

**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 SAU NHIỆT LUYỆN
TRÊN MÁY CNC**

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội - 2022

CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
HỌC VIỆN KỸ THUẬT QUÂN SỰ

Người hướng dẫn khoa học:

TS. Lại Anh Tuấn

TS. Đỗ Tiến Lập

Phản biện 1: PGS. TS Hoàng Văn Gọt

Phản biện 2: PGS. TS Nguyễn Huy Ninh

Phản biện 3: PGS. TS Đặng Ngọc Hiền

Luận án sẽ được bảo vệ tại Hội đồng đánh giá luận án cấp Học viện theo quyết định số 1675/QĐ-HV, ngày 13 tháng 05 năm 2022 của Giám đốc Học viện Kỹ thuật Quân sự, họp tại Học viện Kỹ thuật Quân sự vào hồi giờ ngày tháng năm 2022

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Học viện Kỹ thuật Quân sự
- Thư viện Quốc gia

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 kỹ 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.

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. Gia công cao tốc chính là giải pháp kỹ 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 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 với khả năng tích hợp và thích nghi cao đã mở đường cho nhiều loại hình gia công mới với nhiều giải pháp kỹ thuật mới. Trong đó, phương pháp gia công cao tốc được ứng dụng nhiều nhất.

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.

1. 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.

Một trong những đặc điểm chính của công nghệ gia công cao tốc là 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, Ti6Al4V, ...). 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.

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.

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.

2. 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.

3. 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.

4. 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 độ 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 nơtron.

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.

5. Cấu trúc luận án

Chương 1. Tổng quan về gia công cao tốc

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

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

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

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.

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, nhiệt cắt, rung động, mòn dụng cụ, tuổi bền dao, hình thái phoi, độ nhám bề mặt, bài toán tối ưu khi gia công cao tốc vật liệu độ cứng thấp. Bài toán năng lượng tiêu thụ trong quá trình gia công thông thường, vật liệu có độ cứng thấp thì có nhiều công trình nhưng trong gia công cao tốc, đặc biệt gia công cao tốc hợp kim cứng hầu như chưa thấy công trình công bố nào. Vấn đề về độ nhám bề mặt trong gia công cao tốc hợp kim có độ cứng cao cũng được xem xét trong một số công trình, gắn liền với nghiên cứu về lực cắt, rung động và mòn dụng cụ. Bài toán độ chính xác kích thước trong gia công cao tốc nói chung và gia công cao tốc hợp kim cứng nói riêng hầu như chưa được xem xét.

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 sau nhiệt luyện ($>55\text{HRC}$) 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.

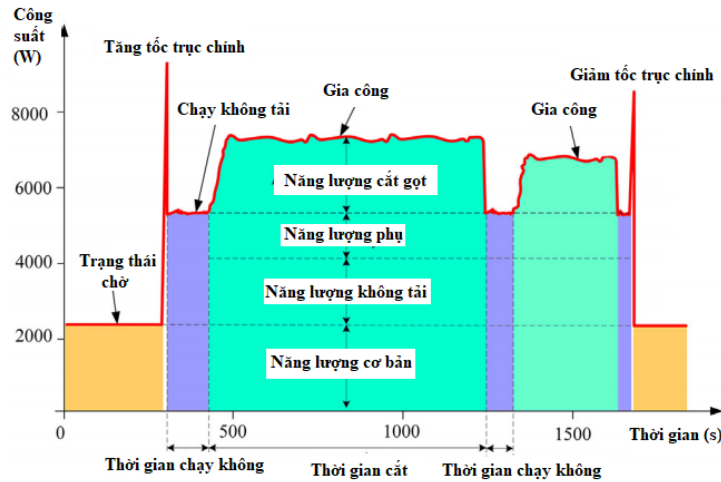
Kết luận chương 1

Những vấn đề cơ bản về gia công cao tốc nói chung và gia công cao tốc hợp kim cứng nói riêng đã được xem xét cụ thể trong chương này. Mô tả và phân tích được kết quả một số công trình nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ tới các yếu tố 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. 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



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

Hình 2.1 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 ứng với công thức tổng quát sau:

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

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

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. Hầu hết các công trình nghiên cứu đều cho thấy, 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.

