiệm là phù hợp và sát với thực tế hơn cả để có thể đánh giá được ảnh hưởng của các chiến lược chạy dao tới chất lượng gia công thành mỏng.

Có thể kể đến rất nhiều chiến lược chạy dao trong các phần mềm CAD/CAM thông dụng như: Chiến lược Oneway, Zigzag, Zlevel, Spiral, Parallel,... Các chiến lược chạy dao phù hợp khi gia công chi tiết dạng thành mỏng gồm: Oneway, Zigzag và Zlevel.

*Hình 2. Các chiến lược chạy dao thông dụng*

Chiến lược Oneway tạo ra các đường chạy dao theo 1 hướng cố định trên một bề mặt cố định dựa trên việc xác định đó là quá trình phay thuận hay phay nghịch. Đặc điểm của chiến lược này là lực cắt không đổi chiều trong suốt quá trình cắt.

Chiến lược Zigzag tạo ra các đường chạy dao đổi chiều liên tục theo chiều dài trên từng bề mặt có hướng xác định. Chiến lược này có lực cắt thay đổi.

Chiến lược Zlevel, đây là chiến lược chạy dao cho các bề mặt dốc đứng với chiều sâu cắt không đổi từ trên xuống. Chiến lược này cho đường chạy dao chạy từng lớp quanh đáo (thành dốc đứng) theo chiều Z từ trên xuống.

### 2.2. Mô tả bài toán và phương pháp thực nghiệm

Mục tiêu thực nghiệm nhằm đánh giá ảnh hưởng của các chiến lược chạy dao tới độ bóng bề mặt, độ chính xác kích thước và thời gian gia công khi phay cao tốc các kiểu thành mỏng khác nhau với cùng một chế độ cắt, kích thước độ dày, chiều cao và chiều dài cố định.

Các thí nghiệm được thực hiện trên máy DMU60 monoblock Deckel Maho (tốc độ trục chính tối đa là 12.000 vòng/phút, công suất động cơ trục chính là 15kW, mômen lớn nhất 130 Nm, gia tốc lớn nhất trên các trục X/Y/Z là 6/7/4 $m/s^2$, tốc độ chạy dao nhanh 30m/phút, tốc độ chạy dao khi cắt tối đa là 30.000mm/phút, hệ thống thay dao tự động HSK -A63 kiểu kẹp thủy lực, hệ điều khiển Heidenhain iTNC 530). Dụng cụ cắt là dao phay hợp kim cứng chuyên gia công nhôm D16 mm, hai răng cắt khi phay thô và 6 răng cắt khi phay tinh. Đồ gá là Êtô chuyên dùng gá kim loại màu. Phôi có kích thước (dài x rộng x cao): 60x16x100 mm, vật liệu là hợp kim Al6061 (chưa qua khử ứng suất dư). Lượng dư để lại khi gia công tinh (dày x cao) là 2x50 mm. Kích thước thành mỏng thành phẩm (dày x cao) là 1x50 mm.

*Hình 3. Phôi và máy gia công*

Các chiến lược được chọn thực nghiệm là Oneway, Zigzag và Zlevel trên phần mềm Topsolid 2014. Tiến hành thực nghiệm theo 3 bước. Bước 1 thực hiện trên thành mỏng dạng cánh nhằm xác định phương pháp để lại lượng dư (đều hoặc không đều để tránh việc cán dao tì vào phần đã gia công phía trên gây ra sai số). Kết quả chọn phương án để lại lượng dư không đều (25mm chiều cao phía trên có độ dày 1,8mm và phần còn lại có bề dày là 2mm). Bước 2 thực hiện gia công chi tiết dạng cánh với 3 chiến lược khác nhau nhằm xác định chiến lược dùng cho gia công thô. Thực nghiệm này đảm bảo chất lượng chi tiết không bị ảnh hưởng bởi quá trình gia công thô. Kết quả cho thấy, việc gia công từ phôi dày 16mm về độ dày 1,8mm và 2mm thì chiến lược chạy dao không ảnh hưởng đến chất lượng chi tiết bán thành phẩm. Do vậy, tác giả chọn chiến lược chạy thô là Zlevel. Thực nghiệm thứ ba nhằm chọn chế độ cắt hợp lý cho phay thành mỏng nhằm đạt chất lượng tốt nhất về chất lượng bề mặt và độ chính xác (chế độ cắt này sẽ được giữ nguyên cho tất cả các chiến lược chạy dao khi thực nghiệm cụ thể) (cơ sở chọn chế độ cắt thực nghiệm là kết quả nghiên cứu trong tài liệu [1], [2], [5]). Kết quả là tác giả chọn chế độ cắt cố định khi gia công tinh như sau: Chiều sâu cắt t=0,5mm, bề rộng cắt b=0,5mm, tốc độ cắt Vc=300m/phút, tốc độ chạy dao F=2000mm/phút (Fz= 0,056mm/răng) (ứng với đường kính dao D16mm và 6 răng cắt). Cuối cùng là các thực nghiệm gia công tinh thành mỏng với mỗi dạng thành mỏng sẽ gia công tương ứng với 03 chiến lược chạy dao. Việc lấy số liệu được tiến hành lần lượt như sau: Thời gian gia công được đo theo thời gian thực máy gia công từ khi bắt đầu chiến lược phay tinh đến khi hoàn thành chương trình gia công. Đơn vị đo là phút. Đo độ nhám bề mặt (với chi tiết dạng cánh) đo trên một khoảng độ cao với 3 vị trí khác nhau (chọn khu vực có độ nhám tốt nhất để đo). Đo ở 3 khoảng độ cao: 0-5mm, 20-25mm và 40-50mm. Đo dọc theo chiều cao của thành mỏng. Với chi tiết chữ "T" và chữ "I" thì đo ở 3 khoảng độ cao giống chi tiết dạng cánh, nhưng mỗi khoảng độ cao chỉ lấy 2 vị trí đo phía trong gần gân thì đầu thiết bị đo không đảm bảo đo được. Đo độ sai lệch kích thước thì dùng thước cặp hiển thị số (sai số 0,01 mm) đo ở 2 độ cao 5mm và 50mm. Mỗi độ cao lấy 3 giá trị, tính lấy trung bình.

*Hình 4. Dụng cụ đo và các chi tiết sau gia công*

Sau khi tiến hành lấy số liệu, ta có kết quả thực nghiệm theo bảng 4.

*Bảng 4. Kết quả thực nghiệm*

| Chi tiết dạng cánh | Độ nhám bề mặt | | | | | | | | | | | | Độ chính xác gia công | | | | | | | | | | Thời gian gia công | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Vị trí 5mm | | | | Vị trí 25 mm | | | | Vị trí 50 mm | | | | Chiều cao 5mm | | | | | Chiều cao 50 mm | | | | | | |
| | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lệch | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lệch | | |
| Oneway | 1.268 | 1.180 | 1.169 | **1.206** | 1.135 | 0.837 | 0.976 | **1.003** | 0.343 | 0.238 | 0.252 | **0.270** | 0.840 | 0.830 | 0.790 | **0.820** | **0.180** | 1.030 | 1.020 | 1.010 | **1.013** | **0.013** | 1h9'30s | 13.5 |
| ZigZag | 1.783 | 1.404 | 2.402 | **1.863** | 0.898 | 1.200 | 0.956 | **1.018** | 0.358 | 0.327 | 0.363 | **0.349** | 0.750 | 0.760 | 0.810 | **0.773** | **0.227** | 1.020 | 1.010 | 1.020 | **1.017** | **0.017** | 11h'10s | 11.16667 |
| Zlevel | 1.852 | 1.845 | 1.855 | **1.851** | 0.841 | 0.855 | 0.821 | **0.772** | 0.260 | 0.148 | 0.190 | **0.206** | 0.880 | 0.890 | 0.900 | **0.883** | **0.117** | 1.000 | 1.040 | 1.020 | **1.020** | **0.020** | 9h'40s | 9.666667 |

| Chi tiết dạng T | Độ nhám bề mặt | | | | | | | | | | | | Độ chính xác gia công | | | | | | | | | | Thời gian gia công | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Vị trí 5mm | | | | Vị trí 25 mm | | | | Vị trí 50 mm | | | | Chiều cao 5mm | | | | | Chiều cao 50 mm | | | | | | |
| | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lệch | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lệch | | |
| Oneway | 1.199 | 1.211 | | **1.205** | 0.822 | 0.549 | | **0.686** | 0.374 | 0.309 | | **0.342** | 0.720 | 0.740 | 0.920 | **0.793** | **0.293** | 1.040 | 1.020 | 1.030 | **1.030** | **0.030** | 17m'06s | 17.1 |
| ZigZag | 1.496 | 1.454 | | **1.475** | 1.270 | 0.909 | | **1.090** | 0.416 | 0.307 | | **0.362** | 0.800 | 0.800 | 0.880 | **0.827** | **0.173** | 1.020 | 1.000 | 1.030 | **1.017** | **0.017** | 16h'40s | 16.66667 |
| Zlevel | 1.009 | 1.818 | | **1.414** | 0.671 | 0.526 | | **0.598** | 0.183 | 0.275 | | **0.229** | 0.900 | 0.900 | 0.920 | **0.907** | **0.093** | 1.000 | 0.990 | 1.000 | **0.997** | **0.003** | 10ph42 | 10.7 |

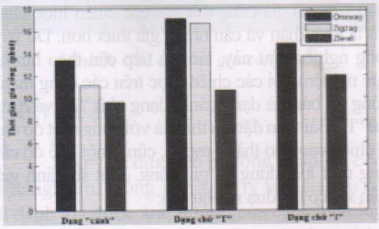
| Chi tiết dạng chữ I | Độ nhám bề mặt | | | | | | | | | | | | Độ chính xác gia công | | | | | | | | | | Thời gian gia công | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Vị trí 5mm | | | | Vị trí 25 mm | | | | Vị trí 50 mm | | | | Chiều cao 5mm | | | | | Chiều cao 50 mm | | | | | | |
| | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lệch | Lần 1 | Lần 2 | Lần 3 | TB | Lệch | | |
| Oneway | 0.768 | 0.760 | 0.755 | **0.761** | 0.663 | 0.665 | 0.667 | **0.665** | 0.253 | 0.245 | 0.249 | **0.249** | 0.950 | 0.950 | 0.940 | **0.947** | **0.053** | 0.990 | 0.990 | 0.990 | **0.990** | **0.010** | 14ph51s | 14.85 |
| ZigZag | 0.911 | 0.904 | 0.843 | **0.886** | 0.722 | 0.750 | 0.825 | **0.766** | 0.282 | 0.279 | 0.268 | **0.276** | 0.960 | 0.970 | 0.970 | **0.967** | **0.033** | 1.030 | 0.990 | 1.020 | **1.013** | **0.007** | 13ph41s | 13.68333 |
| Zlevel | 0.627 | 0.628 | 0.627 | **0.627** | 0.413 | 0.411 | 0.405 | **0.410** | 0.148 | 0.140 | 0.140 | **0.143** | 0.950 | 0.950 | 0.960 | **0.953** | **0.047** | 0.990 | 0.980 | 0.990 | **0.987** | **0.013** | 12ph | 12 |



ISSN 0866 - 7056
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 4 năm 2015
www.cokhivietnam.vn

### 2.3. Đánh giá kết quả thực nghiệm

*1) Ảnh hưởng của chiến lược chạy dao tới thời gian gia công*




*Hình 5. Ảnh hưởng của chiến lược chạy dao tới thời gian gia công*

Quan sát hình 5 ta thấy, thời gian gia công cho từng loại hình chi tiết chênh lệch nhau không lớn giữa các kiểu chạy dao. Điểm dễ nhận ra là kiểu gia công Zlevel có thời gian gia công ngắn nhất, kiểu oneway mất nhiều thời gian nhất. Điều này dễ hiểu vì Oneway mất nhiều thời gian chạy không cắt để về điểm cắt ban đầu. Thời gian gia công chi tiết dạng cánh là ít nhất. Vậy, xét về chỉ tiêu thời gian, nên chọn kiểu gia công Zlevel, phù hợp cho gia công thô và bán tinh.

*2) Ảnh hưởng của chiến lược chạy dao tới độ chính xác gia công*

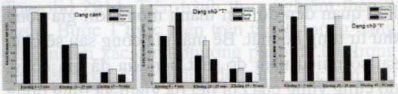
*Hình 6. Ảnh hưởng của chiến lược chạy dao tới độ chính xác gia công*

Đối với thành mỏng dạng cánh, ở độ cao 5-10 mm tính từ trên đỉnh thành mỏng xuống thì giá trị sai số theo chiến lược ZigZag là cao nhất, Zlevel là thấp nhất. Kiểu chạy dao ZigZag có kết hợp cả phay thuận và phay nghịch theo thứ tự từng bề mặt, hướng của lực cắt thay đổi liên tục, ngoài yếu tố ảnh hưởng của sự tì cán dao còn có liên quan đến độ bền thành mỏng khi gia công thứ tự từng bề mặt. Bề mặt gia công sau sẽ chịu sai số nhiều nhất do mặt bên kia đã gia công, độ cứng vững của chi tiết đã giảm và rung động tăng lên. Ở độ cao 45-50 mm (tức là chân thành mỏng), sai số nhỏ hơn rất nhiều so với trên đỉnh thành mỏng và các chiến lược gia công đều cho giá trị sai số rất nhỏ, tương đương nhau. Điều này có thể giải thích là do gần chân thành mỏng, độ cứng vững cao hơn do kết cấu, ít rung động hơn và không có sự tì của cán dao. Có thể nói, ở chi tiết dạng cánh, lấy chỉ tiêu độ chính xác thì nên chọn chiến lược Zlevel. Điểm lưu ý là ở độ cao 45-50 mm, Zlevel cho sai số cao hơn hai chiến lược còn lại. Tức là, khi độ cứng vững đảm bảo thì chiến lược Zlevel chưa hẳn là lựa chọn tốt nhất.

Với thành mỏng dạng chữ "T" ta có thể thấy, chiến lược Zlevel cho giá trị sai lệch kích thước là nhỏ nhất trên toàn bộ chiều cao chi tiết mỏng. Cũng phải nhận thấy rằng, về tổng quan, giá trị sai số cho các chiến lược chạy dao ở dạng thành mỏng này là rất nhỏ. Lớn nhất là 0,227 mm. Điều này cho thấy, khi thiết kế, cấu trúc thành dù rất mỏng nhưng đảm bảo có liên kết bền vững (đồng nhất vật liệu, không gây tập trung ứng suất, kết cấu không thay đổi đột ngột,....) thì vẫn có thể gia công đạt yêu cầu kĩ thuật.

Cuối cùng, chi tiết dạng chữ "I" cho thấy kết cấu của thành mỏng được liên kết chặt chẽ với hai thành bên nên rất cứng vững, các chiến lược chạy dao đều cho sai số gia công rất nhỏ (chưa đến 0,06 mm) trên toàn bộ chiều cao của thành mỏng. Lúc này dù chạy với chiến lược gia công nào thì cũng có thể đảm bảo được yêu cầu kĩ thuật. Với kết quả thực nghiệm trên hình 6 thì chiến lược ZigZag lại cho giá trị sai số gia công là nhỏ nhất.

*3) Ảnh hưởng của chiến lược chạy dao tới độ nhám bề mặt*



*Hình 7. Ảnh hưởng của chiến lược chạy dao tới độ nhám bề mặt*

Dựa trên hình 7, với chi tiết dạng cánh, giá trị độ nhám lớn nhất là 1,863 µm (giữa cấp 6 và cấp 7), nhỏ nhất là 0,206 µm (giữa cấp 9 và cấp 10). Phần trên đầu thành mỏng chịu dao động và va đập nhiều nhất nên bề mặt bị "gặn" (thô), các chiến lược chạy dao đều cho kết quả tương đương nhau, lúc này chiến lược Oneway cho kết quả khả quan nhất, điều này phù hợp với thực tế gia công, việc phay thuận cho bề mặt có độ bóng tốt nhất. Với chi tiết dạng chữ "T", chiến lược Oneway cho chất lượng bề mặt tốt nhất, khi độ cứng vững của chi tiết tăng lên (phía gần đáy thành mỏng), các chiến lược còn lại mới có được chất lượng bề mặt tốt. Ở phía trên cùng của thành mỏng, chiến lược Zlevel tạo ra đường chạy dao có lực cắt đổi chiều liên tục, rung động cả hai phía và liên tiếp nhau nên cho chất lượng bề mặt thấp, không ổn định. Hai chiến lược còn lại thì rung động một phía nên chất lượng bề mặt tốt hơn. Cuối cùng, với dạng thành mỏng chữ "I", căn cứ vào kết quả thực nghiệm trên hình 7, ta thấy rằng, chất lượng bề mặt tăng lên rất nhiều khi độ cứng vững của thành mỏng cao lên. Giá trị độ nhám lớn nhất là 0.886 µm (giữa cấp 7 và cấp 8) và nhỏ nhất là 0,143 µm (giữa cấp 10 và cấp 11). Ở mức độ cứng vững cao, chiến lược Zlevel cho chất lượng bề mặt tốt nhất, chiến lược ZigZag cho chất lượng bề mặt thấp nhất. Có được kết quả này là do sự thay đổi mức độ cứng vững của thành mỏng, hạn chế được ảnh hưởng do rung động.

**2.4. Đánh giá chung về ảnh hưởng của chiến lược chạy dao tới chất lượng gia công**

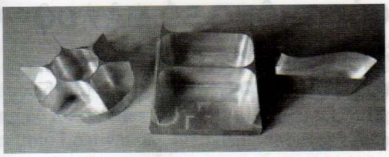
Như đã nói ở phần trên, ưu điểm nổi trội của việc gia công phay thành mỏng là độ bền của thành mỏng cao hơn nhiều so với việc lắp ghép do liên kết kim loại nội tại của bản thân chi tiết, giảm sai số do gia công, lắp ghép và chi phí quản lý,... Việc nghiên cứu công nghệ gia công thành mỏng là cần thiết. Cũng đã có nhiều nghiên cứu về việc gia công thành mỏng (rung động, biến dạng, quy trình gia công, kiểu loại thành mỏng, ...) có ứng dụng các phần mềm CAD/CAM nhằm dự đoán, đánh giá kết quả của quá trình gia công nhưng việc mô phỏng, dự đoán kết quả gia công đối với các chiến lược chạy dao là khó khăn và cần nhiều giả thiết hơn. Do vậy, trong nghiên cứu này, tác giả tiếp cận theo hướng thực nghiệm với các chiến lược trên các dạng thành mỏng cơ bản là dạng cánh, dạng chữ "T" và dạng chữ "I". Bài toán đặt giả thiết là với cùng một độ dày và chiều cao cho thành mỏng, cùng một chế độ cắt, cùng một loại dụng cụ gia công. Một số đánh giá, nhận xét có thể đưa ra như sau:

Khi gia công các chi tiết thành mỏng dạng cánh, nếu lấy chỉ tiêu là thời gian gia công và độ chính xác gia công thì chọn chiến lược Zlevel, nếu lấy chỉ tiêu độ nhám bề mặt thì chọn chiến lược Oneway. Với mô hình thí nghiệm và hình dáng hình học trong đề tài, ta có thể đạt độ nhám trung bình 0,943µm (cấp 7 và cấp 8), độ chính xác trung bình 0.07mm và thời gian gia công dưới 10 phút (với kích thước theo mô hình thực nghiệm).

Khi gia công các chi tiết dạng chữ "T", chiến lược chạy dao tốt nhất là Zlevel. Đây là chiến lược cho các chỉ tiêu tốt nhất về độ nhám bề mặt, độ chính xác và thời gian gia công. Độ nhám đạt 0,747 µm, độ chính xác đạt 0.05mm và thời gian gia công khoảng 11 phút.

Tương tự với các chi tiết dạng chữ "I", chiến lược chạy dao tốt nhất là Zlevel. Với chế độ cắt thực nghiệm, độ nhám đạt 0,393 µm, độ chính xác đạt 0.03mm và thời gian gia công khoảng 12 phút.

Áp dụng các kết quả đạt được, tác giả đã thực hiện gia công một số mẫu có mô hình như hình 8 với các thông số như sau: Vật liệu chi tiết là hợp kim Al6061 chưa qua khử ứng suất dư; độ dày x chiều dài thành mỏng: 0,8 x 100 mm; Chiều cao thành mỏng: 30 mm; Chiến lược gia công: Zlevel; Máy gia công, đồ gá, dụng cụ cắt và chế độ cắt: Giống gia công thực nghiệm; Ta có kết quả đo được: Giá trị độ nhám trung bình: 0,35 µm (giữa cấp 8 và cấp 9); Giá trị sai lệch kích thước (độ chính xác kích thước) trung bình: 0,02 mm.



*Hình 8. Các chi tiết gia công mẫu*

## 3. KẾT LUẬN

Như vậy, dựa trên phương pháp gia công thực nghiệm, thống kê và xử lý số liệu, bài báo đã đánh giá được ảnh hưởng của các chiến lược chạy dao tới chất lượng gia công các dạng thành mỏng khác nhau khi phay cao tốc cho hợp kim nhôm 6061. Trên cơ sở giữ nguyên chế độ cắt, ta thấy rằng chiến lược chạy dao Zlevel áp dụng cho việc gia công các chi tiết dạng thành mỏng là hợp lý nhất. Điều này sẽ góp phần không nhỏ cho các nhà gia công khi nghiên cứu về gia công phay cao tốc các chi tiết dạng này. Trong quá trình nghiên cứu, tác giả cũng nhận thấy một số yếu tố có tác động quyết định đến các chỉ tiêu chất lượng thành mỏng mà chưa đề cập đến ở đây như: Mối quan hệ giữa độ dày thành mỏng với chiều cao và chiều dài thành mỏng. Có thể đưa ra nhận định rằng, chiều cao thành mỏng càng giảm, độ dày càng tăng và chiều dài càng nhỏ thì chất lượng càng cao.❖

Ngày nhận bài: **06/3/2015**
Ngày phản biện: **17/4/2015**

**Tài liệu tham khảo:**

[1]. Dương Xuân Biên, Đỗ Tiến Lập (2012); *"Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ nhám bề mặt khi gia công phay cao tốc hợp kim nhôm Al6061"*, Tạp chí Cơ khí Việt Nam, số 11/2012.

[2]. Nguyễn Hữu Thùy (2013); *"Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ chính xác gia công khi phay cao tốc"*, LVTN cao học Học viện Kỹ thuật Quân sự.

[3]. Lê Thanh Quan (2014); *"Nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến chất lượng bề mặt gia công khi phay cao tốc thành mỏng"*, LVTN cao học Học viện Kỹ thuật Quân sự.

[4]. Lưu Văn Anh (2013); *"Nghiên cứu ảnh hưởng của một số yếu tố công nghệ đến độ nhám bề mặt khi tiện cao tốc trên máy CNC"*, LVTN cao học Học viện Kỹ thuật Quân sự.

[5]. Dương Xuân Biên (2013); *"Nghiên cứu ảnh hưởng của chiều sâu cắt và bề rộng cắt tới độ nhám bề mặt khi phay thường và cao tốc"*, Tạp chí Khoa học & Kỹ thuật Học viện Kỹ thuật Quân sự, số 58, 12/2013.

[5]. Tang Aijun, Liu Zhanqiang (2008); *"Deformations of thin-walled plate due to static end milling force"*, School of Mechanical Engineering, Shandong University, 73 Jingshi Road, Jinan 250061, China.

[6]. F.J.Campa, S.Seguy (2007); *"Stable Milling of Thin-Walled Parts with Variable Dynamics"*, Sixth International Conference on HIGH SPEED MACHINING.

[7]. Erhan Budak (1994); *"Mechanics and dynamics of milling thin walled structures"*, Department of mechanical Engineering the University of Bristish Colombia Vancouver Canada.

[8]. J.Bertil Wanner (2012); *" Strategies for reducing vibrations of thin – walled compornents,* Licentiate thesis, Stockholm, Sweden.

[9]. O. B. Adetoro, P. H. Wen , W. M. Sim, R. Vepa (2009); *"Stability Lobes Prediction in Thin Wall Machining"*, Proceeding of the world congress engineering 2009 Vol I WCE, UK, London.

[10]. M.Adithan (2007); *"Process planning and cost estimation"*, New age internation limited Publishers, New Delhi.

[11]. Zaghbani I. and Songmene V, 2009a, *"A force-temperature model including a constitutive law for Dry High Speed Milling of aluminium alloys, Materials Processing Technology"*

[12]. Jozef Peterka and Ivan Buransky (2010); *"Using ARAMIS for mesurement of deformation of thin-walled parts during milling"*, Slovak university of technology in Bratislava.

[13]. Raja Izamshah (2011); *"Hybrid deflection prediction for machining thin-walled titanium alloy aerospace compornent"*, thesis of Doctor of Philosophy, RMIT University.

[14]. Boeing Technology Phantom Works, 2008, High Performance Ti Machining, Advanced Manufacturing Reseached and Development.

[15]. G. Yang, 1980, Elastic and plastic mechanics, People Education Published, Inc, PRC.

# NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ TÍNH TOÁN NĂNG LƯỢNG TIÊU THỤ TRÊN CÁC MÁY GIA CÔNG CNC

*REVIEW ON THE ENERGY CONSUMPTION DETERMINING ON THE CNC MACHINING*

Tác giả: *Van Duong Dao*, Lại Anh Tuấn, Đỗ Tiến Lập, Dương Xuân Biên*

Đăng tại: Vol. 18, No. 8, 2020; Trang: 18-24

Tóm tắt bằng tiếng Việt:

Trong thời đại Công nghiệp 4.0 hiện nay, năng lượng đã trở thành yếu tố sống còn trong sản xuất công nghiệp của mọi quốc gia. Sự lên, xuống giá cả của nhiên liệu hóa thạch có thể đảo lộn mọi mặt của đời sống sản xuất và kinh tế. Tiết kiệm năng lượng, sử dụng hiệu quả năng lượng là giải pháp khả thi nhất và nằm trong khả năng của nền sản xuất. Để thực hiện điều này, cần thiết phải có mô hình tính toán chính xác về năng lượng tiêu thụ trong quá trình sản xuất. Bài báo này trình bày kết quả khảo sát các công trình nghiên cứu đã được công bố trong khoảng 10 năm trở lại đây về vấn đề mô hình hóa năng lượng tiêu hao trong quá trình gia công cắt gọt trên máy công cụ điều khiển kỹ thuật số (CNC). Kết quả của việc phân tích, đánh giá có thể dùng tham khảo, đề xuất các hướng nghiên cứu, các giải pháp đáp ứng yêu cầu cải thiện hiệu quả sử dụng và khả năng tiết kiệm năng lượng trong quá trình gia công.

Từ khóa: Năng lượng tiêu hao; máy CNC; mô hình hóa; gia công

Abstract:

- In the current Industry of 4.0 era, energy has become a vital factor in the industrial production of every nation. Saving energy and using energy efficiently are the most feasible solutions and are within the capabilities of production. In order to do this, it is necessary to have an accurate calculation model of energy consumed in the production process. This paper presents the results of a survey of research projects published in the last 10 years about modeling energy consumption during cutting operations on the Computer Numerical Control machine (CNC). The energy calculation models in general and the method of calculating each of these components, in particular, are considered. Besides, this study also focuses on used materials, research methods, types of machining, and machining strategies on CNC machines. The results of the analysis and evaluation can be consulted to propose research directions, solutions to meet the requirements of improving the efficiency of using energy during machining process.

Key words: Energy consumption; CNC machines; modeling; machining

Tài liệu tham khảo:

[1] Y. Zhang, D. Zhang, B. Wu, “An approach for machining allowance optimization of complex Parts with integrated structure”, Journal of Computational Design and Engineering, 2015, pp. 1-8.
[2] S. T. Newman, A. Nassehi. R. Imani-Asrai, V. Dhokia, “Energy Efficient process planning for CNC machining”, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 5, 2012, pp. 127-136.
[3] G. Kant, K. S. Shangwan, “Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining”, Journal of Cleaner Production, 2014, pp. 1-47.
[4] T. Gutowski, J. Dahmus, A. Thiriez, “Electrical energy requirements for manufacturing processes”, 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Leuven, 2006, pp. 1-5.
[5] Q. Yi, C. Li, Y. Tang, X. Chen, “Multi-objective parameter optimization of CNC machining for low carbon manufacturing”, Journal of Cleaner Production, xxx, 2015, pp. 1-9.
[6] A. Li, L. Li, Y. Tang, Y. Zhu, L. Li, “A comprehensive approach to parameters optimization of energy-aware CNC milling”, J Intell Manuf, 2016, pp. 1-16.
[7] X. Chen, C. Lia, Y. Tang, L. Li, Y. Du, L. Li, “Integrated optimization of cutting tool and cutting parameters in face milling for minimizing energy footprint and production time”, Energy, 175, 2019, pp. 1021-1037.
[8] Y. He, F. Liu, T. Wu, F-P. Zhong, B. Peng, “Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining”, Proc. IMechE Vol. 226 Part B: J. Engineering Manufacture, 2011, pp. 255-266.
[9] S. Kara, W. Li, “Unit process energy consumption models for material removal processes”, CRIP Annals – Manufacturing Technology, 60, 2011, pp. 37-40.
[10] M. Mori, M. Fujishima, Y. Inamasu, Y. Oda, “A study on energy efficiency improvement for machine tools”, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 60, 2011, pp. 145-148.
[11] Q. Wang, F. Liu, X. Wang, “Multi-objective optimization of machining parameters considering energy consumption”, Int J Adv Manuf Technol, 71, 2013, pp. 1133–1142.
[12] V. A. Balogun, P. T. Mativenga, “Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes”, Journal of Cleaner Production, 41, 2013, pp. 179-186.
[13] M. L. Calvanese, P. Albertelli, A. Matta, M. Taisch, “Analysis of Energy Consumption in CNC Machining Centers and Determination of Optimal Cutting Conditions”, 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 2013, pp. 227-232.
[14] C. Li, X. Chen, Y. Tang, L. Li, “Selection of optimum parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost”, Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-23.
[15] J. Lv, R. Tang, S. Jia, Y. Liu, “Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools”, Journal of Cleaner Production, 2016, pp. 1-11.

[16] J. Lv, R. Tang, W. Tang, S. Jia, Y. Liu, Y. Cao, “An investigation into methods for predicting material removal energy consumption in turning”, Journal of Cleaner Production, 2018, pp. 1-29.
[17] K. He, H. Hong, R. Tang, J. Wei, “Analysis of Multi-Objective Optimization of Machining Allowance Distribution and Parameters for Energy Saving Strategy”, Sustainability, 12, 2020, pp. 1-32.
[18] N. Diaz, E. Redelsheimer, D. Dornfeld, “Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use”, Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011, pp. 263-267.
[19] J. Li & Y. Lu & H. Zhao, P. Li, Y. Yao, “Optimization of cutting parameters for energy saving”, Int J Adv Manuf Technol, 70, 2013, pp. 117-124.
[20] A. Aramcharoen, P. T. Mativenga, “Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy”, Journal of Cleaner Production, 2014, pp. 1-35.
[21] S. Velchev, I. Kolev, K. Ivanov, S. Gechevski, “Empirical models for specific energy consumption and optimizing of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning”, Journal of Cleaner Production, 80, 2014, pp. 139-149.
[22] H. S. Yoon, J. Y. Lee, M. S. Kim, S. H. Ahn, “Empirical power-consumption model for material removal in three-axis milling”, Journal of Cleaner Production, xxx, 2014, pp. 1-9.
[23] F. Liu, J. Xie, S. Liu, “A method for predicting the energy consumption of the main driving system of a machine tool in a machining process”, Journal of Cleaner Production, xxx, 2014, pp. 1-7.
[24] Z. Zhang, R. Tanga, T. Penga, L. Taob, S. Jia, “A method for minimizing the energy consumption of machining system: integration of process planning and scheduling”, 2016, pp. 1-35.
[25] P. Albertelli, A. Keshari, A. Matta, “Energy oriented multi cutting parameter optimization in face milling”, Journal of Cleaner Production, xxx, 2016, pp. 1-17.
[26] K. He, R. Tang, Z. Zhang, W. Sun, “Energy Consumption Prediction System of Mechanical Processes Based on Empirical Models and Computer-Aided Manufacturing”, Journal of Computing and Information Science in Engineering, 16, 2016, p. 1-10.
[27] R. S. Altıntaş, M. Kahya, H. O. Unver, “Modelling and optimization of energy consumption for featurea based milling”, Int J Adv Manuf Technol, 2016, pp. 1-19.
[28] S. Borgia, P. Albertelli, G. Bianchi, “A simulation approach for predicting energy use during general milling operations”, Int J Adv Manuf Technol, 2016, pp. 1-15.
[29] W. Cai, F. Liu, X. N. Zhou, J. Xie, “Fine energy consumption allowance of workpieces in the mechanical manufacturing industry”, Energy, 114, 2016, pp. 623-633.
[30] A. Li, Q. Xiao, Y. Tang, L. Li, “A method integrating Taguchi, RSM and MOPSO to CNC machining parameters optimization for energy saving”, Journal of Cleaner Production, 135, 2016, pp. 263-275.
[31] F. Ma, H. Zhang, H. Cao, K. K. B. Hon, “An energy consumption optimization strategy for CNC milling”, Int J Adv Manuf Technol, 2016, pp. 1-12.
[32] T. Peng, X. Xu, “An interoperable energy consumption analysis system for CNC machining”, Journal of Cleaner Production, xxx, 2016, pp. 1-14.
[33] K. He, R. Tanga, M. Jin, “Pareto fronts of machining parameters for trade-off among energy consumption, cutting force and processing time”, Int. J. Production Economics, 185, 2017, pp. 113-127.
[34] L. Li, C. Li, Y. Tang, Q. Yi, “Influence Factors and Operational Strategies for Energy Efficiency Improvement of CNC Machining”, Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-30.
[35] H. Wang, R. Y. Zhong, G. Liu, W. Mu, X. Tian, D. Leng, “An optimization model for energy-efficient machining for sustainable production”, Journal of Cleaner Production, 232, 2019, pp. 1121-1133.
[36] F. Han, L. Li, W. Cai, C. Li, X. Deng, J. W. Sutherland, “Parameters optimization considering the trade-off between cutting power and MRR based on Linear Decreasing Particle Swarm Algorithm in milling”, Journal of Cleaner Production 262, 2020, pp. 1-10.
[37] T. Bherendt, A. Zein, S. Min, “Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools”, CIRP Annals - Manufacturing Technology, 61, 2012, pp. 43-46.
[38] U. Gotze, H. J. Koriah, A. Kolesnikov, R. Lindner, J. Paetzold, “Integrated methodology for the evaluation ofthe energy- and cost-effectiveness of machine tools”, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 5, 2012, pp. 151-163.
[39] Y. He, Y. Lia, T. Wu, J. W. Sutherland, “An energy-responsive optimization method for machine tool selection and operation sequence in flexible machining job shops”, Journal of Cleaner Production, 2014, pp. 1-10.
[40] C. G. Liu, J. Yang, J. Lian, W. J. Li, S. Evans, Y. Yin, “Sustainable performance-oriented operational decision-making of single-machine systems with deterministic product arrival time”, Journal of Cleaner Production, 85, 2014, pp. 318-330.
[41] J. Lv, R. Tang, W. Tang, Y. Liu, Y. Zhang, S. Jia, “An investigation into reducing the spindle acceleration energy consumption of machine tools”, Journal of Cleaner Production, 2016, pp. 1-10.
[42] J. Lv, R. Tang, W. Tang, Y. Liu, Y. Zhang, S. Jia, “An investigation into reducing the spindle acceleration energy consumption of machine tools”, Journal of Cleaner Production, xxx, 2016, pp. 1-10.
[43] Q. Yi, C. Li, Q. Ji, D. Zhu, Y. Jin, L. Li, “Design optimization of lathe spindle system for optimum energy efficiency”, Journal of Cleaner Production, 2019, pp. 1-26.
[44] Y. Oda, M. Mori, K. Ogawa, S. Nishida, M. Fujishima, T. Kawamura, “Study of optimal cutting condition for energy efficiency improvement in ball end milling with tool-workpiece inclination”, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 61, 2012, pp. 119-122.
[45] N. Liu, Y. F. Zhang, W. F. Lu, “A hybrid approach to energy consumption modelling based on cutting power: a milling

case", Journal of Cleaner Production, 104, 2015, pp. 264-272.
[46] M. P. Sealy, Z. Y. Liu, D. Zhang, Y. B. Guo, Z. Q. Liu, "Energy consumption and modeling in precision hard milling", Journal of Cleaner Production, xxx, 2015, pp. 1-11.
[47] R. Kumar, P. S. Bilga, S. Singh, "Multi objective optimization using different methods of assigning weights to energy consumption responses, surface roughness and material removal rate during rough turning operation", Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-26.
[48] H. Zhang, Z. Deng, Y. Fu, L. Wan, W. Liu, "Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on cutting specific energy consumption", Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-20.
[49] C. Shoba, D. S. Prasad, A. Sucharitaa, M. Abishek, M. S. Koundinya, "Investigation of Surface Roughness, Power Consumption, MRR and Tool wear while turning hybrid composites", Materials Today: Proceedings, 5, 2018, pp. 16565-16574.
[50] A. M. Khan, M. Jamil, K. Salonitis, S. Sarfraz, W. Zhao, N. He, M. Mia, G. Zhao, "Multi-Objective Optimization of Energy Consumption and Surface Quality in Nanofluid SQCL Assisted Face Milling", Energies, 2019, pp. 01-22.
[51] K. N. Shi, J. X. Ren, S. B. Wang, N. Liu, Z. M. Liu, D.H. Zhang, W. F. Lu, "An improved cutting power-based model for evaluating total energy consumption in general end milling process", Journal of Cleaner Production, 231, 2019, pp. 1330-1341.
[52] J. Zhao, J. Zhao, L. Li, Y. Wang, J. W. Sutherland, "Impact of surface machining complexity on energy consumption and efficiency in CNC milling", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, pp. 1-15.
[53] A. Balasubramanian, S. Venkatesan, "Optimization of process parameters using response surface methodology for the removal of phenol by emulsion liquid membrane", Polish Journal of Chemical Technology, 14, 1, 2012, pp. 46-49.
[54] O. I. Avram, P. Xirouchakis, "Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system", Journal of Cleaner Production, 19, 2011, pp. 699-711.
[55] K. Xu, M. Luo, K. Tang, "Machine based energy-saving tool path generation for five-axis end milling of freeform surfaces", Journal of Cleaner Production, 139, 2016, pp. 1207-1223.
[56] I. F. Edem, P. T. Mativenga, "Modelling of energy demand from computer numerical control (CNC) toolpaths", Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-39.
[57] W. Lee, S. H. Kim, J. Park, B. K. Min, "Simulation-based machining condition optimization for machine tool energy consumption reduction", Journal of Cleaner Production, 150, 2017, pp. 352-360
[58] L. Li, X. Deng, J. Zhao, F. Zhao, J. W. Sutherland, "Multi-objective optimization of tool path considering efficiency, energy-saving and carbon-emission for free-form surface milling", Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-21.
[59] S. J. Shin, J. Woo, S. Rachuri, "Energy efficiency of milling machining: Component modeling and online optimization of cutting parameters", Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-36.
[60] R. Schlosser, F. Klocke, D. Lung, "Sustainabilty in Manufacturing – Energy Consumption of Cutting Processes", Advances in Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 8th Global Conference 85 on Sustainable Manufacturing, 2011, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 85-89.
[61] C. Zhang, W. Li, P. Jiang, P. Gu, "Experimental investigation and multi-objective optimization approach for low-carbon milling operation of aluminum", J M ech anical Engineer ing Science, 2016, pp. 2753-2772.
[62] J. Yan, L. Li, "Multi-object Optimization of milling parameters – the trade-offs between energy, production rate and cutting quality", Journal of Cleaner Production, xxx, 2013, pp. 1-10.
[63] T. Peng, X. Xu, "Energy-efficient machining systems: A critical review", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, pp. 1-30.
[64] I. Hanafi, A. Khamlichi, F. M. Cabrera, E. Almansa, A. Jabbouri, "Optimizing of cutting conditions for sustainable machining of PEEK-CF30 using TiN tools", Journal of Cleaner Production, 33, 2012, pp. 01-09.

# NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ TÍNH TOÁN NĂNG LƯỢNG TIÊU THỤ TRÊN CÁC MÁY GIA CÔNG CNC

## REVIEW ON THE ENERGY CONSUMPTION DETERMINING ON THE CNC MACHINING

***Đào Văn Dưỡng[1], Lại Anh Tuấn[2], Đỗ Tiến Lập[2], Dương Xuân Biên[2]***

[1]*Khoa Cơ khí chế tạo, Trường Cao đẳng Kỹ thuật Đồng Nai; duongdao.dao@gmail.com*

[2]*Học viện Kỹ thuật Quân sự*

**Tóm tắt -** Trong thời đại Công nghiệp 4.0 hiện nay, năng lượng đã trở thành yếu tố sống còn trong sản xuất công nghiệp của mọi quốc gia. Tiết kiệm năng lượng, sử dụng hiệu quả năng lượng là giải pháp khả thi nhất và nằm trong khả năng của nền sản xuất. Để thực hiện điều này, cần thiết phải xây dựng mô hình tính toán về năng lượng tiêu thụ trong quá trình sản xuất. Bài báo này trình bày kết quả khảo sát các công trình nghiên cứu đã được công bố trong khoảng 10 năm trở lại đây về vấn đề mô hình tính toán năng lượng tiêu thụ trong quá trình gia công cắt gọt trên máy công cụ điều khiển kỹ thuật số (Computer Numerical Control machine - CNC). Các mô hình tính năng lượng nói chung và phương pháp tính từng thành phần nói riêng được xem xét. Đồng thời, nghiên cứu này khảo sát về các vật liệu thường được sử dụng, phương pháp nghiên cứu, loại hình gia và các chiến lược gia công trên máy CNC. Kết quả của việc phân tích, đánh giá có thể dùng tham khảo, đề xuất các hướng nghiên cứu nhằm đáp ứng yêu cầu cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng trong quá trình gia công.

**Từ khóa** - Năng lượng tiêu thụ; máy CNC; mô hình hóa; gia công.

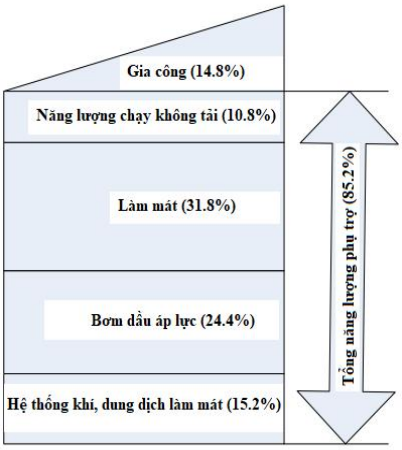
**Abstract -** In the current Industry 4.0 era, energy has become a vital factor in the industrial production of every nation. Saving energy and using energy efficiently are the most feasible solutions and are within the capabilities of the production base. In order to do this, it is necessary to have an accurate calculation model of energy consumed in the production process. This paper presents the results of a survey of research projects published in the last 10 years about modeling energy consumption during cutting operations on the Computer Numerical Control machine (CNC). The energy calculation models in general and the method of calculating each of these components, in particular, are considered. Besides, this study also focuses on used materials, research methods, types of machining, and machining strategies on CNC machines. The results of the analysis and evaluation can be consulted to propose research directions, solutions to meet the requirements of improving the efficiency of using energy during processing.

**Keywords -** Energy consumption; CNC machines; modeling; machining

## 1. Đặt vấn đề

Trong bối cảnh chung của toàn thế giới, công nghiệp sản xuất luôn giữ vị trí cốt lõi trong mọi hoạt động của đời sống loài người. Các nhà nghiên cứu đánh giá rằng, các quy trình công nghệ trong sản xuất tiêu thụ đến 90% mức năng lượng được tiêu thụ trong lĩnh vực công nghiệp [1]. Việc gia tăng sử dụng năng lượng trong sản xuất đồng nghĩa với gia tăng lượng khí thải vào môi trường sống. Chính vì vậy, các nhà công nghệ cần chịu trách nhiệm về việc cải thiện mức tiêu thụ năng lượng thông qua xây dựng quy trình công nghệ hợp lý, sử dụng hiệu quả năng lượng khi gia công. Mức tiết kiệm nhiên liệu có thể tăng từ 6% đến 40% dựa trên việc lựa chọn tối ưu các thông số công nghệ và các hoạt động phụ trợ khác [2], [3]. Trọng tâm của việc giảm năng lượng tiêu thụ nằm ở chỗ thay đổi các thông số công nghệ và chọn chiến lược gia công phù hợp trong các giai đoạn gia công khác nhau. Gia công thô cần cân bằng giữa sử dụng năng lượng và hiệu suất gia công. Gia công tinh cần quan tâm đến sự cân bằng giữa năng lượng và chất lượng của sản phẩm.

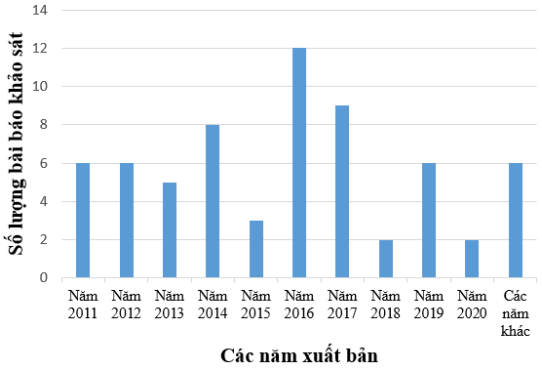
Ngày nay, gia công trên máy CNC đã trở thành một trong những hoạt động cốt lõi của sản xuất chế tạo và chiếm phần đáng kể trong tổng năng lượng tiêu thụ. Điều đáng ngạc nhiên là hiệu quả sử dụng năng lượng của gia công trên máy CNC khá thấp. Nghiên cứu của Gutowski [4] cho thấy, trong dây chuyền gia công ô tô, chỉ có 14.8% tổng mức tiêu thụ năng lượng của máy CNC được sử dụng trong thực tế (hình 1). Điều này dẫn đến cần có những nghiên cứu cụ thể tính chất tiêu thụ năng lượng khi gia công trên máy CNC, để từ đó có cơ sở đề xuất giải pháp nâng cao hiệu quả sử dụng năng lượng và phương án tiết kiệm năng lượng.




*Hình 1. Tỉ lệ năng lượng sử dụng trên dây chuyền sản xuất ô tô [4]*

Bài báo này trình bày kết quả khảo sát một số công trình nghiên cứu đã được công bố trong khoảng gần 10 năm trở lại đây (từ 2011 đến 2020) về vấn đề năng lượng tiêu thụ khi gia công cắt gọt trên máy CNC. Số lượng công trình nghiên cứu về năng lượng tiêu thụ khi gia công trên máy CNC được công bố là rất lớn nên trong khuôn khổ bài báo này, nhóm tác giả chỉ tham khảo hạn chế các công trình điển hình theo các nguồn tài liệu tại Web of Science, ScienceDirect và Scopus. Về phương pháp, một số lượng nhất định các công trình điển hình được thu thập liên quan đến vấn đề mô hình hóa năng lượng tiêu thụ trong gia công

trên máy CNC, sàng lọc mức độ giống nhau hoặc tương đồng, sau đó chọn các công trình tiêu biểu để phân tích và đánh giá trên các mặt về mô hình tính toán, phương pháp nghiên cứu, vật liệu sử dụng, loại hình và chiến lược gia công. Để đơn giản trong quá trình trích dẫn các công trình, bài báo này chỉ đề cập đến tên tác giả đầu tiên và số thứ tự bài viết trong danh mục Tài liệu tham khảo. Hình 2 mô tả số lượng các công trình nghiên cứu tiêu biểu về tính toán năng lượng tiêu thụ khi gia công trên máy CNC được xuất bản trong các năm.




*Hình 2. Thống kê số lượng các công trình được khảo sát theo năm xuất bản*

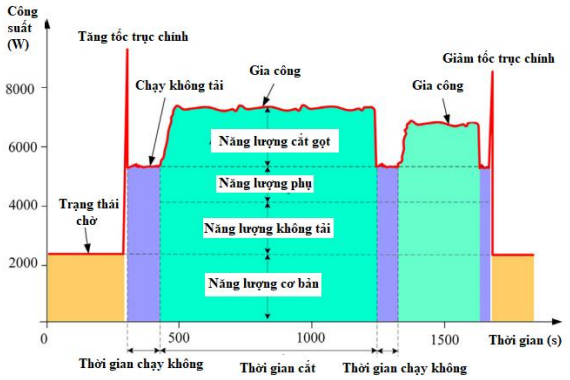
## 2. Nội dung nghiên cứu khảo sát

### *2.1. Khảo sát mô hình tính toán năng lượng tiêu thụ*

Qua khảo sát các công trình nghiên cứu đã công bố, có thể chia bài toán về năng lượng gia công theo ba hướng cơ bản. Thứ nhất, các công trình tập trung vào mô hình hóa về mặt lý thuyết nhu cầu sử dụng năng lượng khi gia công trên máy CNC. Hướng thứ hai bao gồm các công trình nghiên cứu theo hướng tính toán hiệu quả năng lượng sử dụng. Hướng cuối cùng bao gồm các nghiên cứu nhằm cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng dựa trên các mô hình đã được xây dựng theo hướng thứ nhất hoặc thứ hai. Có thể nói rằng, các công trình giải bài toán tối ưu với hàm mục tiêu về giảm năng lượng tiêu thụ thuộc hướng nghiên cứu thứ ba. Tuy nhiên, như đã trình bày ở trên, bài báo này chỉ tập trung vào các công trình nghiên cứu về mô hình hóa năng lượng tiêu thụ khi gia công trên máy CNC.

Theo đó, mô hình tính toán năng lương tiêu tốn lý thuyết được xây dựng trên cơ sở phân chia các giai đoạn hoạt động của máy CNC thành các phần: khởi động máy (khởi động máy, mạch điện, hệ điều khiển, màn hình, …), trạng thái chờ (thiết lập chương trình, hệ thống làm mát, hệ thống khí, ánh sáng, hệ thống tải phoi …), tăng/giảm tốc độ (thiết lập thông số tốc độ cắt, các thông số khác), chuyển động chạy không có mang dụng cụ cắt đến vị trí gia công, trạng thái cắt gọt vật liệu. Hình 3 ([5-7]) mô tả cơ bản các giai đoạn này. Mỗi giai đoạn đều có sự tiêu thụ năng lượng nhất định.

Tính toán năng lượng theo mô hình này thì có rất nhiều công trình công bố như [5-36]. Một số công trình điển hình có thể xem xét dưới đây.




*Hình 3. Năng lượng tiêu thụ trong các giai đoạn gia công trên máy CNC [7]*

Mori [10] đề xuất mô hình tính năng lượng cần thiết trong quá trình gia công CNC như phương trình (1):

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 \quad (1)$$

Trong đó, $E_1$ là năng lượng cơ bản, $E_2$ là năng lượng chạy không tải và $E_3$ là năng lượng cắt gọt. Ảnh hưởng của tốc độ trục chính và tốc độ chạy dao các trục chưa được xem xét đầy đủ.

Diaz [18] đề xuất như phương trình (2):

$$E = E_{cut} + E_{\text{air}} \quad (2)$$

Trong đó, $E$ là năng lượng cần thiết trực tiếp, $E_{cut}$ là năng lượng cắt và $E_{\text{air}}$ là năng lượng khi không cắt. Dễ thấy, mô hình tính toán năng lượng chưa rõ ràng, năng lượng tiêu thụ của từng thành phần chưa được xem xét tỉ mỉ.

He [8] đề xuất mô hình tính như phương trình (3):

$$E_{Total} = E_{Spindle} + E_{\text{feed}} + E_{tool} + E_{cool} + E_{fix} \quad (3)$$

Trong đó, $E_{Total}$ là tổng năng lượng cần thiết. $E_{Spindle}$ là năng lượng quay trục chính gồm năng lượng tăng, giảm tốc trục chính và năng lượng cắt. $E_{\text{feed}}, E_{tool}, E_{cool}$ lần lượt là năng lượng cho động cơ di chuyển các trục, thay dao, làm mát và năng lượng cố định $E_{fix}$. Tác giả cũng phân tích mối quan hệ giữa năng lượng tiêu thụ với các mã điều khiển và gia công trong chương trình NC. Xây dựng được quy trình ước tính mức năng lượng sẽ tiêu tốn. Kết quả được kiểm chứng cho thấy có độ tin cậy và hiệu quả của phương pháp.

Calvanese [13] đề xuất mô hình tính năng lượng như biểu thức (4):

$$E = E_{fixed} + E_{axes} + E_{axis-chillers} + E_{spindle} + E_{Spindle-chiller} + +E_{Chip-conveyor} + E_{tool-changer} + E_{pallet-clamp} \quad (4)$$

Trong công trình này, ngoài năng lượng cố định $E_{fixed}$,

năng lượng trục chính $E_{spindle}$, năng lượng các trục $E_{axes}$, năng lượng thay dao $E_{tool-changer}$ thì có thêm năng lượng làm lạnh các trục $E_{axis-chillers}, E_{Spindle-chiller}$, năng lượng tải phoi $E_{Chip-conveyor}$ và năng lượng gá kẹp $E_{pallet-clamp}$. Tuy nhiên, công trình chưa đề cập đến năng lượng tiêu thụ khi làm mát trong quá trình gia công.

Qua khảo sát các công trình mô hình hóa về năng lượng tiêu thụ khi gia công trên máy CNC, mô hình tổng quát có thể được xem xét qua mô hình của Li [30]. Năng lượng tiêu thụ tổng thể của cả quá trình được mô tả như phương trình (5):

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 \quad (5)$$

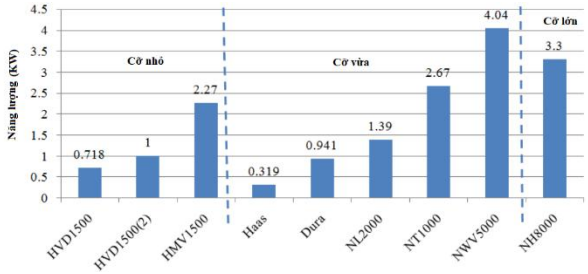
Trong đó, $E_1$ là năng lượng khởi động máy và các thiết bị phụ trợ. $E_2$ là năng lượng tiêu thụ trong trạng thái chờ. $E_3$ là năng lượng tiêu thụ khi khởi động, tăng, giảm tốc độ trục chính. $E_4$ là năng lượng tiêu thụ khi các trục máy chuyển động không tải và $E_5$ là năng lượng tiêu thụ khi cắt gọt (có tải).

Theo đó, mô hình tính toán (5) thể hiện đầy đủ nhất các thành phần tiêu thụ năng lượng khi gia công trên máy CNC.

### *2.1.1. Tính toán năng lượng tiêu thụ khi khởi động và trạng thái chờ gia công*

Về cơ bản, có thể gộp phần năng lượng khởi động và năng lượng ở trạng thái chờ thành phần năng lượng cơ bản của máy và có thể đo đạc được [17]. Mức năng lượng tiêu thụ khác nhau với các máy công cụ khác nhau [13], [33], [37].

Behrendt [37] nghiên cứu năng lượng tiêu thụ ở trạng thái chờ của 9 máy công cụ với ba nhóm kích cỡ máy khác nhau (hình 4).




*Hình 4. Mức tiêu thụ năng lượng ở trạng thái chờ [37]*

Trong nghiên cứu của Balogun [12], năng lượng tiêu thụ của hệ thống làm mát được đề cập. Gotze [38] cũng đưa ra biểu đồ tiêu thụ năng lượng của hệ thống thiết bị phụ trợ trên máy CNC. He [39] và Liu [40] đề xuất phương án tiết kiệm năng lượng bằng cách điều khiển các thiết bị sản xuất ở chế độ chờ trong thời gian không sản xuất một cách hiệu quả. Có thể coi năng lượng tiêu thụ ở trạng thái chờ phụ thuộc vào đặc tính cụ thể của từng máy. Điều này có nghĩa là nó phụ thuộc chủ yếu vào việc thiết kế kết cấu máy công cụ. Hơn nữa, việc chọn lựa sử dụng máy và điều khiển các thiết bị phụ trong các quy trình cụ thể cũng là giải pháp để thay đổi sự tiêu hao năng lượng.

### *2.1.2. Tính năng lượng gia tốc trục chính và năng lượng chạy không tải*

Xác định năng lượng tiêu thụ cho trục chính quay, tăng hoặc giảm tốc có thể chia làm ba giai đoạn [17], [26], [27], [41] như biểu thức (6):

$$P_r = \begin{cases} C_{rA1}n + C_{rA2} (n < n_M^{BA}) \\ C_{rB1}n + C_{rB2} (n_M^{BA} < n < n_M^1) \\ C_{rC1}n + C_{rC2} (n > n_M^{BA}) \end{cases} \quad (6)$$

Trong đó, $C_{rA1}, C_{rA2}, C_{rB1}, C_{rB2}, C_{rC1}, C_{rC2}$ là các hệ số tương ứng cho các giai đoạn và $n_M^{BA}, n_M^1$ là tốc độ trục chính ở hai thời điểm thay đổi tốc độ.

Phần năng lượng dành cho quay động cơ trục chính có thể xấp xỉ bởi hàm bậc 2 đối với tốc độ quay trục chính [6] như biểu thức (7):

$$P_{spindle} = P_{inventor} + P_{s_motor} + a_1 n + a_2 n^2 \quad (7)$$

Trong đó, $P_{inventor}, P_{s_motor}$ là năng lượng chuyển đổi và năng lượng của động cơ trục chính, $n$ là tốc độ trục chính.

Lv [42] và Yi [43] cũng giải quyết vấn đề này khi nghiên cứu về nhu cầu năng lượng khi thay đổi gia tốc trục chính.

Năng lượng tiêu thụ do chuyển động của các trục là năng lượng là đưa vào các động cơ các trục đảm bảo chuyển động theo tốc độ chạy dao cho trước. Theo Li [6], năng lượng chuyển động chạy dao không tải của trục thứ $i$ có dạng là hàm bậc 2 phụ thuộc vào tốc độ trục chính $n$ và tốc độ chạy dao răng $f_z$ với $z$ là số răng cắt như biểu thức (8):

$$P_{feed}^i = P_{drive}^i + P_{f_motor}^i + b_1 n z f_z + b_2 (n z f_z)^2 \quad (8)$$

Trong đó, $P_{drive}^i, P_{f_motor}^i$ là năng lượng tiêu thụ cơ bản của hệ điều khiển động cơ và năng lượng động cơ truyền động. Lv [16] và He [17], [33] cũng áp dụng công thức tương tự như công thức (8).

Dễ dàng thấy, phần năng lượng không tải phụ thuộc chủ yếu vào cấu trúc máy, lựa chọn máy và các thông số công nghệ. Do vậy, để tăng hiệu quả sử dụng năng lượng tiêu thụ cho phần năng lượng này thì giải pháp chính là chọn lựa quy trình gia công hiệu quả và tối ưu hóa chế độ công nghệ.

### *2.1.3. Tính năng lượng cắt gọt*

Năng lượng cắt gọt $P_c$ được sử dụng trong thực nghiệm [17], [36], [42], [61-63] có dạng như (9):

$$P_c = C_c v_c f_v a_p \quad (9)$$

Trong đó, $C_c$ là hệ số ảnh hưởng, $v_c, f_v, a_p$ lần lượt là vận tốc cắt, tốc độ chạy dao và chiều sâu cắt. Trong khi đó,

năng lượng cắt gọt $P_c$ theo [6], [22] được tính như (10):

$$P_c = P_{au} + P_u + P_{removel} + P_{ad} \quad (10)$$

Trong đó, $P_{au}, P_u$ là các năng lượng chạy không tải nhưng theo tốc độ chạy dao dùng cho quá trình cắt gọt được lập trình trong chương trình NC [2], [22]. Năng lượng hớt vật liệu $P_{removal}$ theo [4] và [6] được tính theo biểu thức (11) với $k_c$ là hệ số ảnh hưởng và $MRR$ tốc độ hớt vật liệu (Material Removal Rate - MRR):

$$P_{removal} = k_c MRR \quad (11)$$

Một số nghiên cứu cũng đề cập đến vấn đề liên quan. Newman [2] và Oda [44] nghiên cứu về năng lượng gia công thông qua thực nghiệm. Li [19] tối ưu hóa thông số công nghệ nhằm giảm năng lượng tiêu thụ khi phay thô và tinh. Balogun [12] và Calvanese [13] phân tích các thành phần năng lượng trong quá trình gia công. Velchev [21] giải quyết vấn đề giảm năng lượng tiêu thụ dựa trên bài toán tối ưu chế độ cắt khi tiện. Yoon [22] tính toán năng lượng cắt gọt và hiệu quả sử dụng năng lượng cắt gọt khi phay trên máy CNC ba trục. Liu [45] cũng đề cập đến mối quan hệ này trong trường hợp gia công phay. Sealy [46] quan tâm đến năng lượng cắt gọt khi gia công phay hợp kim cứng. Lv [42] nghiên cứu kết hợp các phương pháp tối ưu cho bài toán năng lượng. Kumar [47] tối ưu năng lượng bóc tách vật liệu sử dụng phương pháp trọng số. Zhang [48] đề cập đến mối quan hệ giữa năng lượng bóc tách vật liệu và năng lượng cắt về mặt lý thuyết trong quá trình gia công khi giải bài toán tối ưu hiệu quả năng lượng sử dụng thực tế (Specific Energy Consumption – SEC). Shoba [49] đánh giá chất lượng bề mặt và mòn dao. Khan [50] nghiên cứu tối ưu năng lượng quá trình phay mặt, Chen [7] tập trung vào tối ưu thời gian sản xuất. Trong khi đó, Shi [51] nghiên cứu phát triển mô hình tính toán năng lượng gia công phay bằng thực nghiệm, Yi [43] tối ưu hóa năng lượng cho trục chính máy tiện và Zhao [52] gia công bề mặt cong phức tạp.

Thực tế cho thấy, đường chạy dao khi thiết kế gia công cũng ảnh hưởng đến năng lượng cắt gọt nói chung và năng lượng bóc tách vật liệu nói riêng. Có thể xem xét vấn đề này trong He [64] khi phân tích mối quan hệ giữa các thành phần năng lượng tiêu thụ với các mã lệnh NC, Avram [54] khi nghiên cứu về chiến lược chạy dao 2.5D. Altitas [27] cũng phân tích các chiến lược chạy dao khi xem xét đến năng lượng gia công. Borgia [28] đề cập đến vấn đề dự đoán năng lượng tiêu thụ khi tiếp cận theo phương pháp mô phỏng quá trình gia công ở dạng tổng quát. Ma [31] tối ưu hóa năng lượng gia công dựa trên các chiến lược gia công phay. Xu [55] áp dụng theo hướng này khi nghiên cứu gia công bề mặt cong trên máy CNC 5 trục. Edem [56] nghiên cứu về các mã lệnh NC cho đường chạy dao trong gia công CNC. Lee [57] xây dựng mô hình Digital Twins nhằm tối ưu chương trình lập trình với mục tiêu giảm năng lượng gia công. Li [58] nghiên cứu tối ưu đường chạy dao nhằm giảm năng lượng tiêu thụ khi gia công phay các bề mặt cong tự do và Shin [59] xử lý chương trình mã NC trong lập trình gia công khi nghiên cứu tối ưu năng lượng ở thời gian thực. Wang [35] và Han [36] tối ưu năng lượng dựa trên lựa chọn tiêu chuẩn chuyển đổi dữ liệu gia công STEP_NC.

Qua kết quả của các công trình nghiên cứu được khảo sát có thể thấy, năng lượng tiêu thụ trong khi cắt gọt trên máy CNC phụ thuộc chủ yếu vào việc chọn kết cấu máy gia công (máy phay, máy tiện, số lượng trục gia công, loại truyền động, công suất các loại động cơ, …), chế độ cắt và chiến lược chạy dao. Điều này cũng gợi mở về các giải pháp tối ưu hóa năng lượng cắt gọt.

### *2.2. Khảo sát phương pháp nghiên cứu, vật liệu sử dụng, loại hình và chiến lược gia công*

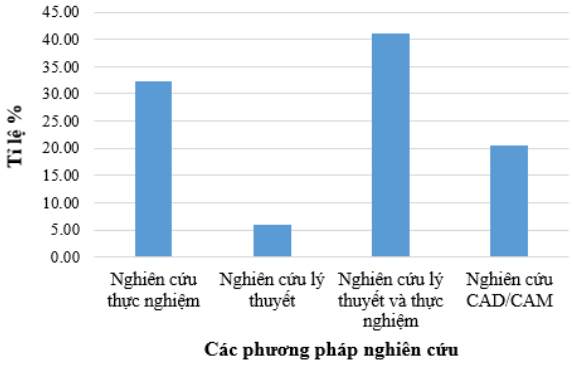
#### *2.2.1. Phương pháp nghiên cứu*

Các công trình được khảo sát đã sử dụng một số phương pháp nghiên cứu (PPNC) có bản để xác định năng lượng tiêu thụ trong quá trình gia công trên máy CNC. Đó là các phương pháp như: nghiên cứu lý thuyết (NCLT), nghiên cứu thực nghiệm (NCTN), nghiên cứu kết hợp lý thuyết và thực nghiệm kiểm chứng (NCLT và TN), nghiên cứu từ chương trình NC được lập trình bằng tay (manual) hoặc ứng dụng công nghệ CAD/CAM. Bảng 1 thống kê các công trình khảo sát đã sử dụng các phương pháp nêu trên.

**Bảng 1**. *Các phương pháp nghiên cứu được sử dụng*

| PPNC | Các công trình được khảo sát |
|---|---|
| NC lý thuyết | [3], [8], [12], [38] |
| NC thực nghiệm | [2], [3], [9], [10], [15], [16], [19], [27], [31], [32], [44-47], [50-53], [60-62], [64] |
| NC lý thuyết và TN | [5-7], [11], [13], [17], [19], [21-23], [26], [28-30], [33], [36], [37], [39-43], [49], [55-59] |
| NC từ CAD/CAM | [8], [14], [27], [28], [31], [32], [35], [36], [54-59] |

Một số công trình kết hợp nghiên cứu lý thuyết với thực nghiệm, ứng dụng công nghệ CAD/CAM để đánh giá phân tích năng lượng tiêu thụ dựa trên các chiến lược chạy dao khác nhau như [28], [36], [55-59].




*Hình 5. Tỉ lệ các phương pháp nghiên cứu được sử dụng*

Hình 5 thể hiện tỉ lệ phần trăm các phương pháp nghiên cứu được sử dụng. Qua đó cho thấy, phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với thực nghiệm kiểm chứng được sử dụng nhiều nhất. Điều này hoàn toàn phù hợp với thực tiễn nghiên cứu ở các lĩnh vực khoa học khác nhau.

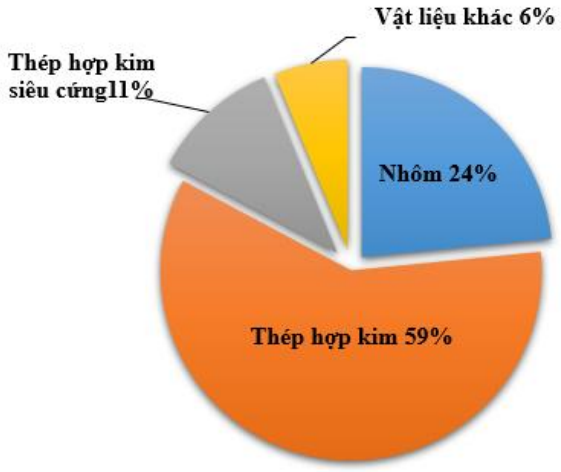
### *2.2.2. Vật liệu gia công*

Bảng 2 mô tả các loại vật liệu chủ yếu được sử dụng trong các công trình nghiên cứu. Trên thực tế, hầu hết các vật liệu này rất thông dụng trong gia công cắt gọt và ở miền độ cứng thấp và trung bình (HRC<35).

**Bảng 2**. *Các loại vật liệu được sử dụng*

| Vật liệu | Các công trình được khảo sát |
|---|---|
| Hợp kim nhôm | [2], [3], [16], [18], [19], [27], [32], [41], [52-55], [57], [58], [61] |
| Thép hợp kim | [3], [5-12], [14], [16-18], [20-23], [26-31], [33-37], [39], [40], [42], [44], [45], [47], [49], [56], [59], [60], [62] |
| Hợp kim siêu cứng | [3], [15], [16], [43], [46], [51], [52] |
| Vật liệu khác (composit, phi kim) | [9], [18], [50], [64] |

Hình 6 cho thấy, vật liệu thép hợp kim ở miền độ cứng trung bình (HRC<40) được sử dụng nhiều nhất (59%), sau đó là hợp kim nhôm (24%). Vật liệu hợp kim siêu cứng (HRC>50) được sử dụng ở một số công trình với 11%, còn lại một số ít là vật liệu composit hoặc vật liệu phi kim.




*Hình 6. Các loại vật liệu được sử dụng*

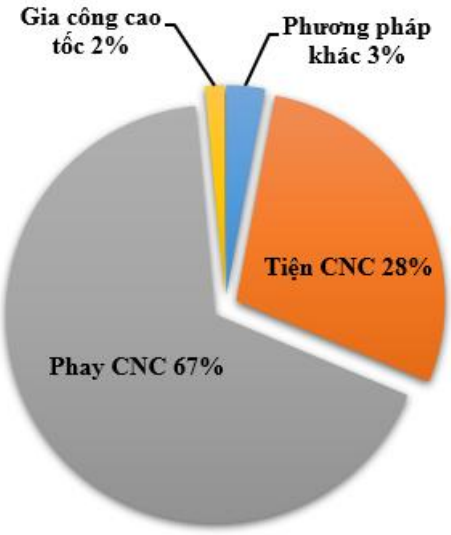
### *2.2.3. Loại hình gia công và chiến lược gia công*

Khi nghiên cứu, tính toán năng lượng tiêu thụ trên máy CNC, các loại hình gia công chủ yếu được xem xét là tiện CNC, phay CNC. Một số ít công trình có đề cập đến công nghệ gia công cao tốc và phương pháp khác như gia công khoan. Cụ thể về các công trình khảo sát được trình bày trong bảng 3.

**Bảng 3**. *Các loại hình gia công được áp dụng*

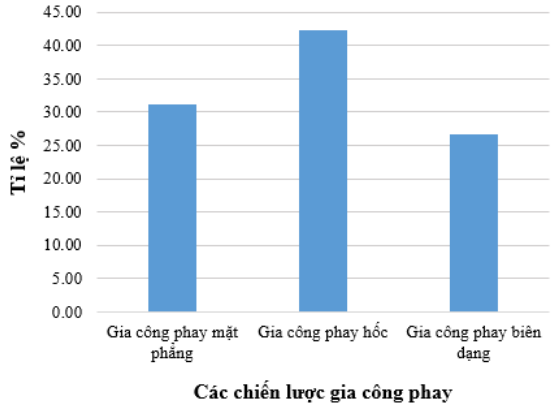
| Loại hình gia công | Các công trình được khảo sát |
|---|---|
| Tiện CNC | [3], [5], [8], [9], [11], [12], [15-17], [21], [33], [37], [39-42], [47], [50], [64] |
| Phay CNC | [2], [6-10], [12-15], [17-20], [22], [23], [26-37], [40], [43-46], [48], [49], [51-59], [61], [62] |
| Gia công cao tốc | [30] |
| Loại hình khác | [10], [60] |

Một số công trình nghiên cứu cả hai loại hình gia công tiện và phay CNC như [8], [9], [12], [15], [17], [33], [37], [40]. Hình 7 biểu diễn tỉ lệ sử dụng các loại hình gia công khác nhau trên máy CNC khi nghiên cứu về năng lượng tiêu thụ. Theo đó, phương pháp phay CNC được quan tâm nhiều nhất do đây là phương pháp chiếm tỉ trọng lớn trong ngành chế tạo cơ khí (chiếm 67%), tiện CNC chiếm 28%. Phương pháp gia công cao tốc chiếm tỉ lệ được quan tâm khá nhỏ (2%) do yêu cầu rất cao về hệ thống công nghệ. Các phương pháp gia công khác như khoan CNC được đề cập cũng rất ít (3%).




*Hình 7. Tỉ lệ sử dụng các loại hình gia công*

Trong loại hình gia công phay CNC, hệ máy phay được chọn hầu hết là máy phay 3 trục, chỉ có rất ít công trình đề cập đến các loại máy phay 4-5 trục như [55]. Chiến lược gia công được quan tâm nhiều là gia công phay hốc (chiếm hơn 42%), tiếp theo là gia công mặt phẳng (hơn 31%), còn lại là gia công biên dạng (hình 8). Việc lựa chọn chiến lược gia công chủ yếu phụ thuộc vào mục tiêu hướng đến của các công trình nghiên cứu, giảm thời gian đo đạc lấy dữ liệu. Tuy nhiên, về mặt kết cấu cơ khí, hầu hết các chi tiết đều có sự kết hợp của các loại bề mặt khác nhau như mặt phẳng, mặt bậc và mặt cong.




*Hình 8. Các chiến lược gia công phay được áp dụng*

## 3. Kết luận

Như mục tiêu đã đặt ra ở trên, bài báo đã khảo sát một số công trình nghiên cứu điển hình về tính toán năng lượng tiêu thụ khi gia công cắt gọt trên máy CNC trong khoảng 10 năm trở lại đây. Hầu hết các công trình được đề cập hoặc là gia công trên máy phay CNC 3 trục hoặc máy tiện CNC, một số gia công khoan CNC và gia công trên máy CNC 5 trục. Vật liệu sử dụng trong các thực nghiệm chủ yếu là thép hợp kim các loại (AISI, SKD, C45), một số hợp kim có độ cứng cao, hợp kim nhôm và vật liệu composit. Các phương pháp nghiên cứu được sử dụng chủ yếu là lý thuyết kết hợp với thực nghiệm kiểm chứng. Về cơ bản, chúng ta có thể kết luận một số vấn đề chính như sau:

Một là, năng lượng tiêu thụ trong quá trình gia công gồm các thành phần cơ bản: năng lượng tiêu thụ khi khởi động, chờ gia công; năng lượng chạy cắt không tải và năng lượng gia công cắt gọt có tải. Mỗi thành phần cơ bản này bao gồm nhiều thành phần nhỏ và được nghiên cứu cụ thể trong các công trình khác nhau. Tuy nhiên, mô hình tính toán năng lương theo (5) là đầy đủ và chi tiết nhất.

Hai là, thành phần năng lượng tiêu thụ ở giai đoạn khởi động và trạng thái chờ phụ thuộc vào đặc tính từng máy gia công cụ thể. Như vậy, yếu tố ảnh hưởng nhiều nhất là việc thiết kế, lựa chọn máy gia công, kỹ thuật điều khiển các thiết bị phụ trong các quy trình gia công.

Ba là, năng lượng tiêu thụ khi chạy cắt nhưng chưa có tải phụ thuộc vào kết cấu máy, các thông số công nghệ và chiến lược chạy dao.

Bốn là, năng lượng tiêu thụ khi cắt gọt có thành phần quan trọng nhất là năng lượng tách bóc vật liệu gia công và thay đổi liên tục. Năng lượng tiêu thụ này phụ thuộc chủ yếu vào chế độ công nghệ, chiến lược chạy dao và quy trình công nghệ.

Năm là, vấn đề năng lượng tiêu thụ khi gia công cắt gọt vật liệu có độ cứng cao (HRC>50) vẫn còn ít công bố. Đặc biệt, năng lượng tiêu thụ trong gia công cao tốc nói chung và gia công cao tốc vật liệu có độ cứng cao vẫn còn chưa được đề cập cụ thể và cần được quan tâm nghiên cứu.

Các kết luận trên đây có ý nghĩa khái quát vấn đề nghiên cứu về mô hình tính toán, các thành phần cấu thành năng lượng tiêu thụ tổng thể và những yếu tố ảnh hưởng đến chúng. Đây là cơ sở để đề ra giải pháp cải thiện, tối ưu hóa và sử dụng hiệu quả năng lượng trong quá trình gia công cắt gọt trên máy CNC.

## Tài liệu tham khảo

[1] Y. Zhang, D. Zhang, B. Wu, “An approach for machining allowance optimization of complex Parts with integrated structure”, Journal of Computational Design and Engineering, 2015, pp. 1-8.

[2] S. T. Newman, A. Nassehi. R. Imani-Asrai, V. Dhokia, “Energy Efficient process planning for CNC machining”, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 5, 2012, pp. 127-136.

[3] G. Kant, K. S. Shangwan, “Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining”, Journal of Cleaner Production, 2014, pp. 1-47.

[4] T. Gutowski, J. Dahmus, A. Thiriez, “Electrical energy requirements for manufacturing processes”, 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Leuven, 2006, pp. 1-5.

[5] Q. Yi, C. Li, Y. Tang, X. Chen, “Multi-objective parameter optimization of CNC machining for low carbon manufacturing”, Journal of Cleaner Production, xxx, 2015, pp. 1-9.

[6] A. Li, L. Li, Y. Tang, Y. Zhu, L. Li, “A comprehensive approach to parameters optimization of energy-aware CNC milling”, J Intell Manuf, 2016, pp. 1-16.

[7] X. Chen, C. Lia, Y. Tang, L. Li, Y. Du, L. Li, “Integrated optimization of cutting tool and cutting parameters in face milling for minimizing energy footprint and production time”, Energy, 175, 2019, pp. 1021-1037.

[8] Y. He, F. Liu, T. Wu, F-P. Zhong, B. Peng, “Analysis and estimation of energy consumption for numerical control machining”, Proc. IMechE Vol. 226 Part B: J. Engineering Manufacture, 2011, pp. 255-266.

[9] S. Kara, W. Li, “Unit process energy consumption models for material removal processes”, CRIP Annals – Manufacturing Technology, 60, 2011, pp. 37-40.

[10] M. Mori, M. Fujishima, Y. Inamasu, Y. Oda, “A study on energy efficiency improvement for machine tools”, CIRP Annals – Manufacturing Technology, 60, 2011, pp. 145-148.

[11] Q. Wang, F. Liu, X. Wang, “Multi-objective optimization of machining parameters considering energy consumption”, Int J Adv Manuf Technol, 71, 2013, pp. 1133–1142.

[12] V. A. Balogun, P. T. Mativenga, “Modelling of direct energy requirements in mechanical machining processes”, Journal of Cleaner Production, 41, 2013, pp. 179-186.

[13] M. L. Calvanese, P. Albertelli, A. Matta, M. Taisch, “Analysis of Energy Consumption in CNC Machining Centers and Determination of Optimal Cutting Conditions”, 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 2013, pp. 227-232.

[14] C. Li, X. Chen, Y. Tang, L. Li, “Selection of optimum

parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost", Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-23.

[15] J. Lv, R. Tang, S. Jia, Y. Liu, "Experimental study on energy consumption of computer numerical control machine tools", Journal of Cleaner Production, 2016, pp. 1-11.

[16] J. Lv, R. Tang, W. Tang, S. Jia, Y. Liu, Y. Cao, "An investigation into methods for predicting material removal energy consumption in turning", Journal of Cleaner Production, 2018, pp. 1-29.

[17] K. He, H. Hong, R. Tang, J. Wei, "Analysis of Multi-Objective Optimization of Machining Allowance Distribution and Parameters for Energy Saving Strategy", Sustainability, 12, 2020, pp. 1-32.

[18] N. Diaz, E. Redelsheimer, D. Dornfeld, "Energy Consumption Characterization and Reduction Strategies for Milling Machine Tool Use", Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011, pp. 263-267.

[19] J. Li & Y. Lu & H. Zhao, P. Li, Y. Yao, "Optimization of cutting parameters for energy saving", Int J Adv Manuf Technol, 70, 2013, pp. 117-124.

[20] A. Aramcharoen, P. T. Mativenga, "Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy", Journal of Cleaner Production, 2014, pp. 1-35.

[21] S. Velchev, I. Kolev, K. Ivanov, S. Gechevski, "Empirical models for specific energy consumption and optimizing of cutting parameters for minimizing energy consumption during turning", Journal of Cleaner Production, 80, 2014, pp. 139-149.

[22] H. S. Yoon, J. Y. Lee, M. S. Kim, S. H. Ahn, "Empirical power-consumption model for material removal in three-axis milling", Journal of Cleaner Production, xxx, 2014, pp. 1-9.

[23] F. Liu, J. Xie, S. Liu, "A method for predicting the energy consumption of the main driving system of a machine tool in a machining process", Journal of Cleaner Production, xxx, 2014, pp. 1-7.

[24] Z. Zhang, R. Tanga, T. Penga, L. Taob, S. Jia, "A method for minimizing the energy consumption of machining system: integration of process planning and scheduling", 2016, pp. 1-35.

[25] P. Albertelli, A. Keshari, A. Matta, "Energy oriented multi cutting parameter optimization in face milling", Journal of Cleaner Production, xxx, 2016, pp. 1-17.

[26] K. He, R. Tang, Z. Zhang, W. Sun, "Energy Consumption Prediction System of Mechanical Processes Based on Empirical Models and Computer-Aided Manufacturing", Journal of Computing and Information Science in Engineering, 16, 2016, p. 1-10.

[27] R. S. Altıntaş, M. Kahya, H. O. Unver, "Modelling and optimization of energy consumption for featurea based milling", Int J Adv Manuf Technol, 2016, pp. 1-19.

[28] S. Borgia, P. Albertelli, G. Bianchi, "A simulation approach for predicting energy use during general milling operations", Int J Adv Manuf Technol, 2016, pp. 1-15.

[29] W. Cai, F. Liu, X. N. Zhou, J. Xie, "Fine energy consumption allowance of workpieces in the mechanical manufacturing industry", Energy, 114, 2016, pp. 623-633.

[30] A. Li, Q. Xiao, Y. Tang, L. Li, "A method integrating Taguchi, RSM and MOPSO to CNC machining parameters optimization for energy saving", Journal of Cleaner Production, 135, 2016, pp. 263-275.

[31] F. Ma, H. Zhang, H. Cao, K. K. B. Hon, "An energy consumption optimization strategy for CNC milling", Int J Adv Manuf Technol, 2016, pp. 1-12.

[32] T. Peng, X. Xu, "An interoperable energy consumption analysis system for CNC machining", Journal of Cleaner Production, xxx, 2016, pp. 1-14.

[33] K. He, R. Tanga, M. Jin, "Pareto fronts of machining parameters for trade-off among energy consumption, cutting force and processing time", Int. J. Production Economics, 185, 2017, pp. 113-127.

[34] L. Li, C. Li, Y. Tang, Q. Yi, "Influence Factors and Operational Strategies for Energy Efficiency Improvement of CNC Machining", Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-30.

[35] H. Wang, R. Y. Zhong, G. Liu, W. Mu, X. Tian, D. Leng, "An optimization model for energy-efficient machining for sustainable production", Journal of Cleaner Production, 232, 2019, pp. 1121-1133.

[36] F. Han, L. Li, W. Cai, C. Li, X. Deng, J. W. Sutherland, "Parameters optimization considering the trade-off between cutting power and MRR based on Linear Decreasing Particle Swarm Algorithm in milling", Journal of Cleaner Production 262, 2020, pp. 1-10.

[37] T. Bherendt, A. Zein, S. Min, "Development of an energy consumption monitoring procedure for machine tools", CIRP Annals - Manufacturing Technology, 61, 2012, pp. 43-46.

[38] U. Gotze, H. J. Koriah, A. Kolesnikov, R. Lindner, J. Paetzold, "Integrated methodology for the evaluation ofthe energy- and cost-effectiveness of machine tools", CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 5, 2012, pp. 151-163.

[39] Y. He, Y. Lia, T. Wu, J. W. Sutherland, "An energy-responsive optimization method for machine tool selection and operation sequence in flexible machining job shops", Journal of Cleaner Production, 2014, pp. 1-10.

[40] C. G. Liu, J. Yang, J. Lian, W. J. Li, S. Evans, Y. Yin, "Sustainable performance-oriented operational decision-making of single-machine systems with deterministic product arrival time", Journal of Cleaner Production, 85, 2014, pp. 318-330.

[41] J. Lv, R. Tang, W. Tang, Y. Liu, Y. Zhang, S. Jia, "An investigation into reducing the spindle acceleration energy consumption of machine tools", Journal of Cleaner Production, 2016, pp. 1-10.

[42] J. Lv, R. Tang, W. Tang, Y. Liu, Y. Zhang, S. Jia, "An investigation into reducing the spindle

acceleration energy consumption of machine tools", Journal of Cleaner Production, xxx, 2016, pp. 1-10.
[43] Q. Yi, C. Li, Q. Ji, D. Zhu, Y. Jin, L. Li, "Design optimization of lathe spindle system for optimum energy efficiency", Journal of Cleaner Production, 2019, pp. 1-26.
[44] Y. Oda, M. Mori, K. Ogawa, S. Nishida, M. Fujishima, T. Kawamura, "Study of optimal cutting condition for energy efficiency improvement in ball end milling with tool-workpiece inclination", CIRP Annals – Manufacturing Technology, 61, 2012, pp. 119-122.
[45] N. Liu, Y. F. Zhang, W. F. Lu, "A hybrid approach to energy consumption modelling based on cutting power: a milling case", Journal of Cleaner Production, 104, 2015, pp. 264-272.
[46] M. P. Sealy, Z. Y. Liu, D. Zhang, Y. B. Guo, Z. Q. Liu, "Energy consumption and modeling in precision hard milling", Journal of Cleaner Production, xxx, 2015, pp. 1-11.
[47] R. Kumar, P. S. Bilga, S. Singh, "Multi objective optimization using different methods of assigning weights to energy consumption responses, surface roughness and material removal rate during rough turning operation", Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-26.
[48] H. Zhang, Z. Deng, Y. Fu, L. Wan, W. Liu, "Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on cutting specific energy consumption", Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-20.
[49] C. Shoba, D. S. Prasad, A. Sucharitaa, M. Abishek, M. S. Koundinya, "Investigation of Surface Roughness, Power Consumption, MRR and Tool wear while turning hybrid composites", Materials Today: Proceedings, 5, 2018, pp. 16565-16574.
[50] A. M. Khan, M. Jamil, K. Salonitis, S. Sarfraz, W. Zhao, N. He, M. Mia, G. Zhao, "Multi-Objective Optimization of Energy Consumption and Surface Quality in Nanofluid SQCL Assisted Face Milling", Energies, 2019, pp. 01-22.
[51] K. N. Shi, J. X. Ren, S. B. Wang, N. Liu, Z. M. Liu, D.H. Zhang, W. F. Lu, "An improved cutting power-based model for evaluating total energy consumption in general end milling process", Journal of Cleaner Production, 231, 2019, pp. 1330-1341.
[52] J. Zhao, J. Zhao, L. Li, Y. Wang, J. W. Sutherland, "Impact of surface machining complexity on energy consumption and efficiency in CNC milling", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, pp. 1-15.
[53] A. Balasubramanian, S. Venkatesan, "Optimization of process parameters using response surface methodology for the removal of phenol by emulsion liquid membrane", Polish Journal of Chemical Technology, 14, 1, 2012, pp. 46-49.
[54] O. I. Avram, P. Xirouchakis, "Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system", Journal of Cleaner Production, 19, 2011, pp. 699-711.
[55] K. Xu, M. Luo, K. Tang, "Machine based energy-saving tool path generation for five-axis end milling of freeform surfaces", Journal of Cleaner Production, 139, 2016, pp. 1207-1223.
[56] I. F. Edem, P. T. Mativenga, "Modelling of energy demand from computer numerical control (CNC) toolpaths", Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-39.
[57] W. Lee, S. H. Kim, J. Park, B. K. Min, "Simulation-based machining condition optimization for machine tool energy consumption reduction", Journal of Cleaner Production, 150, 2017, pp. 352-360
[58] L. Li, X. Deng, J. Zhao, F. Zhao, J. W. Sutherland, "Multi-objective optimization of tool path considering efficiency, energy-saving and carbon-emission for free-form surface milling", Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-21.
[59] S. J. Shin, J. Woo, S. Rachuri, "Energy efficiency of milling machining: Component modeling and online optimization of cutting parameters", Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-36.
[60] R. Schlosser, F. Klocke, D. Lung, "Sustainabilty in Manufacturing – Energy Consumption of Cutting Processes", Advances in Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 8th Global Conference 85 on Sustainable Manufacturing, 2011, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 85-89.
[61] C. Zhang, W. Li, P. Jiang, P. Gu, "Experimental investigation and multi-objective optimization approach for low-carbon milling operation of aluminum", J M ech anical Engineer ing Science, 2016, pp. 2753-2772.
[62] J. Yan, L. Li, "Multi-object Optimization of milling parameters – the trade-offs between energy, production rate and cutting quality", Journal of Cleaner Production, xxx, 2013, pp. 1-10.
[63] T. Peng, X. Xu, "Energy-efficient machining systems: A critical review", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, pp. 1-30.
[64] I. Hanafi, A. Khamlichi, F. M. Cabrera, E. Almansa, A. Jabbouri, "Optimizing of cutting conditions for sustainable machining of PEEK-CF30 using TiN tools", Journal of Cleaner Production, 33, 2012, pp. 01-09.

*(BBT nhận bài: .../.../201.., hoàn tất thủ tục phản biện: .../.../201..)*
*(The Board of Editors received the paper on .../..../201..., its review was completed on .../.../201...)*

**Thông tin về tác giả**

Họ Và Tên: Đào Văn Dưỡng

Sinh ngày: 09/06/1979

Năm 2002 Tốt nghiệp trường Đại Học Sư Phạm, Thành Phố Hồ Chí Minh, Ngành Cơ khí chế tạo Máy

Năm 2005 Giảng dạy tại trường trung cấp nghề số 2 Biên Hòa, Đồng Nai

Năm 2009 chuyển công tác, là giảng viên trường Cao Đẳng Nghề Đồng Nai (Hiện nay là Trường Cao Đẳng Kỹ Thuật Đồng Nai)

Năm 2012 tốt nghiệp Thạc Sĩ tại HVKTQS Ngành Công Nghệ chế Tạo Máy và là giảng viên Khoa Cơ khí Chế Tạo, Trường Cao Đẳng kỹ Thuật Đồng Nai

Hiện nay đang là nghiên cứu sinh tại HVKTQS ngành Kỹ thuật Cơ Khí

Lĩnh Vực quan Tâm: Công Nghệ CAD/CAM/CNC, Gia công cao tốc, gia công thông minh

International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)
ISSN: 2278-0181
Vol. 10 Issue 06, June-2021

# Optimization of High-Speed Cutting Parameters Oriented Improves the Dimensional Accuracy of Alloy Steel SKD11

Duong Van Dao[1]
[1]Dong Nai Technical College, Vietnam

Anh Tuan Lai[2], Tien Lap Do[2], Van Tuan Pham[2], Cong Doan Le[2], Tan Loc Ngo[2]
[2]Advanced Technology Center, Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam

***Abstract* —This paper focuses on evaluating the influence of cutting parameters on dimensional accuracy when high-speed finishing milling (HSFM) of alloy steel SKD11 after heat treatment (55HRC). At the same time, the problem of finding the optimal cutting parameter that ensures the smallest dimension error is solved through the genetic algorithm (GA). The optimization problem has constraints both on the value limit of the variables and the limit of the objective function. The experiments were carried out based on the orthogonal experimental method of level 2 with the construction of a system of regression equations describing the relationship between cutting parameters and dimensional accuracy. The research results show the reliability of the regression equation and contribute to improving the machining quality when HSFM of alloy steel SKD11 after heat treatment.**

***Keywords- High speed milling, alloy steel, dimensional accuracy, optimization.***

## I. INTRODUCTION

High-speed machining (HSM) is a metal cutting method with a cutting speed of 5 to 10 times that of conventional machining, the temperature at the cutting area will be reduced because it is transferred to the chip [1]. The HSM method has many outstanding advantages when gradually increasing the cutting speed such as increased cutting productivity, increased surface quality, and reduced cutting force. However, as the cutting speed increases, the tool life decreases. Compared with traditional machining, HSM has outstanding advantages. High-speed machining can reduce machining times by up to 50% and reduce machining costs by 30-50%, depending on the case [2].

In metalworking and cutting, processing hard materials in general and hard alloy steel, in particular, is always a difficult problem, complicated by physical phenomena of the cutting process as well as different processing requirements. distinguished from HSM of aluminum, low and medium hardness alloys (below 30HRC), or traditional machining. However, in practice, if the basic characteristics of the cutting process are understood and the problems are solved correctly, hard alloy HSM becomes a predictable process. At this time, the problem of processing and cutting hard materials and hard alloy steel will become more favorable and bring high economic profits.

It is easy to see that alloy such as titanium alloys, alloy steels after heat treatment (hardness above 40HRC) are difficult materials to cut due to their high hardness, high thermal strength, chemical abrasion resistance, and high-temperature resistance. Temperature and stress are always high in the cutting zone during machining due to poor thermal conductivity, affecting tool wear and chip morphology, increasing machining costs. In other words, when it comes to the HSM of hard alloys, we are often interested in the ability to machine them. Machinability refers to the ease with which a material is cut to the required texture. Factors such as cutting force, cutting heat, vibration, surface quality, tool wear, and wasted energy all affect the finish of the structure, so it can be considered as the basis for evaluating machinability [3]. The problem of HSM of hard alloys has been interested in research in the world for many years. Studies on cutting force can be considered in [4], [5], cutting temperature in [6], [7], vibration in [8], [9], cutting tool wear in [10], [11], roughness in [12], [2], [13].

Dimensional accuracy is a key indicator in machining accuracy and is the basis of product quality assessment. This factor is directly related to the ability to assemble in the system and affects the working condition of the whole system. However, few studies mention this issue, only a few case studies such as [14], [15], [16], [17], [18], [19], [ 20], [21] but these studies are not high-speed machining. The influence of technological parameters on the dimensional accuracy when turning aluminum materials is studied in [14]. The results show that when increasing the cutting speed and decreasing the feed rate or vice versa, the dimensional accuracy is guaranteed. The dimensional accuracy is highest when the cutting speed is high, the depth of cut is large and the feed rate is small. the problem of tool wear, surface roughness, and dimensional accuracy when machining AISI 4140 alloy using low-temperature coolant are considered in [15], [18]. The results show that the cold coolant helps to reduce tool wear, increase durability, and significantly reduce the dimensional deviation.

The method of measuring and analyzing the cutting force and vibration during the steel alloy turning to determine the surface roughness and dimensional deviation based on the Neural algorithm is presented in [16]. the causes of dimensional deviation including error in machine geometry, cutting heat, control system, and cutting force are described in [17]. The study concludes that shear force has the most influence on dimensional deviation. A model which is established in [19] to predict geometric roughness and dimensional accuracy through imaging technology during machining. The parameters obtained by taking pictures are put into the simulation environment, combined with technological


(This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.)

International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)
ISSN: 2278-0181
Vol. 10 Issue 06, June-2021

parameters, the author can predict the roughness and dimensional accuracy. Experimental verification for some cases confirms the feasibility of the method. The optimal tooling strategy to ensure dimensional accuracy when high-speed milling of very small parts (micromachining) is used in [20]. The influence of technological parameters on dimensional accuracy when machining AISI 4340 hardened steel dry turning is studied in [21]. The author concludes that cutting speed and CBN-coated turning tip radius have the most influence. to dimensional accuracy.

Due to the limitation of manufacturing technology of machines, cutting tools, and other equipment, there are not many publications on the issue of dimensional accuracy when high-speed processing for alloy steel after heat treatment with high hardness. This paper focuses on studying the dimensional accuracy when high-speed finishing milling of alloy steel SKD11 after heat treatment with hardness above 55HRC. The relationship between the shear parameters and the dimensional accuracy is shown through the construction of the regression equation. Level 2 orthogonal empirical method is applied to build this mathematical equation. The genetic algorithm with the objective function which is constrained is used to find the optimal set of cutting parameters that minimize the dimension error.

## II. MATERIALS AND METHODS

### A. *Experiment set up*

The experimental objective of HSFM of alloy steel SKD11 after heat treatment (55HRC) is to determine the relationship between cutting parameters (depth of cutting, feed rate, and spindle speed) in HSFM with dimensional error through the regression equation. This equation is built based on the level 2 orthogonal empirical method. The workpiece material is SKD11 (Japanese Standard JIS G4404) with the composition described in Tab. I.

TABLE I. CHEMICAL COMPOSITION OF SKD11 ALLOY STEEL WORKPIECE

| **Ingredient** | C (%) | Si (%) | Mn (%) | Cr (%) | Mo (%) | V (%) | P (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **SKD11** | 1.4-1.6 | ≤0.6 | ≤0.6 | 11-13 | 0.7-1.2 | ≤1.1 | ≤0.03 |

SKD11 workpiece was heat-treated in the Turbo-IPSEN furnace and hardness measured on an FR-1E/Hard machine (Fig.1). Hardness measurement results with the average value of SKD11 alloy steel workpiece after heat treatment reached 55 HRC. Regarding machining machines, experiments were carried out on HSM machines DMC1450V manufactured in 2018. The maximum tool speed according to X, Y, Z reaches 42.000 mm/min, the spindle speed reaches the maximum of 20.000 rpm, the spindle power reaches 35 kW, the maximum load force on the X, Y, Z axes reached 6.5 KN. The maximum position accuracy reaches 6µm (According to VDI/DGQ 3441).

The cutting tool used for the experiment is a specialized high-speed carbide Endmill tool YG SGN09080H. The cutting tool code is NX5070 SGNF09080H, cutting diameter is 8mm, shank diameter is 8mm, cutting length is 20mm, total tool length is 65mm with 4 cutting teeth (Fig. 2a). The experimental model is depicted in Fig. 2b.

The measuring device is a CMM CONTURA G2. The machine can scan actively and multi-sensor. Scan points up to 200 points/s. The variable measuring force from 50 to1000 $mN$ ). Max needle length is 500 mm, minimum needle diameter is 0.5 mm. The linear error of the MPE measurement length according to ISO 10360-2: 2009 is 1.8 µm with the measuring length 300mm, the repeatability error is 1.4 µm. The strategy for finish milling is the Profile cycle. The diameter of the circular pocket before finishing is 21.8 mm. The required pocket diameter is 22mm. Pocket depth reaches 11mm.

Fig. 1. FR-1E/Hard hardness tester and SKD11 55HRC workpiece

Fig. 2. Carbide Endmill tool YG SGN09080H and experimental model

*The level 2 orthogonal experimental method*

This is a nonlinear planning method, the structure has a center, the number of influencing factors is 3 factors (cutting depth, feed rate, and spindle speed), the stepover parameter is fixed. The total number of experiments to be performed is 15. The alpha quantity is the distance from the center of the experimental structure to the position of points on the coordinate axis of the structure. Conventional influencing factors according to the variables are as follows, cutting depth $t(mm)$ is $x_1$, the feed rate F(mm/min) is $x_2$, spindle speed $n(rev/\min)$ is $x_3$. Note that the spindle speed can be related to the cutting speed ($V_c(m/\min)$) through the calculation given below

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \quad (1)$$

where, $D$ is the tool diameter, $n(rev/\min)$ is the spindle speed.

### B. *Perform experiments*

Based on the study of previous publications on the HSM for different materials, different hardness, assessment of the machining ability of SKD11 with HRC55, the machining ability of CNC machines, the domain of cutting parameters recommended by the cutting tool manufacturer, and test machining results, the range of experimental cutting


(This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.)

International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)
ISSN: 2278-0181
Vol. 10 Issue 06, June-2021

parameters value are specifically selected as shown in Tab. II. The experimental matrix table is described in Fig. 3.

TABLE II. LIMITING DOMAIN OF EXPERIMENTAL CUTTING PARAMETERS VALUE

| Cutting parameter | Limit lower ($-\alpha$) | Low (-1) | Basic (0) | High (+1) | Limit upper ($\alpha$) | Variables |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $t$ | 2.25 | 3 | 6 | 9 | 9.75 | $x_1$ |
| $F$ | 575 | 600 | 700 | 800 | 825 | $x_2$ |
| $n$ | 3800 | 4000 | 4800 | 5600 | 5800 | $x_3$ |
| $V_c$ | 95.5 | 100.5 | 120.6 | 140.7 | 145.7 | $x_3$ |

| No | X1 | X2 | X3 |
|---|---|---|---|
| 1 | + | + | + |
| 2 | - | + | + |
| 3 | + | - | + |
| 4 | - | - | + |
| 5 | + | + | - |
| 6 | - | + | - |
| 7 | + | - | - |
| 8 | - | - | - |
| 9 | +alpha | 0 | 0 |
| 10 | -alpha | 0 | 0 |
| 11 | 0 | +alpha | 0 |
| 12 | 0 | -alpha | 0 |
| 13 | 0 | 0 | +alpha |
| 14 | 0 | 0 | -alpha |
| 15 | 0 | 0 | 0 |

(a)

| No | t(mm) | F(mm/min) | n(rev/min) |
|---|---|---|---|
| 1 | 9 | 800 | 5600 |
| 2 | 3 | 800 | 5600 |
| 3 | 9 | 600 | 5600 |
| 4 | 3 | 600 | 5600 |
| 5 | 9 | 800 | 4000 |
| 6 | 3 | 800 | 4000 |
| 7 | 9 | 600 | 4000 |
| 8 | 3 | 600 | 4000 |
| 9 | 9.753 | 700 | 4800 |
| 10 | 2.247 | 700 | 4800 |
| 11 | 6 | 825 | 4800 |
| 12 | 6 | 575 | 4800 |
| 13 | 6 | 700 | 5800 |
| 14 | 6 | 700 | 3800 |
| 15 | 6 | 700 | 4800 |

(b)

Fig. 3. Experimental matrix table

### C. Collect experimental results

The finished part is put on the CMM gauge to measure the diameter size. Each hole was measured 3 times in diameter at three positions 120 degrees apart on 2 positions 3mm and 6mm from the hole mouth. The value of each hole diameter obtained is the average of the measurements. Accordingly, the error of pocket diameter is determined as $Err = Y_{real} - Y_0$. In which, $Y_{real}$ is the experimental diameter value, $Y_0 = 22mm$ is the nominal diameter value (Tab III).

TABLE III. EXPERIMENTAL RESULTS

| TN | $Y_0(mm)$ | $Y_{real}(mm)$ | $Err(mm)$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 22 | 21.999996 | -0.000004 |
| 2 | 22 | 21.952938 | -0.047062 |
| 3 | 22 | 22.037531 | 0.037531 |
| 4 | 22 | 21.953934 | -0.046066 |
| 5 | 22 | 22.034254 | 0.034254 |
| 6 | 22 | 22.047239 | 0.047239 |
| 7 | 22 | 22.048250 | 0.048250 |
| 8 | 22 | 21.950125 | -0.049875 |
| 9 | 22 | 22.040890 | 0.040890 |
| 10 | 22 | 21.951627 | -0.048373 |
| 11 | 22 | 22.018668 | 0.018668 |
| 12 | 22 | 22.020412 | 0.020412 |
| 13 | 22 | 22.026044 | 0.026044 |
| 14 | 22 | 22.025781 | 0.025781 |
| 15 | 22 | 22.029272 | 0.029272 |

To evaluate the accuracy of the diameter when HSFM of the pocket, a regression equation for error of pocket diameter compared with nominal pocket diameter based on orthogonal level 2 method is obtained as follows

$$Err = 0.02365 + 0.02961x_1 - 0.01234x_3 - 0.018456x_1x_2 - 0.01521x_2x_3 - 0.01989x_1^2 \quad (2)$$

The regression equation reconstructed on the ANOVA module of Design Expert 12 software also gives similar results (Fig. 4).

Change the variable back to the cutting parameters

$$x_1 = \frac{t - t_0}{\Delta t}; x_2 = \frac{F - F_0}{\Delta F}; x_3 = \frac{n - n_0}{\Delta n} \quad (3)$$

Where, $t_0, F_0$ and $n_0$ are the cutting parameters at the basic level. $\Delta t, \Delta F$ and $\Delta n$ are the range of the cutting parameter variation. The regression equation is rewritten according to the cutting parameters as follows

$$Y_{Saiso} = 0.02365 + 0.02961\frac{(t - t_0)}{\Delta t} - 0.01234\frac{(n - n_0)}{\Delta n} - 0.018456\frac{(t - t_0)}{\Delta t}\frac{(F - F_0)}{\Delta F} - 0.01521\frac{(F - F_0)}{\Delta F}\frac{(n - n_0)}{\Delta n} - 0.01989\left(\frac{(t - t_0)}{\Delta t}\right)^2 \quad (4)$$

where, $t_0 = 6; \Delta t = 3; F_0 = 700; \Delta F = 100; n_0 = 4800$, $\Delta n = 800$ and limited values $2.247 \le t \le 9.753(mm)$; $575 \le F \le 825(mm/\min); 3800 \le n \le 5800(rev/\min)$.

### D. Optimization of cutting parameters

**Objective**: it is necessary to find the optimal technological parameters to ensure that the machining size error is the smallest.

**Boundary conditions** include the limit value of variables and the limit value of the objective function. The algorithm is built on the basis of the following conditions $-1.215 \le x_1, x_2, x_3 \le 1.215$, respectively limit the technological parameters are given as

$$\begin{aligned} 95.5 \le V_c &\le 145.7(m/\min); \\ 3800 \le n &\le 5800(rev/\min) \\ 575 \le F &\le 825(m\,m/\min) \\ 2.25 \le t &\le 9.75(mm) \end{aligned} \quad (5)$$

Point to note, since this is an objective function of dimensional accuracy, machined dimensions always have a tolerance. The condition for the objective function value should be set so that finding the minimum value must be within the allowable dimensional tolerance. Suppose, in this case, set the round hole diameter dimensional tolerance to $D = 22 \pm 0.02(mm)$. This means the error objective function value must meet condition $-0.02 \le Err \le 0.02(mm)$. Mathematically, condition $-0.02 \le Err \le 0.02(mm)$ is assumed to determine the minimum value $Err_{\min} = -0.02(mm)$.


(This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.)

International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)
ISSN: 2278-0181
Vol. 10 Issue 06, June-2021

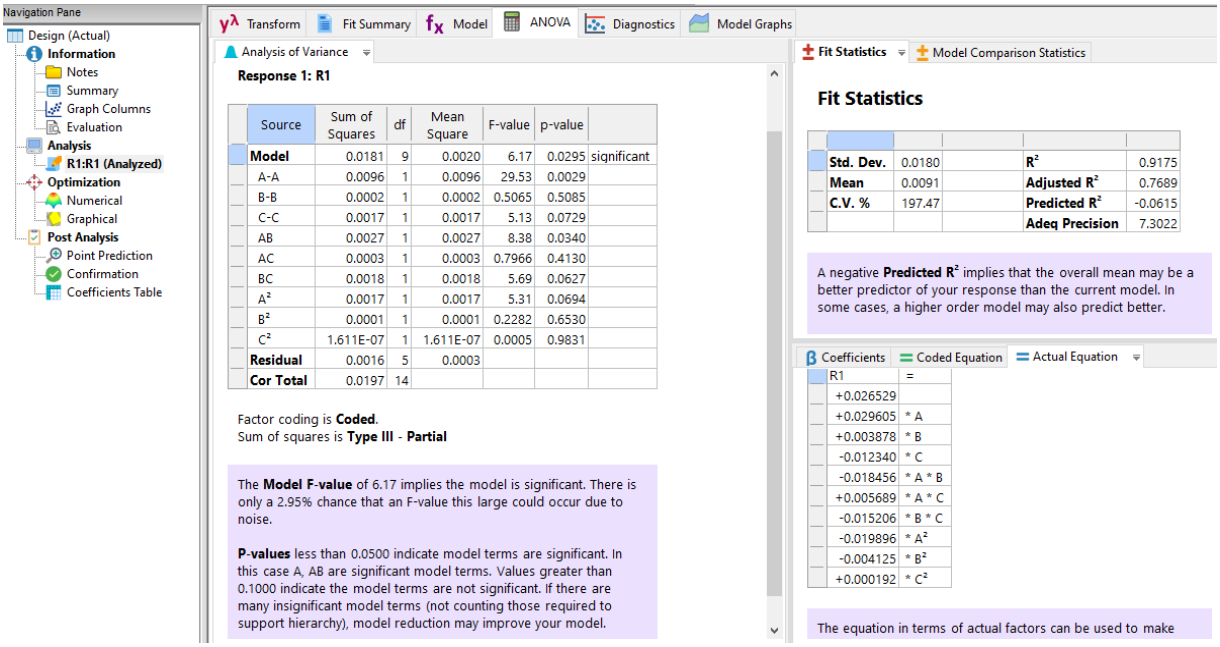



Fig. 4. Verification results on ANOVA/DESIGN EXPERT software

Technologically, the error value is smallest when it approaches 0. Therefore, in this study, the problem has been reduced to the form: find $-1.215 \le x_1, x_2, x_3 \le 1.215$ such that $Err_{\min} = -0.02(mm)$. The objective function is nonlinear and conditional, so the GA [22] is used and is described in Tab. IV.

TABLE IV. GA PARAMETERS

| No | Parameters | Symbols | Value |
|---|---|---|---|
| 1 | Number of generations | $MaxGen$ | 50 |
| 2 | Initial population size | $npop$ | 100 |
| 3 | Random selection rate | $Se$ | 0.5 |
| 4 | Mutation probability | $Mu$ | 0.05 |

***Optimal results***

The minimum value $Err_{\min} = -0.02(mm)$ corresponds to $x_1 = -0.772$, $x_2 = -0.4172$, and $x_3 = 0.6671$. These optimal values correspond to the cutting parameters $t = 3.68(mm), F = 658.3(mm/ph), n = 5534(vg/ph)$ and $V_c = 139(m/ph)$.

*E. Results and Discussion*

*Evaluation of the effect of depth of cut ($t$) and feed speed ($F$)*

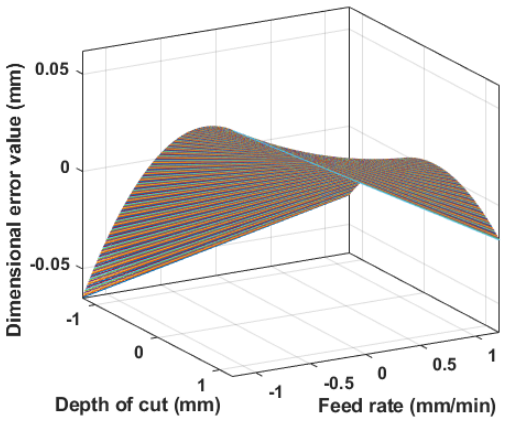



Fig. 5. Effect of depth of cut and feed rate

Corresponding to the optimal value $x_3 = 0.6671$, the dimensional error equation reflecting the influence of depth of cut and feed rate has the form as follows

$$Err = 0.015418 + 0.02961x_1 - 0.018456x_1x_2 - 0.01014x_2 - 0.01989x_1^2 \quad (6)$$

As shown in Fig. 5, the error value increases in the negative direction as the depth of cut is decreased (because the error is gradually approaching 0 it is the best, but it will never reach the ideal 0). The error value approaches 0 when keeping the feed rate constant and gradually increasing the cutting depth but only increasing to a moderate extent (near the 0 level), further increasing this parameter will increase the error. Increasing the feed rate value does not have much effect on the dimensional error.

*Evaluation of the effect of depth of cut ($t$) and cutting speed ($V_c$)*

For the optimal value of $x_2 = -0.4172$, the dimensional error equation reflecting the influence of cutting depth and cutting speed has the form as follows


(This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.)

International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)
ISSN: 2278-0181
Vol. 10 Issue 06, June-2021

$$Err = 0.02365 + 0.03731x_1 - 0.006x_3 - 0.01989x_1^2 \quad (7)$$

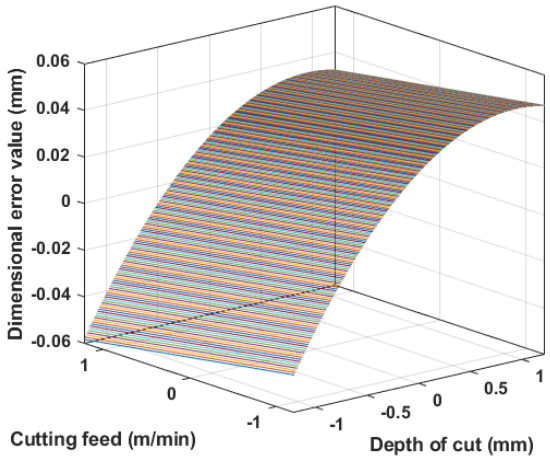



Fig. 6. Effect of depth of cut and cutting speed

Based on Fig. 6, the change in cutting speed does not have much effect on the dimension error. The depth of cut has a great influence. Similar to Fig. 6, the error decreases with a moderate increase in the depth of cut, but continues to increase, the error also increases.

*Evaluation of the effect of feed speed ($F$) and cutting speed ($V_c$)*

Corresponding to the optimal value $x_1 = -0.772$, the dimensional error equation reflecting the influence of cutting depth and cutting speed has the form as follows

$$Err = -0.01107 + 0.01425x_2 - 0.01234x_3 - 0.01521x_2x_3 \quad (8)$$

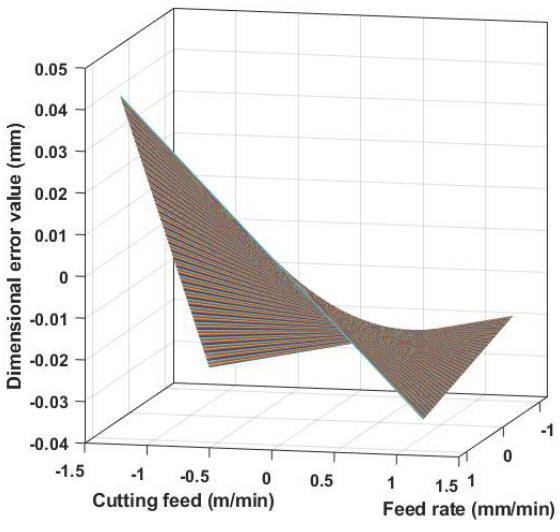



Fig. 7. Effect of the feed rate and cutting speed

Fig. 7 shows that, when feed rate and cutting speed go to the average level, the error also gradually approaches 0. The minimum or maximum cutting speed and the maximum feed speed create the largest error.

## III. CONCLUSIONS

In summary, the influence of cutting parameters on dimensional accuracy through the dimensional error when high-speed finishing milling of alloy steel SKD11 after heat treatment has been considered. The optimal cutting parameters are also found according to the constraint condition of the variables and the objective function. Some evaluation results show that the smaller the depth of cut, the larger the error. Conversely, increasing the depth of cut to a reasonable value may reduce the error, but should not increase it too much. Feed speed and cutting speed have little influence on dimensional error. Note that if the depth of cut is constant, then with high feed rates, the maximum or minimum cutting speeds in the limit region will produce the largest error. These results have contributed positively to the assessment of the influence of cutting parameters on dimensional accuracy, serving as a basis for selecting appropriate cutting parameters when high-speed machining of hardened alloy steel with dimensional accuracy on request.

## REFERENCES

[1] H. Schulz, "The History of High-Speed Machining", Revista de Ciencia and Tecnologia, 13, 1999, pp. 9-18.
[2] X. Cui, J. Zhao, "Cutting performance of coated carbide tools in high-speed face milling of AISI H13 hardened steel", Int J Adv Manuf Technol, 2014, pp. 1811–1824.
[3] S. W. Kim, "Evaluation of machinability by cutting environments in high-speed milling of difficult-to-cut materials", Journal of Materials Processing Technology, 111, 2001, pp 256-260.
[4] Z. Zhao, Y. Xiao, Y. Zhu, Bai Liu, "Influence of Cutting Speed on Cutting Force in High-speed Milling", Advanced Materials Research, 139-141, 2010, pp. 835-838.
[5] A.N. Fang, P. S. Pai, N. Edwards, "A comparative study of high-speed machining of Ti–6Al–4V and Inconel 718 - part I: effect of dynamic tool edge wear on cutting forces", Int J Adv Manuf Technol, 2013.
[6] Y. Karpat, "Analytical and Thermal Modeling of High-Speed Machining with Chamfered Tools", Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 130 / 011001, 2008, pp. 01-15.
[7] M. Iqbal, M. Konneh, M. H. Bin, K. A. Abdallah, M. F. B. Binting, "Cutting temperature in high-speed milling of silicon carbide using diamond coated tool", International Journal of Mechanical and Production Engineering, 2015, pp. 62-66.
[8] Z. Kang, S. Honghua, H. Linjiang, L. Yingzhi, "Vibration control of HSM of thin-wall titanium alloy components based on finite element simulation", Materials Science Forum, 2016, pp. 304-310.
[9] M. Sekar, "Machining Chatter Analysis for High-Speed Milling Operations", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 247, 2017, pp. 1-12.
[10] R. B. Silva, A. R. Machado, E. O. Ezugwu, J. Bonney, W. F. Sales, "Tool life and wear mechanisms in high-speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under vaious coolant pressure", Journal of Materials Processing Technolory, 213, 2013, pp. 1459-1464.
[11] X. Tian, J. Zhao, Jiabang Zhao, Z. Gong, Y. Dong, "Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools", Int J Adv Manuf Technol, 2013.
[12] R. S. Pawade, Suhas S. Joshi, "Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA)", Int J Adv Manuf Technol, 56, 2011, pp. 47-62.
[13] SU Honghua, LIU Peng, FU Yucan, XU Jiuhua, "Tool Life and Surface Integrity in High-speed Milling of Titanium Alloy TA15 with PCD/PCBN Tools", Chinese Journal of Aeronautics, 25, 2011, pp. 784-790.
[14] A. S. Shouckry, "The effect of cutting conditions on dimensional accuracy", Wear, 80, 1982, pp. 197-205.
[15] N. R. Dhar, "Machining of AISI 4140 steel under cryogenic cooling-tool wear, surface roughness and dimensional deviation", Journal of Materials Processing Technology, 123, 2002, pp. 483-489.


(This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.)

International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)
ISSN: 2278-0181
Vol. 10 Issue 06, June-2021

[16] K.A. Risbood, "Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process", Journal of Materials Processing Technology, 132, 2003, pp. 203-214.
[17] T. L. Schmitz, "Part Accuracy in High-Speed Machining: Preliminary Results", MSEC2006-2110.
[18] N. R. Dhar, "Cutting temperature, tool wear, surface roughness and dimensional deviation in turning AISI-4037 steel under cryogenic condition", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, 2007, pp. 754-759.
[19] H. H. Shahabi, M. M. Ratnam, "Prediction of surface roughness and dimensional deviation of workpiece in turning: a machine vision approach", Int J Adv Manuf Technol, 27, 2010, pp. 213–226.
[20] A. Dadgari, D. Huo, D. Swailes, "The effect of machining toolpath on surface roughness and dimensinal accuracy for high-speed micro milling", Solid State Phenomena, 261, 2017, pp. 69-76.
[21] S. Yousefi, M. Zohoor, M. Faraji, "The variations of dimensional accuracy in dry hard turning operation", The 25th Annual International Conference on Mechanical Engineering ISME2017-2352 ISME2017, Tarbiat Modares university, Tehran, Iran, 2017, pp. 415-416.
[22] Bies, Robert R.; Muldoon, Matthew F.; Pollock, Bruce G.; Manuck, Steven; Smith, Gwenn; Sale, Mark E. (2006). "A Genetic Algorithm-Based, Hybrid Machine Learning Approach to Model Selection". Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics. 33 (2): 196–221.


(This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.)

International Journal of Engineering Innovation & Research
Volume 10, Issue 4, ISSN: 2277 – 5668

# Optimization of Cutting Parameters in High-Speed Milling of Hardened Alloy Steels SKD11 to Minimize Energy Consumption Based on PSO Algorithm

**Dao Van Duong [1*], Lai Anh Tuan [2], Do Tien Lap [2], Pham Van Tuan [2], Nguyen Tai Hoai Thanh [2], Le Cong Doan [2] and Ngo Tan Loc [2]**
[1] Dong Nai Technical College, Vietnam.
[2] Advanced Technology Center, Le Quy Don Technical University, Vietnam.
*Corresponding author email id: daovanduong.ktdn@gmail.com

*Date of publication (dd/mm/yyyy): 22/07/2021*

***Abstract*** **– This paper focuses on evaluating the influence of cutting parameters on the energy consumption of CNC machines when high-speed rough milling (HSRM) of alloy steel SKD11 after heat treatment (55HRC). At the same time, the problem is to find the optimal cutting parameters to ensure the minimum energy consumption through the particle swarm algorithm (PSO). The conditional optimization problem is bound to limit the values for the variables and limit the objective function. The experiments are carried out based on the level 2 orthogonal experimental method. The regression equation describing the relationship between the cutting parameters and the energy consumption of the CNC machine is built based on the experimental results. The research results show the reliability of the regression equation and serve as the basis for the calculation of cost reduction when high-speed milling of alloy steel after heat treatment.**

***Keywords*** **– High Speed Milling, Alloy Steel, Energy Consumption, Optimization.**

## I. INTRODUCTION

High-speed machining (HSM) is a metal cutting method with a cutting speed of 5 to 10 times that of conventional machining, the temperature at the cutting area will be reduced because it is transferred to the chip [1]. Compared with traditional machining, HSM has outstanding advantages. High-speed machining can reduce machining times by up to 50% and reduce machining costs by 30-50%, depending on the specific case [2].

In metalworking and cutting, processing hard materials in general and hard alloy steel, in particular, is always a difficult problem, complicated by physical phenomena of the cutting process as well as different processing requirements. Distinguished from HSM of aluminum, low and medium hardness alloys (below 30HRC), or traditional machining. The problem of HSM of hard alloys has been interested in research in the world for many years. Studies on cutting force can be considered in [3], [4], cutting temperature in [5], [6], vibration in [7], [8], cutting tool wear in [9], [10], roughness in [2], [11], [12].

The energy consumption in the machining process in general and high-speed machining in particular accounts for a significant part of the production cost, so it is necessary to be taken into account in evaluating the economy and improving the efficiency of the whole process. According to the 2014 the CO2 emissions report of the US energy agency [13], 90% of energy consumption is in industrial production. Therefore, industries in general and the field of mechanical manufacturing in particular need to be responsible for minimizing energy consumption. Many studies have shown that if the technological process can be optimized in the production stages, it is possible to reduce energy consumption from 6% to 40% compared to the present [14]. In fact, the wasted energy is mainly in the roughing step, the balance between machining productivity and energy consumption needs to be

Copyright © 2021 IJEIR, All right reserved

considered. In the finishing machining step, product quality is the core issue. Some studies on energy consumption in the machining process are mentioned below [15], [16], [17], [17], [19], [20], [21], [22], [23]. These works have not mentioned the problem of high-speed machining. Experimentally statistics the energy consumption of machining machines is performed in [15] and [22]. Statistical models are valuable for evaluating the efficiency of the machining process. The relationship between technological parameters, cutting environment and wasted energy when machining AISI P20 steel alloy is described in [16]. The influence of technological parameters on surface roughness and energy consumption is evaluated in [17] when machining AISI 1045 alloy steel based on Taguchi and ANOVA techniques. The energy consumption between different materials is mentioned in [18]. The technological parameters are studied in [19] for minimizing wasted energy and increasing tool life when machining Al and SiC alloys. The energy consumption when milling low-hardness alloys, taking into account the influence of the feed strategy is conducted in [20], [21], [24]. A parametric model of energy consumption when machining micro-drills is analyzed in [22]. Basically, the researches on energy consumption in the cutting process mentioned above have the processing objects of low hardness materials with conventional turning, milling and drilling methods. The field of the HSM for high-hardness materials has not been mentioned much.

There have been many studies on the problem of optimizing energy consumption on CNC machines as in [25-32]. However, these works only deal with low-hardness materials, not considering the HSM and hard alloys.

This paper focuses on research on optimizing the energy consumption when high-speed rough milling of alloy steel SKD11 after heat treatment with hardness above 55HRC. The relationship between shear parameters and energy consumption is shown through the construction of regression equations. Level 2 orthogonal empirical method is applied to build this mathematical equation. The swarm algorithm (PSO) is applied to find the optimal set of cutting parameters that minimize energy consumption.

## II. MATERIALS AND METHODS

### A. *Experimental Design*

The experimental objective of HSFM of alloy steel SKD11 after heat treatment (55HRC) is to determine the relationship between cutting parameters (depth of cutting, feed rate, and spindle speed) in HSFM with energy consumption of CNC machine through the regression equation. This equation is built based on the level 2 orthogonal empirical method. The workpiece material is SKD11 (Japanese Standard JIS G4404) with the composition described in Table 1.

Table 1. Chemical composition of SKD11 alloy steel workpiece.

| Ingredient | C (%) | Si (%) | Mn (%) | Cr (%) | Mo (%) | V (%) | P (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| SKD11 | 1.4-1.6 | ≤0.6 | ≤0.6 | 11-13 | 0.7-1.2 | ≤1.1 | ≤0.03 |

SKD11 workpiece was heat-treated in the Turbo-IPSEN furnace and hardness measured on an FR-1E/Hard machine (Fig. 1). Hardness measurement results with the average value of SKD11 alloy steel workpiece after heat treatment reached 55 HRC.

Regarding machining machines, experiments were carried out on HSM machines DMC1450V manufactured in 2018. The maximum tool speed according to X, Y, Z reaches 42.000 mm/min, the spindle speed reaches the

Copyright © 2021 IJEIR, All right reserved

maximum of 20.000 rpm, the spindle power reaches 35 kW, the maximum load force on the X, Y, Z axes reached 6.5 KN. The maximum position accuracy reaches 6µm (According to VDI/DGQ 3441).

The cutting tool used for the experiment is a specialized high-speed carbide Endmill tool YG SGN09080H. The cutting tool code is NX5070 SGNF09080H, cutting diameter is 8mm, shank diameter is 8mm, cutting length is 20mm, total tool length is 65mm with 4 cutting teeth (Fig. 2).

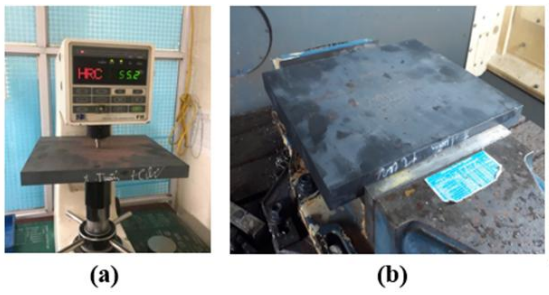



Fig. 1. FR-1E/Hard hardness tester and SKD11 55HRC work piece.

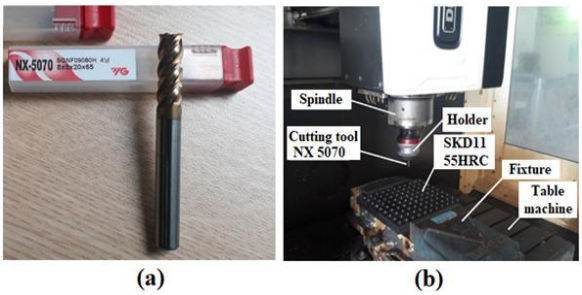



Fig. 2. Carbide Endmill tool YG SGN09080H and experimental model.

The energy consumed by the CNC machine during the machining process is determined indirectly through the power consumption of CNC machine respect to time. The power of the machine is determined based on measuring the effective voltage value and effective amperage of the CNC machine. Therefore, the energy measuring device used is the MAVOWATT 230 measurement system [33], the KAISE voltage measurement devices, and the EXTECH effective amperage [34] (Fig. 3). The diameter of the circular pocket before finishing is 21.8 mm. The required pocket diameter is 22mm. Pocket depth reaches 11mm.

Fig. 3. Energy measuring devices.

The level 2 orthogonal experimental method is a nonlinear planning method, the structure has a center [35]. The number of influencing factors is 3 factors (cutting depth, feed rate, and spindle speed or cutting speed), the stepover parameter is fixed. The total number of experiments to be performed is 15. The $\alpha$ quantity is the distance from the center of the experimental structure to the position of points on the coordinate axis of the structure. Conventional influencing factors according to the variables are as follows, cutting depth t(mm) is $x_1$, the feed rate F(mm/min) is $x_2$, spindle speed n(rev/min) is $x_3$. Note that the spindle speed can be related to the cutting speed ($V_c (m/min)$) through the calculation given below.

$$V_c = \frac{\pi D n}{1000} \tag{1}$$

where, $D$ is the tool diameter, $n(rev/min)$ is the spindle speed.

Copyright © 2021 IJEIR, All right reserved

B. *Perform Experiments*

Based on the study of previous publications on the HSM for different materials, different hardness, assessment of the machining ability of SKD11 with HRC55, the machining ability of CNC machines, the domain of cutting parameters recommended by the cutting tool manufacturer, and test machining results, the range of experimental cutting parameters value are specifically selected as shown in Table 2. The experimental matrix table is described in Fig. 4. Experiments from 16 to 19 were performed at the center of the experimental structure to evaluate the reliability of the regression equation and verify the calculated results.

C. *Collect Experimental Results*

The value of energy consumed is measured in the roughing machining. The energy consumption measurement results are presented in detail in Table 3.

Table 2. Limiting domain of cutting parameters value.

| **Cutting Parameter** | ***t*** | ***F*** | $V_c$ | ***n*** |
|---|---|---|---|---|
| Variables | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_3$ |
| Lower limit ( $-\alpha$ ) | 0.57 | 378.5 | 55 | 2188 |
| Low (-1) | 1 | 400 | 60.3 | 2400 |
| Basic (0) | 3 | 500 | 80.4 | 3200 |
| High (+1) | 5 | 600 | 100.5 | 4000 |
| Upper limit ( $\alpha$ ) | 5.43 | 621.5 | 105 | 4181 |

Table 3. Experimental results.

| **No** | **I (A)** | **U (V)** | **Time (s)** | **E (KWh)** |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 4.06 | 410 | 142 | 0.0657 |
| 2 | 3.98 | 410 | 693 | 0.3140 |
| 3 | 4.34 | 410 | 212 | 0.1049 |
| 4 | 4.10 | 410 | 1037 | 0.4846 |
| 5 | 4.48 | 410 | 142 | 0.0725 |
| 6 | 3.81 | 410 | 693 | 0.3009 |
| 7 | 4.10 | 410 | 212 | 0.0990 |
| 8 | 4.30 | 410 | 1041 | 0.5096 |
| 9 | 3.41 | 410 | 170 | 0.0660 |
| 10 | 4.00 | 410 | 1491 | 0.6796 |
| 11 | 3.63 | 410 | 274 | 0.1131 |
| 12 | 4.01 | 410 | 447 | 0.2043 |
| 13 | 4.30 | 410 | 340 | 0.1663 |
| 14 | 4.09 | 410 | 340 | 0.1584 |

Copyright © 2021 IJEIR, All right reserved

| No | I (A) | U (V) | Time (s) | E (KWh) |
|---|---|---|---|---|
| 15 | 3.81 | 410 | 340 | 0.1475 |
| 16 | 3.92 | 410 | 340 | 0.1519 |
| 17 | 3.80 | 410 | 340 | 0.1473 |
| 18 | 3.77 | 410 | 340 | 0.1458 |
| 19 | 3.78 | 410 | 340 | 0.1464 |
| 20 | 3.68 | 410 | 340 | 0.1424 |

| No | X1 | X2 | X3 |
|---|---|---|---|
| 1 | + | + | + |
| 2 | - | + | + |
| 3 | + | - | + |
| 4 | - | - | + |
| 5 | + | + | - |
| 6 | - | + | - |
| 7 | + | - | - |
| 8 | - | - | - |
| 9 | +alpha | 0 | 0 |
| 10 | -alpha | 0 | 0 |
| 11 | 0 | +alpha | 0 |
| 12 | 0 | -alpha | 0 |
| 13 | 0 | 0 | +alpha |
| 14 | 0 | 0 | -alpha |
| 15 | 0 | 0 | 0 |

(a)

| No | t (mm) | F(mm/min) | n (rev/min) |
|---|---|---|---|
| 1 | 5 | 600 | 4000 |
| 2 | 1 | 600 | 4000 |
| 3 | 5 | 400 | 4000 |
| 4 | 1 | 400 | 4000 |
| 5 | 5 | 600 | 2400 |
| 6 | 1 | 600 | 2400 |
| 7 | 5 | 400 | 2400 |
| 8 | 1 | 400 | 2400 |
| 9 | 5.43 | 500 | 3200 |
| 10 | 0.57 | 500 | 3200 |
| 11 | 3 | 621.5 | 3200 |
| 12 | 3 | 378.5 | 3200 |
| 13 | 3 | 500 | 4181 |
| 14 | 3 | 500 | 2188 |
| 15 | 3 | 500 | 3200 |
| 16 | 3 | 500 | 3200 |
| 17 | 3 | 500 | 3200 |
| 18 | 3 | 500 | 3200 |
| 19 | 3 | 500 | 3200 |

(b)

Fig. 4. Experimental matrix table.

Based on the theory of orthogonal experimental planning at level 2 [35] and the experimental results in Table 3, the basic parameters for the construction of the regression equation are determined. The number of experiments in the center is $m = 4$ (values of experiments in the center are shown from hole 16 to hole 19). The number of degrees of freedom corresponding to the number of experiments in the center is $f = m - 1 = 3$. The confidence probability is 95%. The STUDENT [36] distribution criterion is $t(0.05, 3) = 3.182446$. From calculating the coefficients of the regression equation, the standard deviations of these coefficients and comparing them with the STUDENT criterion, a mathematical equation that describes the relationship between cutting parameters and energy consumption in HSRM for alloy steel SKD11 after heat treatment is calculated and described as follows

$$E = 0.18743 - 0.18375x_1 - 0.050742x_2 + 0.0392x_1x_2 + 0.1162x_1^2 - 0.02873x_2^2 - 0.02626x_3^2 \quad (2)$$

To evaluate the reliability of the regression equation, calculate the compatible variance value of $S_{tt}^2 = 0.0029$, the recurrence variance value is $S_{th}^2 = 0.00008$, the calculated FISHER criterion is $F = 1.0467$, this value is much smaller than the value. The standard value corresponding to the 95% confidence level is $F_{0.05}(8;3) = 17.007$. Therefore, the regression equation ensures reliability. The regression equation reconstructed on the ANOVA module of DESIGN EXPERT 12 software also gives similar results (Fig. 5).

Change the variable back to the cutting parameters

$$x_1 = \frac{t - t_0}{\Delta t}; x_2 = \frac{F - F_0}{\Delta F}; x_3 = \frac{n - n_0}{\Delta n} \quad (3)$$

Copyright © 2021 IJEIR, All right reserved

Where, $t_0, F_0$ and $n_0$ are the cutting parameters at the basic level. $\Delta t, \Delta F$ and $\Delta n$ are the range of the cutting parameter variation. The regression equation is rewritten according to the cutting parameters as follows

$$E = 0.18743 - 0.18375\frac{(t - t_0)}{\Delta t} - 0.050742\frac{(F - F_0)}{\Delta F} + 0.0392\frac{(t - t_0)}{\Delta t}\frac{(F - F_0)}{\Delta F} + \\ +0.1162\left(\frac{(t - t_0)}{\Delta t}\right)^2 - 0.02873\left(\frac{(F - F_0)}{\Delta F}\right)^2 - 0.02626\left(\frac{(n - n_0)}{\Delta n}\right)^2 \quad (4)$$

where, $t_0 = 3; \Delta t = 2; F_0 = 500; \Delta F = 100; n_0 = 3200; \Delta n = 800$ and limited values: $0.57 \le t \le 5.43; 378.5 \le F \le 621.5; 2188 \le n \le 4181$.

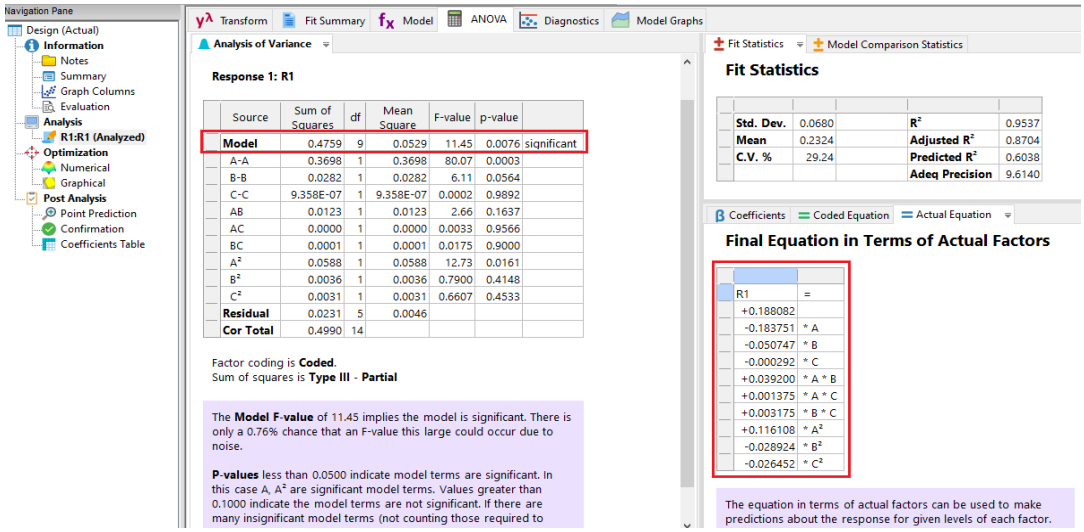



Fig. 5. Verification results on ANOVA/DESIGN EXPERT software.

## D. *Optimization of Cutting Parameters*

Objective is necessary to find the optimal cutting parameters to ensure the minimum the energy consumption in the machining process with the allowable limit conditions corresponding to the machining capabilities of CNC machines and cutting tools. Boundary conditions are the limit values of variables. The algorithm is built on the basis of the following conditions $-1.215 \le x_1, x_2, x_3 \le 1.215; E > 0,$ respectively limit the technological parameters are given as $55 \le V_c \le 105\ (m/min)$, $2188 \le n \le 4181(rev/min)$; $375.5 \le F \le 621.5(mm/min)$ and $0.57 \le t \le 5.43(mm)$. The PSO algorithm [37], [38] is used and its parameters are described in Table 4.

Table 4. PSO parameters.

| No | Parameters | Symbols | Value |
|---|---|---|---|
| 1 | Number of search loops | *MaxIt* | 100 |
| 2 | Initial particle swarm size | *npop* | 100 |
| 3 | The inertia coefficient | *w* | 1 |
| 4 | Acceleration coefficient for each individual | $c_1$ | 2 |
| | Acceleration coefficient of the particle swarm | $c_2$ | 2 |

Copyright © 2021 IJEIR, All right reserved

*Optimal Results*

The optimal calculation program is built on MATLAB software. The optimal value is found after the 7th iteration and the minimum energy value that can be achieved after is $Y_{Nlmin} = 0.005(KWh)$ at $x_1 = 0.5857,\ x_2 = 1.215,\ x_3 = -1.215.$ These optimal values correspond to the cutting parameters are $t = 4.17(mm), \mathrm{F} = 621.5(mm/ph), n = 2213(vg/ph)$ and $V_c = 55.6(m/ph).$

E. *Results and Discussion*

Evaluation of the effect of depth of cut (*t*) and feed speed (*F*) (Fig. 6)

Corresponding to the optimal value is $x_3 = -1.215,$ the energy consumption regression equation reflecting the influence of depth of cut and feed rate has the form as follows

$$E = 0.148753 - 0.18375x_1 - 0.050742x_2 + 0.0392x_1x_2 + 0.1162x_1^2 - 0.02873x_2^2 \quad (5)$$

*Evaluation of the Effect of Depth of Cut (t) and Cutting Speed ($V_c$) (Fig. 7)*

For the optimal value of $x_2 = 1.215,$ the energy consumption equation reflecting the influence of cutting depth and cutting speed has the form as follows

$$E = 0.083367 - 0.1361x_1 + 0.1162x_1^2 - 0.02626x_3^2 \quad (6)$$

*Evaluation of the Effect of Feed Speed (F) and Cutting Speed ($V_c$) (Fig. 8)*

According to the optimal value $x_1 = 0.5857,$ the energy consumption equation reflecting the influence of cutting depth and cutting speed has the form as follows

$$E = 0.11967 - 0.02774x_2 - 0.02873x_2^2 - 0.02626x_3^2 \quad (7)$$

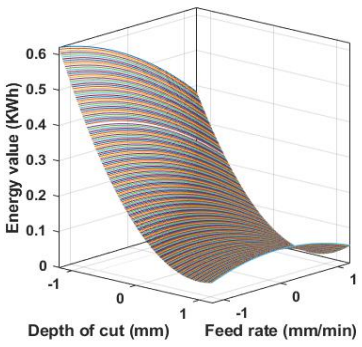



Fig. 6. Effect of depth of cut and feed rate.

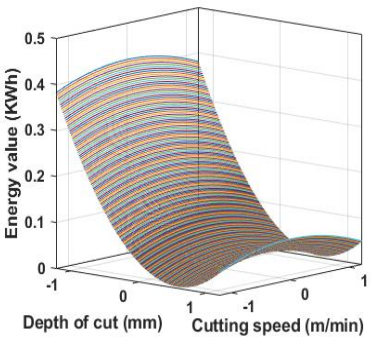



Fig. 7. Effect of depth of cut and cutting speed.

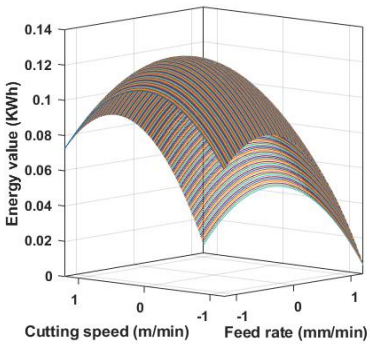



Fig. 8. Effect of feed rate and cutting speed.

From Fig. 6 it can be seen that the energy consumption is greater when the cutting depth and feed speed are smaller. In contrast, the larger the depth of cut and the feed rate, the smaller the energy consumption. At the highest feed rate, but the cutting depth is small, the energy consumption is still high. This shows that the depth of cut greatly affects the energy consumed in the machining process.

Copyright © 2021 IJEIR, All right reserved

It is easy to see the similarity between Fig. 6 and Fig. 7, the value of depth of cut greatly affects the energy consumption, cutting speed has an influence but not significant. Increasing the cutting speed does not consume much power. Not only that, the energy consumption shows signs of decreasing as the cutting speed continues to increase.

Fig. 8 shows that the energy consumption will be minimum when the feed rate is maximum and the cutting speed is maximum. The minimum cutting speed also allows the energy to be reduced. Clearly, increasing or decreasing the cutting speed does not affect energy consumption as much as increasing or decreasing the feed rate. If the feed rate and cutting speed are at an average level (zero level in the experiment), the energy consumption will be huge. For high-speed machining, the spindle speed is often very large, so the trend in machining programming to reduce energy consumption will be to try to increase the value of the feed rate.

## III. CONCLUSIONS

In general, the influence of cutting parameters on energy consumption of the CNC machine when high-speed roughing milling of alloy steel SKD11 after heat treatment has been considered. The optimal cutting parameters are also found according to the constraint condition of the variables and the objective function.

The research results can make some clear judgments as depth of cut has the greatest influence on energy consumption. The larger the depth of cut, the lower the energy consumption and the higher the machining productivity due to the reduction in time costs. However, it should be noted that increasing the depth of cut in hard alloy high-speed roughing will greatly affect the workability of the cutting tool (abrasion of the cutting tool, reduced tool life), cutting force and vibration may increase. Although the cutting speed does not affect the energy consumption as much as the feed rate but the cutting parameters clearly influence each other. Therefore, the selection of the optimal cutting mode needs to carefully consider the goals of the problem such as energy consumption, cutting force, vibration, cutting heat, and tool wear. Anyway, the results of this study also contribute to building a basis for evaluating the influence of cutting parameters and serving the multi-objective optimization problem when high-speed rough milling of hard alloy steels.

## REFERENCES

[1] H. Schulz, “The History of High-Speed Machining”, Revista de Ciencia and Tecnologia, 13, 1999, pp. 9-18.
[2] X. Cui, J. Zhao, “Cutting performance of coated carbide tools in high-speed face milling of AISI H13 hardened steel”, Int J Adv Manuf Technol, 2014, pp. 1811–1824.
[3] S. W. Kim, “Evaluation of machinability by cutting environments in high-speed milling of difficult-to-cut materials”, Journal of Materials Processing Technology, 111, 2001, pp 256-260.
[4] Z. Zhao, Y. Xiao, Y. Zhu, Bai Liu, “Influence of cutting speed on cutting force in high-speed milling”, Advanced materials research, 139-141, 2010, pp. 835-838.
[5] A.N. Fang, P. S. Pai, N. Edwards, “A comparative study of high-speed machining of Ti–6Al–4V and Inconel 718 - part I: effect of dynamic tool edge wear on cutting forces”, Int J Adv Manuf Technol, 2013.
[6] Y. Karpat, “Analytical and thermal modeling of high-speed machining with chamfered tools”, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 130 / 011001, 2008, pp. 01-15.
[7] M. Iqbal, M. Konneh, M.H. Bin, K.A. Abdallah, M.F.B. Binting, “Cutting temperature in high-speed milling of silicon carbide using diamond coated tool”, International Journal of Mechanical and Production Engineering, 2015, pp. 62-66.
[8] Z. Kang, S. Honghua, H. Linjiang, L. Yingzhi, “Vibration control of HSM of thin-wall titanium alloy components based on finite element simulation”, Materials Science Forum, 2016, pp. 304-310.
[9] M. Sekar, “Machining chatter analysis for high-speed milling operations”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 247, 2017, pp. 1-12.
[10] R.B. Silva, A.R. Machado, E.O. Ezugwu, J. Bonney, W.F. Sales, “Tool life and wear mechanisms in high-speed machining of Ti-6Al-4V alloy with PCD tools under various coolant pressure”, Journal of Materials Processing Technology, 213, 2013, pp. 1459-1464.
[11] X. Tian, J. Zhao, Jiabang Zhao, Z. Gong, Y. Dong, “Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools”, Int J Adv Manuf. Technol., 2013.
[12] R.S. Pawade, Suhas S. Joshi, “Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA)”, Int J Adv Manuf. Technol., 56, 2011, pp. 47-62.
[13] EIA, U.S. Energy-Related Carbon Dioxide Emissions, 2014.
[14] C.W. Park, “Energy consumption reduction technology in manufacturing - A selective review of policies, standards, and research”, In-

Copyright © 2021 IJEIR, All right reserved

-ternational Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 10, No. 5, 2009, pp. 151-173.
[15] F. Draganescu, "Models of machine tool efficiency and specific consumed energy", Journal of Materials Processing Technology, 141, 2003, pp. 9–15.
[16] A. Aggarwal, "Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi's technique-A comparative analysis", Journal of Materials Processing Technology, 200, 2008, pp. 373-384.
[17] Bhattacharya, "Estimating the effect of cutting parameters on surface finish and power consumption during high-speed machining of AISI 1045 steel using Taguchi design and ANOVA", Prod. Eng. Res. Devel, 3, 2009, pp. 31–40.
[18] N. Diaz, E. Redelsheimer, D. Dornfeld, "Energy consumption characterization and reduction strategies for milling machine tool use", glocalized solutions for sustainability in manufacturing: Proceedings of the 18th CIRP International 263 Conference on Life Cycle Engineering, 2011, pp. 263-267.
[19] R.A. Bhushan, "Optimization of cutting parameters for minimizing power consumption and maximizing tool life during machining of Al alloy SiC paeticle composites", Journal of Cleaner Production, 39, 2013, pp. 242-254.
[20] M. L. Calvanese, P. Albertelli, A. Matta, M. Taisch, "Analysis of Energy Consumption in CNC Machining Centers and Determination of Optimal Cutting Conditions", 20th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 2013, pp. 227-232.
[21] M. P. Sealy, Z. Y. Liu, D. Zhang, Y. B. Guo, Z. Q. Liu, "Energy consumption and modeling in precision hard milling", Journal of Cleaner Production, 2015, pp. 1-11.
[22] K. He, R. Tong, Z. Zhang, "Energy Consumption Prediction System of Mechanical Processes Based on Empirical Models and Computer-Aided Manufacturing", Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2016, pp. 1-10.
A. Franco, C. A. A Rashed, L. Romoli, "Analysis of energy consumption in micro-drilling processes", Journal of Cleaner Production, 2016, pp. 1-23.
[23] Aramcharoen, P. T. Mativenga, "Critical factors in energy demand modelling for CNC milling and impact of toolpath strategy", Journal of Cleaner Production, 2014.
[24] P. T. Mativenga, M. F. Rajemi, "Calculation of optimum cutting parameters based on minimum engorge footprint", CIRP Annals - Manufacturing Technology, 60, 2011, pp. 149-152.
[25] Hanafi, A. Khamlichi, F.M. Cabrera, E. Almansa, "Optimization of cutting for sustainable machining of PEEK-CF30 using TIN tools", Journal of Cleaner Production, 33, 2012, pp. 1-9.
[26] Q. Wang, F. Liu, X. Wang, "Multi-objective optimization of machining parameters considering energy consumption", Int J Adv Manuf Technol, 71, 2013, pp. 1133–1142.
[27] J. Yan, L. Li, "Multi-objective optimization of milling parameter- the trade-offs between energy, production rate and cutting quality", Journal of Cleaner Production, 2013, pp. 1-10.
[28] V.A. Balogun, P.T. Mativenga, "Modeling of direct energy requirements in mechanical machining processes", Journal of Cleaner Production, 41, 2012, pp. 179-186.
[29] Li, X. Chen, Y. Tang, L. Li, "Selection of optimum parameters in multi-pass face milling for maximum energy efficiency and minimum production cost", Journal of Cleaner Production, 2017, pp. 1-22.
[30] K.S. Sangwan, G. Kant, "Optimization of machining parameters for improving energy efficiency using integrated response surface methodology and genetic algorithm approach", The 24th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, 2017, pp. 517-522.
[31] H. Zhang, Z. Deng, Y. Fu, L. Wan, W. Liu, "Optimization of process parameters for minimum energy consumption based on cutting specific energy consumption", Journal of cleaner production, 2017, pp. 1-20.
[32] Web: https://www.gmc-instruments.de/en/products/mavowatt-230-set (Accessed on June 01, 2021)
[33] Web: http://extechvietnam.com/san-pham (Accessed on June 01, 2021)
[34] M. Wang, P. Liu, Y. Jia, Y. Zhao, B. Zhang, "Orthogonal experimental study on heat transfer optimization of backfill slurry with ice particles", Advances in Civil Engineering, vol. 2021, Article ID 6684822, 14 pages, 2021. https://doi.org/10.1155/2021/6684822.
[35] Bies, Robert R.; Muldoon, Matthew F.; Pollock, Bruce G.; Manuck, Steven; Smith, Gwenn; Sale, Mark E. (2006). "A genetic algorithm-based, hybrid machine learning approach to model selection." Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics. 33 (2): 196–221.
[36] J. Kennedy, and R. Eberhart, Particle swarm optimization, in Proc. of the IEEE Int. Conf. on Neural Networks, Piscataway, NJ, pp. 1942–1948, 1995.
[37] Jim Pugh and Alcherio Martinoli, "Distributed Adaptation in Multi-Robot Search using Particle Swarm Optimization", SAB'08 Proceedings of the 10th international conference on Simulation of adaptive behavior: From Animals to Animats, 2008.

## AUTHOR'S PROFILE

**First Author**
**Dao Van Duong,** Dong Nai Technical College, Vietnam.

**Second Author**
**Lai Anh Tuan,** Advanced Technology Center, Le Quy Don Technical University, Vietnam.

**Third Author**
**Do Tien Lap,** Advanced Technology Center, Le Quy Don Technical University, Vietnam.

**Fourth Author**
**Pham Van Tuan,** Advanced Technology Center, Le Quy Don Technical University, Vietnam.

**Fifth Author**
**Nguyen Tai Hoai Thanh,** Advanced Technology Center, Le Quy Don Technical University, Vietnam.

**Sixth Author**
**Le Cong Doan,** Advanced Technology Center, Le Quy Don Technical University, Vietnam.

**Seventh Author**
**Ngo Tan Loc,** Advanced Technology Center, Le Quy Don Technical University, Vietnam.

Copyright © 2021 IJEIR, All right reserved

**TỔNG BIÊN TẬP**
**DƯƠNG THANH BÌNH**

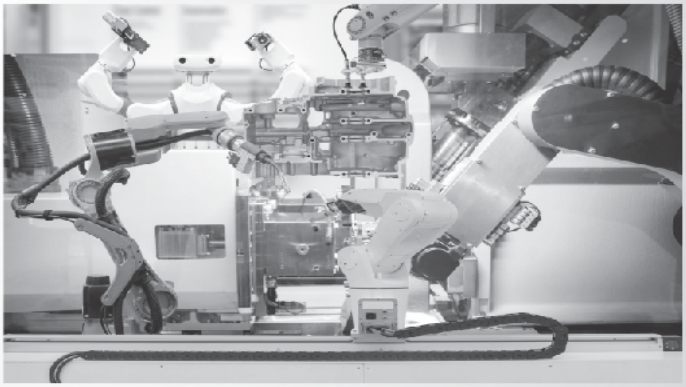
**PHÓ TỔNG BIÊN TẬP**
**NGUYỄN CHỈ SÁNG**
**HÀ DUY KHÁNH**
**VŨ NGỌC PI**

**HỘI ĐỒNG BIÊN TẬP**
TS. **ĐỖ HỮU HÀO** (Chủ tịch)
GS,TSKH. **BÀNH TIẾN LONG** (P. Chủ tịch)
KS. **TẠ QUANG MAI** (P. Chủ tịch)
TSKH. **PHAN XUÂN DŨNG**
PGS,TS. **HÀ MINH HÙNG**
PGS,TS. **TRƯƠNG VIỆT ANH**
GS,TS. **ĐINH VĂN CHIẾN**
GS,TSKH. **PHẠM VĂN LANG**
PGS,TS. **TRẦN ĐỨC QUÝ**
TS. **LƯƠNG VĂN TIẾN**
PGS,TS. **VŨ NGỌC PI**
GS,TS. **CHU VĂN ĐẠT**
PGS,TS. **TRẦN VĨNH HƯNG**
PGS,TS. **ĐÀO QUANG KẾ**
PGS,TS. **NGUYỄN VĂN BÀY**
PGS,TS. **ĐÀO DUY TRUNG**
PGS,TS. **LÊ THU QUÝ**
PGS,TS. **BÙI TRUNG THÀNH**
PGS,TS. **PHẠM VĂN HÙNG**
PGS,TS. **LÊ VĂN ĐIỂM**
GS,TS. **LÊ ANH TUẤN**
PGS,TS. **NGUYỄN HỮU LỘC**
PGS,TS. **DƯƠNG VĂN TÀI**
PGS,TS. **LÊ MINH LƯ**
TS. **NGUYỄN ĐĂNG THUẬN**
TS. **PHAN ĐĂNG PHONG**
TS. **TẠ NGỌC HẢI**
TS. **NGUYỄN PHI HÙNG**

**THIẾT KẾ MỸ THUẬT**
NGÂN GIANG

**Giá: 50.000 đồng**
*Tạp chí Cơ khí Việt Nam phát hành qua mạng lưới Bưu điện Việt Nam*

TẠP CHÍ
ISSN 2615 - 9910
# CƠ KHÍ VIỆT NAM
VIETNAM MECHANICAL ENGINEERING JOURNAL
CƠ QUAN CỦA TỔNG HỘI CƠ KHÍ VIỆT NAM
• cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn



❖ Mô phỏng động lực học kéo ô tô sử dụng truyền lực vô cấp
❖ Ảnh hưởng của nhiệt độ khuôn và nhiệt độ nhựa đến độ co rút của sản phẩm phun ép nhựa
❖ Xây dựng chương trình chẩn đoán động cơ ô tô sử dụng giắc chẩn đoán chip STN1170

SỐ 7 năm 2021

**TÒA SOẠN TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM**
Số 4 Phạm Văn Đồng (trong Viện Nghiên cứu Cơ khí), P. Mai Dịch, Cầu Giấy, Hà Nội
**Điện thoại:** (024) 3792 0650 **Hotline:** 0904 177 637 - 0982 254 465
**Email:** tcckvietnam@gmail.com
**Website:** cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

* * *

**Giấy phép hoạt động Tạp chí in và Tạp chí Điện tử của Bộ Thông tin và Truyền thông**
Số 378/GP-BTTTT, ngày 22 tháng 6 năm 2021

* * *

**In tại:** Nhà in Khoa học Công nghệ Hà Nội

**Văn phòng đại diện:**

**1. Tại TP. Hồ Chí Minh:**
- PGS,TS. **Bùi Trung Thành**
Phòng T4.0, Nhà T, Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh
Số 12 Nguyễn Văn Bảo, phường 4, quận Gò Vấp, TP. Hồ Chí Minh
**Điện thoại:** 0913 921 407
**Email:** tcck.tphcm@gmail.com

- PGS,TS. **Nguyễn Hữu Lộc**
Phòng 205, Nhà B11, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh,
số 268 Lý Thường Kiệt, phường 14, Quận 10, TP. Hồ Chí Minh.
**Điện thoại:** 0913 603 264
**Email:** nhloc@hcmut.edu.vn

**2. Tại tỉnh Quảng Ninh:**
- TS. **Hoàng Minh Thuận**
Trường Cao đẳng Công nghiệp và Xây dựng, Liên Phương, Phương Đông, Uông Bí, Quảng Ninh
**Điện thoại:** 0904 116 189
**Email:** minhthuan.tcckvn@gmail.com

**3. Tại Thái Nguyên:**
- PGS,TS. **Vũ Ngọc Pi**
Số 234 Phú Xá, TP. Thái Nguyên, tỉnh Thái Nguyên
**Điện thoại:** 0974 905 578
**Email:** vungocpi@tnut.edu.vn

**Phóng viên thường trú:**

**1. Tại Hải Phòng:**
- TS. **Lương Văn Tiến**
**Điện thoại:** 0913 267 366
**Email:** luongvantien@cic.edu.vn

# MỤC LỤC
# TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM SỐ 7/2021

Trang


**NGHIÊN CỨU-TRAO ĐỔI (5 -114)**

1. ThS**. Nguyễn Đức Trung:** Xây dựng chương trình chẩn đoán động cơ ô tô sử dụng giắc chẩn đoán chip STN1170..... 5
2. ThS. **Đỗ Khắc Sơn**: Mô phỏng động lực học kéo ô tô sử dụng truyền lực vô cấp..... 12
3. **Tăng Bá Đại, Nguyễn Văn Bằng:** Ảnh hưởng hàm lượng $mno_2$, $Tio_2$, $Sio_2$ trong thành phần trợ dung gốm hệ xỉ Aluminate-rutile đến độ cứng và tổ chức của mối hàn giáp mối..... 17
4. **Huỳnh Đỗ Song Toàn, Lê Minh Tài, Võ Thanh Tăng, Trần Phú**: Ảnh hưởng của nhiệt độ khuôn và nhiệt độ nhựa đến độ co rút của sản phẩm phun ép nhựa…..... 22
5. TS. **Vũ Hải Quân**, TS. **Nguyễn Anh Ngọc,** TS. **Vũ Hoa Kỳ**: Phân tích và mô phỏng hệ thống treo chủ động cho mô hình ¼ xe sử dụng bộ điều khiển PID và LQR…..... 29
6. **Nguyễn Trọng Hiếu, Nguyễn Văn Sơn:** Nghiên cứu đặc tính truyền nhiệt của thiết bị hồi nhiệt trong hệ thống lạnh $co_2$ bằng phương pháp mô phỏng…..... 36
7. PGS, TS. **Lương Đình Thi**, KS. **Lê Đình Hoàng:** Ảnh hưởng của hydro đến tính năng kỹ thuật và phát thải của động cơ diesel tàu thủy..... 42
8. TS. **Phạm Thanh Nhựt:** Tính toán độ bền tấm vỏ tàu composite nhiều lớp bằng phương pháp giải tích…..... 47
9. **Phạm Văn Sáng**: Nghiên cứu mô phỏng số biến dạng của cánh ngầm tàu cao tốc và ảnh hưởng của biến dạng tới lực nâng của cánh…..... 51
10. **Nguyễn Tiến Dũng, Lê Quang Thắng, Nguyễn Thị Nam**: Ảnh hưởng tích hợp của vận tốc xe và tần số đánh lái đến ổn định của đoàn xe sơ mi rơ moóc khi chuyển làn đường đơn..... 58
11. **Hoàng Thị Kim Dung:** Nghiên cứu mô phỏng số sự hình thành tiếng ồn có nguồn gốc khí động….. 64
12. **Trần Văn Đua, Phạm Đức Cường, Phạm Văn Đông, Nguyễn Xuân Chung, Nguyễn Quang Định**: Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng khí nitơ đến đặc tính lớp màng cứng TiN chế tạo bằng phương pháp phún xạ DC…..... 70
13. **Lê Thị Tuyết Nhung, Vũ Đình Quý:** Mô phỏng tấm composite chịu va chạm có sử dụng phần tử keo 78
14. **Phạm Văn Sáng:** Nghiên cứu mô phỏng số động lực học tàu cao tốc cỡ nhỏ…..... 83
15. **Bùi Long Vịnh, Nguyễn Ngọc Kiên:** Nghiên cứu xây dựng trình biên dịch NC-code từ hệ fanuc sang hệ sinumerik để gia công trên máy tiện CNC concept turn 450…..... 90
16. **Trần Văn Đăng, Khổng Vũ Quảng, Trần Đăng Quốc, Lê Đăng Duy**: Nghiên cứu xây dựng mô hình mô phỏng xe hybrid bằng phần mềm AVL-Cruise…..... 94
17. **Bùi Long Vịnh, Nguyễn Ngọc Kiên:** Nghiên cứu xây dựng phần mềm chuyển đổi mã lệnh NC để gia công trên máy phay CNC UCP600…..... 99
18. **Dao Van Duong, Lai Anh Tuan, Do Tien Lap, Pham Van Tuan, Nguyen Tai Hoai Thanh, Le Cong Doan, Ngo Tan Loc:** Optimization of cutting parameters in high-speed milling of hardened alloy steels SKD11 to improve the surface roughness…..... 103
19. **Pham Van Bach Ngoc, Dam Hai Quan, Bui Trung Thanh, Le Van Dam:** Optimization and 3D design of a 3-DOF translational parallel robot in surgery application…..... 109

**DOANH NGHIỆP – DOANH NHÂN (115 -116)**

- Khối Khoáng sản TKV: "Lửa thử vàng, gian nan thử sức"…..... 115

**VĂN HÓA - XÃ HỘI (117- 120)**

-Hàng ngàn người lao động được hỗ trợ lương ổ định cuộc sống..... 117

# OPTIMIZATION OF CUTTING PARAMETERS IN HIGH-SPEED MILLING OF HARDENED ALLOY STEELS SKD11 TO IMPROVE THE SURFACE ROUGHNESS

## TỐI ƯU HÓA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ KHI PHAY TINH CAO TỐC THÉP HỢP KIM CỨNG SKD11 NHẰM NÂNG CAO ĐỘ NHÁM BỀ MẶT

**Dao Van Duong[1], Lai Anh Tuan[2], Do Tien Lap[2], Pham Van Tuan[2], Nguyen Tai Hoai Thanh[2], Le Cong Doan[2], Ngo Tan Loc[2]**

[1]Dong Nai Technical College, Vietnam
[2]Military Technical Academy

**ABSTRACT**

*This paper focuses on evaluating the influence of cutting parameters of CNC machines on the surface roughness when high-speed finishing milling (HSFM) of alloy steel SKD11 after heat treatment (55HRC). At the same time, the optimal cutting parameters to ensure the minimum surface roughness are found through the particle swarm algorithm (PSO). The conditional optimization problem is bound to limit the values for the variables and limit the objective function. The experiments are carried out based on the level 2 orthogonal experimental method according to the Box-Wilson experimental model. The regression equation describing the relationship between the cutting parameters and the surface roughness is built based on the experimental results and ANOVA module on the DESIGN EXPERT 12 software.*

**Keywords:** *High speed milling; Alloy steel; Surface roughness; Optimization.*

**TÓM TẮT**

*Bài báo này, tập trung đánh giá ảnh hưởng của các thông số cắt gọt trên máy CNC tới độ nhám bề mặt chi tiết khi phay tinh cao tốc thép hợp kim SKD11, sau nhiệt luyện với độ cứng trên 55HRC. Đồng thời, các thông số cắt gọt tối ưu được tìm kiếm dựa trên thuật toán bầy đàn (PSO) nhằm đảm bảo độ nhám nhỏ nhất. Các điều kiện đảm bảo trong bài toán tối ưu cũng được xem xét với các giá trị giới hạn của các biến và hàm mục tiêu. Các thực nghiệm được thực hiện dựa trên phương pháp thực nghiệm trực giao cấp 2, theo mô hình thực nghiệm Box-Wilson. Phương trình hồi quy nhằm mô tả mối quan hệ giữa các thông số công nghệ và độ nhám bề mặt được thiết lập dựa trên các kết quả thực nghiệm và modun ANOVA trong phần mềm DESIGN EXPERT 12.*

**Từ khóa:** *Phay cao tốc; Thép hợp kim; Độ nhám bề mặt; Tối ưu hóa.*

## 1. INTRODUCTION

The problem of high-speed machining (HSM) of hard alloys has been interested in research in the world for many years. Surface roughness is one of the most important factors to evaluate machining quality because it is the result that most clearly shows the influence of factors that are cutting force, cutting heat, vibration, and tool wear. Moreover, surface roughness is directly related to working conditions, durability, wear resistance, chemical corrosion, surface hardening, etc. Therefore, surface roughness is an important factor focused in most of the studies on high-speed machining [1-8]. Research on surface roughness in high-speed machining of hard alloys is typical with some works such as [9-19].

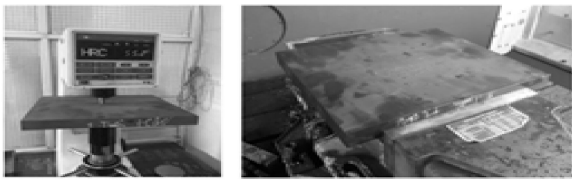
Ozel [9] studied the cutting force combined with surface roughness during high-speed finishing for AISI H13 alloy steel (50-55 HRC). Workpiece hardness, cutting tool geometry, cutting speed, and feed rate directly affects the surface roughness. Lawani [11] Experimental high-speed finishing of MDN 250 alloy steel (50HRC) showed that the feed speed greatly affects the surface roughness according to a 2nd order nonlinear model cutting affects the surface roughness less than the feed rate. Mafoudi [12] studied tool wear and surface roughness during high-speed machining of AISI 4140 hard alloy (50HRC) with PCBN coated knives. Experimental results show that the surface roughness is best when the cutting speed is at 300-400 (m/min), the feed speed is 0.05 (mm/rev), the cutting width is 0.5 (mm), the author does not mention to the depth of cut. Aouici [14] studied high-speed machining of AISI H11 alloy steel (50HRC) with CBN coated cutting tools, it was confirmed that cutting speed has the most influence on surface roughness. Senthikumar [15] empirically studied surface roughness and tool wear when machining Inconel 718 high-speed turning. Cutting speed is the most influential factor on surface roughness. Padawe [16] used the Taguchi experimental method to study the influence of technological parameters on the cutting force and surface roughness when high-speed machining of Inconel 718 alloy. The results of the study show that the feed rate has the strongest influence on surface roughness. Tian [18] studied the cutting force, abrasion, and roughness during HSM of Inconel 718 with Sialon ceramic knife material. The study confirms that forward milling gives higher surface roughness than inverse milling. Cui [19] and colleagues studied the chip formation process and surface roughness when milling the AISI H13 steel plane, the study showed that when the cutting speed exceeds 1400 m/min, the initial surface roughness The head will become weaker then gradually increase with the increase of cutting speed.

This article establishes high-speed finishing experiments for holes with a diameter of 22mm with SKD11 alloy steel material after heat treatment reaching hardness above 55HRC in order to evaluate the influence of cutting parameters on the roughness surface. From there, propose a direction to improve surface roughness and improve machining quality. The experimental model is set up according to the Box-Wilson model and the second-order orthogonal experimental method. The regression equation describing the relationship between the cutting parameters and the surface roughness is built based on the ANOVA module of the section DESIGN EXPERT software 12. PSO search algorithm is used to find the optimal cutting parameter values to ensure the minimum wall surface roughness of holes.

## 2. MATERIALS AND METHODS

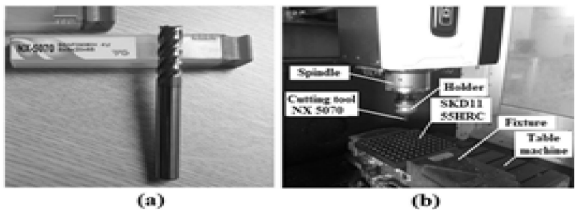
### 2.1. Experimental design

The experimental objective of HSFM of alloy steel SKD11 after heat treatment (55HRC) is to determine the relationship between cutting parameters (depth of cutting, feed rate, and spindle speed) in HSFM with surface roughness through the regression equation. This equation is built based on the level 2 orthogonal empirical method. The workpiece material is SKD11 (Japanese Standard JIS G4404). SKD11 workpiece was heat-treated in the Turbo-IPSEN furnace and hardness measured on an FR-1E/Hard machine (Fig. 1a). Hardness measurement results with the average value of SKD11 alloy steel workpiece after heat treatment reached 55 HRC (Fig. 1b). The cutting tool used for the experiment is a specialized high-speed carbide Endmill tool YG SGN09080H with cutting diameter is 8mm, shank diameter is 8mm, cutting length is 20mm, total tool length is 65mm with 4 cutting teeth (Fig. 2a). Regarding machining machines, experiments were carried out on HSM machines DMC1450V (Fig. 2b).



(a) (b)

*Fig 1. FR-1E/Hard hardness tester and SKD11 55HRC workpiece*




(a) (b)

*Fig 2. YG SGN09080H endmill and experimental model*

The roughness measuring device used is the device of Mitutoyo SJ-201 [20]. The results are displayed on the LCD screen, the measuring unit can be separated from the display unit, allowing the measurement of details with complex structures; Wide measuring range 350μm (-200μm to +150μm); The roughness parameters meet ISO, DIN, ANSI, and JIS standards; 19 parameters can be analyzed, of which basic parameters Ra, Rq, Rz, and Ry are guaranteed; Automatic calibration for simple gain adjustment when measuring; Measurement data can be transferred to a computer and other peripheral devices; AC Power or Battery can be flexibly used. High-speed finishing machining structures are the holes that have a diameter is 22mm, depth of holes is 11mm, finishing strategy is Profile.

The level 2 orthogonal experimental method is a nonlinear planning method, the structure has a center [3]. The number of influencing factors is 3 factors (cutting depth, feed rate, and spindle speed or cutting speed), the stepover parameter is fixed. The total number of experiments to be performed is 15. The $\alpha$ quantity is the distance from the center of the experimental structure to the position of points on the coordinate axis of the structure. Conventional influencing factors according to the variables are as follows, cutting depth t (mm) is $x_1$, the feed rate F (mm/min) is $x_2$ spindle speed n (rev/min) is $x_3$. The range of experimental cutting parameters value are specifically selected as shown in Tab 1.

*Table 1. Limited cutting parameters:*

| Cutting parameters | Low limit ($-\alpha$) | Low level (-1) | Standard level (0) | High level (+1) | Up limit ($+\alpha$) | Variables |
|---|---|---|---|---|---|---|
| t(mm) | 0.57 | 1 | 3 | 5 | 5.43 | $x_1$ |
| F(mm/min) | 378.5 | 400 | 500 | 600 | 621.5 | $x_2$ |
| $v_c$(m/min) | 55 | 60.3 | 80.4 | 100.5 | 105 | |
| n(rev/min) | 2188 | 2400 | 3200 | 4000 | 4181 | $x_3$ |
| $a_p$(mm) | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | |

### 2.2. Anova/design expert analyzing

The experimental matrix is coded and the experimental results are presented in Fig. 3. The analysis results from the ANOVA module on DESIGN EXPERT 12 software are depicted in Fig. 3b.

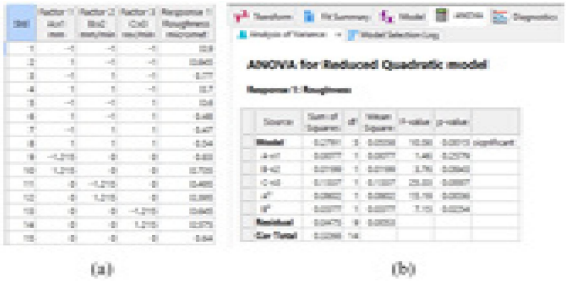



*Fig 3. Experimental matrix table and the analyzing results of the ANOVA*

According to Fig. 3b, the value of coefficient $F-value$ is 10.58 and the value of coefficient $p-value$ is 0.0015 to ensure a reliable regression model. The coefficients of the regression equation with $p-value$ less than 0.05 will be considered suitable to appear in the equation. Accordingly, the regression equation will not have coefficients of variables $x_1$ and $x_2$. The coefficients of variables $x_3$, $x_1^2$ and $x_2^2$ match and appear in the regression equation (Fig. 4).

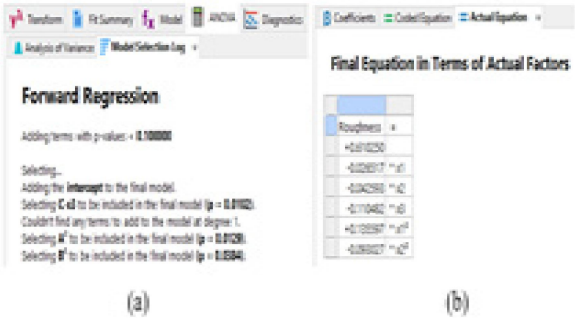



*Fig. 4. Analyzed Results of coefficients in the regression equation*

The mathematical equation that describes the relationship between cutting parameters and surface roughness in HSFM for alloy steel SKD11 after heat treatment is described as follows:

$$Y_{SR} = 0.61 - 0.11048x_3 + 0.1359x_1^2 - 0.0926x_2^2 \quad (1)$$

### 2.3. Optimization of cutting parameters

Objective is necessary to find the optimal cutting parameters to ensure the minimum the surface roughness in the machining process with the allowable limit conditions corresponding to the machining capabilities of CNC machines and cutting tools. Boundary conditions are the limit values of variables. The algorithm is built on the basis of the following conditions $-1.215 \le x_1, x_2, x_3 \le 1.215; Y_{SR} > 0$

Respectively limit the technological parameters are given as

$2.247 \le t \le 9.753; 575 \le F \le 825; 3800 \le n \le 5800$

The PSO algorithm [4], [9] is used and its parameters are described in Tab. 2.

*Table 2. PSO parameters*

| No | Parameters | Symbols | Value |
|---|---|---|---|
| 1 | Number of search loops | MaxIt | 100 |
| 2 | Initial particle swarm size | npop | 100 |
| 3 | The inertia coefficient | w | 1 |
| 4 | Acceleration coefficient for each individual | $c_1$ | 2 |
| 5 | Acceleration coefficient of the particle swarm | $c_2$ | 2 |

The optimal calculation program is built on MATLAB software. The optimal value is found after the 4th iteration and the minimum energy value that can be achieved after is $Y_{SR} = 0.34(\mu m)$ at $x_1 = 0, x_2 = -1.215, x_3 = 1.215$. These optimal values correspond to the cutting parameters are $t = 6(mm), F = 578.5(mm/ph), n = 5772(vg/ph)$ and


ISSN 2615 - 9910
TẠP CHÍ CƠ KHÍ VIỆT NAM, Số 7 năm 2021
cokhivietnam.vn / tapchicokhi.com.vn

$V_c = 145(m/ph)$.

**2.4. Results and Discussion**

Evaluation of the effect of depth of cut (t) and feed rate (F) (Fig. 5)

Corresponding to the optimal value $x_3 = 1.215$, the surface roughness equation reflecting the influence of depth of cut and feed rate has the form as

$$Y_{Nham} = 0.4755 + 0.1359x_1^2 - 0.0926x_2^2 \quad (2)$$

The increasing or decreasing depth of cut along with the feed rate increases the surface roughness value. At zero level of the depth of cut parameter and the lowest or highest feed rate will give a low roughness value. This value will increase gradually as the feed rate increases. However, if we continue to increase the feed rate even higher for a fixed depth of cut, the roughness value will gradually decrease. From the sensory curvature of Fig. 5, the depth of cut tends to change the roughness value more than the feed rate.

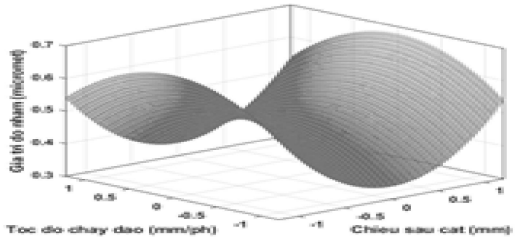



*Fig. 5. The effect of depth of cut (t) and feed speed (F)*

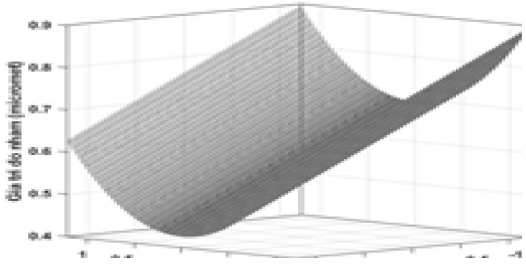



*Fig. 6. The effect of depth of cut (t) and cutting speed ($V_c$)*

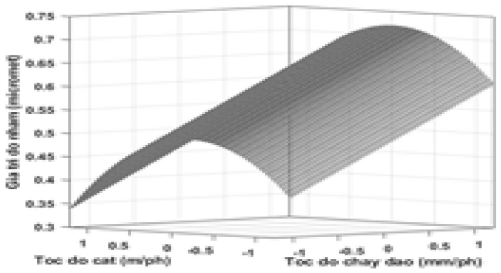



*Fig. 7. The effect of feed speed (F) and cutting speed ($V_c$)*

Evaluation of the effect of depth of cut (t) and cutting speed ($V_c$) (Fig. 6).

Corresponding to the optimal value $x_2 = -1.215$ the surface roughness equation has the form as

$$Y_{Nham} = 0.5603 - 0.11048x_3 + 0.1359x_1^2 \quad (1)$$

Fig. 6 illustrates quite well the complex influence of the depth of cut parameter on the roughness value larger than the cutting speed. The higher the cutting speed, the lower the roughness value, that is, the higher the surface quality and vice versa. The surface quality will be very low if the cutting speed is gradually reduced and the cutting depth is gradually increased or decreased.

Evaluation of the effect of feed rate (F) and cutting speed ($V_c$) (Fig. 7). Corresponding to the optimal value $x_1 = 0$, the surface roughness equation that depends on the feed rate and cutting speed has the form as

$$Y_{Nham} = 0.6097 - 0.11048x_3 - 0.0926x_2^2 \quad (2)$$

Fig. 7 clearly shows that increased cutting speed and small feed rate will increase surface quality in finishing milling. If the cutting speed is kept the same and the feed rate is increased, the surface quality will gradually decrease, corresponding to the gradual increase in the roughness value. ☞

## 3. CONCLUSIONS

In general, the influence of cutting parameters on surface roughness during high-speed finishing milling of alloy SKD11 after heat treatment has been analyzed in detail based on the powerful tools of the ANOVA module on DESIGN EXPERT 12 software. The experiments to build the regression equation are determined based on the Box-Wilson experimental model and the second-order orthogonal experimental method. Accordingly, the cutting parameters have a complex influence on the surface roughness. The lower the cutting speed, the greater the depth of cut, and the higher the feed rate, the surface quality is the lower. The results of analysis of the influence of cutting parameters show that the surface quality when high-speed milling of hard materials has some differences compared with high-speed milling of non-ferrous metals or alloys with low hardness. PSO search algorithm is used to find the optimal cutting parameter values to ensure the minimum wall surface roughness of holes. This research result has important value in choosing suitable cutting parameters when high-speed milling of hard materials to ensure surface quality and machining productivity.❖

## References:


[1]. M. Mitsuishi, "Development of an Intelligent High-Speed Machining Center", 2001, pp 01-06.

[2]. R. Sharma, "Latest Trends in Machining", 2001, pp. 01-201.

[3]. E. O. Ezugwu, "Modelling the correlation between cutting and process parameters in high-speed machining of Inconel 718 alloy using an artificial neural network", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45, 2005, pp. 1375-1385.

[4]. M. J. Ramírez, "Surface Roughness Modeling Based on Surface Roughness Feature Concept for High-Speed Machining", IMECE2005-82256.

[5]. A. B. Abdullah, "The Effect of Feed Rate and Cutting Speed to Surface Roughness", Asian Journal of Scientific Research, 1, 2008, pp. 12-21.

[6]. S. M. Reddy, "Optimization of surface roughness in high-speed end milling operation using taguchi's method", Journal Impact Factor, 4, 2013, pp. 249-258.

[7]. A. S. Awale, K. H. Inamdar, "Review on High-Speed Machining of Hard Material", Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, 3, 2015, pp. 517-524.

[8]. S. Anwar, S. U. Z. Khan, "Optimization of the end milling parameters for improving surface roughness using taguchi method", International Journal of Mechanical and Production Engineering, 2016, pp. 6-9.

[9]. T. Ozel, "Effects of cutting-edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 25, 2005, pp. 262-269.

[10]. F. M. Aneiro, "Turning hardened steel using coated carbide at high cutting speeds", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 30 (2), 2008, pp. 104-109.

[11]. D. I. Lalwani, "Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel", Journal of Materials Processing Technology, 206, 2008, pp. 167-179.

[12]. F. Mahfoudi, "High-speed turning for hard material with PCBN inserts: tool wear analysis", Int. J. Machining and Machinability of Materials, Vol. 3, Nos. 1/2, 2008, pp. 62-79.

[13]. S. Seguy, G. Dessenin, L. Arnaud, T. Insperger, "Chatter control by spindle speed variation in high-speed milling", ICSAAM 2009, Tarbes, France.

[14]. H. Aouici, M. A. Yallese, B. Fnides, T. Mabrouki, "Machinability investigation in hard turning of AISI H11 hot work steel with CBN tool", MECHANIKA, 86, 2010, pp. 71-77.

[15]. J. S. Senthilkumaar, P. elvarani, R. M. Arunachalam3, "Selection of Machining Parameters Based on The Analysis of Surface Roughness and Flank Wear in Finish Turning and Facing of Inconel 718 Using Taguchi Technique", Emirates Journal for Engineering Research, 15, 2010, pp. 7-14.

[16]. R. S. Pawade, Suhas S. Joshi, "Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA)", Int J Adv Manuf Technol, 56, 2011, pp. 47-62.

[17]. S.U. Honghua, L. Peng, F. Yucan, X. Jiuhua, "Tool Life and Surface Integrity in High-speed Milling of Titanium Alloy TA15 with PCD/PCBN Tools", Chinese Journal of Aeronautics,25, 2011, pp. 784-790.

[18]. X. Tian, J. Zhao, J. Zhao, Z. Gong, Y. Dong, "Effect of cutting speed on cutting forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools", Int J Adv Manuf Technol, 2013.

[19]. X. Cui, J. Zhao, "Cutting performance of coated carbide tools in high-speed face milling of AISI H13 hardened steel", Int J Adv Manuf Technol, 2014, pp. 1811–1824.

[20]. Web: https://www.mitutoyo.com/wp-content