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

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 nhưng 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, đơn cử như 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, hay nâng cao chất lượng bề mặt, giảm thiểu sai số gia công mới là đích đến cuối cùng. Do đó, tối ưu hóa các thông số công nghệ để đạt mục tiêu là một trong những lựa chọn hàng đầu.

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. Qua phân tích các ưu điểm, hạn chế của từng phương pháp thực nghiệm và yêu cầu cụ thể của nội dung nghiên cứu, luận án sử dụng phương pháp thực nghiệm quy hoạch trực giao cấp 2 vốn đã khá phổ biến.

Kết luận chương 2

Về cơ bản, cơ sở lý thuyết tính toán năng lượng tiêu thụ khi gia công phay cao tốc trên máy CNC và xác định phương án tính toán, phương án thực nghiệm xác định các đại lượng như công suất tiêu thụ, thời gian gia công, kích thước và độ nhám bề mặt đã được xem xét và đánh giá trong toàn bộ chương. Phương pháp thực nghiệm quy hoạch trực giao cấp 2 cũng được xem xét về mặt lý thuyết. Các bài toán thực nghiệm, phương pháp thực nghiệm, bài toán tối ưu cho nội dung các chương tiếp theo được xác định cụ thể.

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 nghiệm

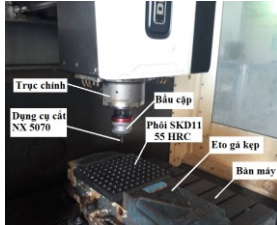
Mục tiêu thực nghiệm phay cao tốc thép sau nhiệt luyện nhằm xác định mối quan hệ giữa các yếu tố đầu vào (chế độ cắt), đầu ra (năng lượng tiêu thụ, độ nhám, độ chính xác kích thước) thông qua các hàm toán học.

a. Đầu vào bài toán thực nghiệm

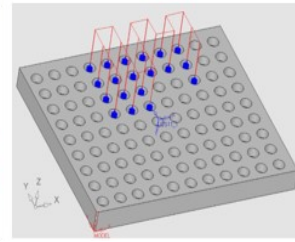
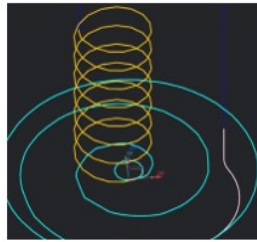
Loại hình gia công cắt gọt: phay cao tốc trên trung tâm gia công phay chuyên dụng DMG-DMC1450V (hình 3.7). *Kết cấu gia công:* phay cao tốc hốc tròn, lỗ không thông (hình 3.2). *Phôi gia công:* thép hợp kim SKD11 (Tiêu chuẩn Nhật JIS G4404), kích thước 300x250x25mm (hình 3.4). *Độ cứng phôi sau nhiệt luyện:* 55 HRC (hình 3.6). *Đồ gá gia công:* Eto đi kèm thiết bị gia công (hình 3.4). *Dụng cụ cắt:* dao phay cao tốc hợp kim cứng chuyên dụng YG SGN09080H, đường kính phần cắt $D_1=8\text{mm}$, đường kính chuôi dao $D_2=8\text{mm}$, chiều dài phần cắt $L_1=20\text{mm}$, chiều dài tổng của dao $L_2=65\text{mm}$, 4 răng cắt (hình 3.8). *Thiết bị đo lường:* thiết bị đo năng lượng MAVOWATT 230, thiết bị đo điện áp Kaise, cường độ dòng điện hiệu dụng Extech (hình 3.10 và 3.11), thiết bị đo độ nhám và dụng cụ đo kích thước (hình 3.11 và 3.12). *Thông số chế độ công nghệ:* chiều sâu cắt $t(\text{mm})$, tốc độ chạy dao $F(\text{mm/phút})$, tốc độ trục chính $n(\text{vòng/phút})$ hay vận tốc cắt $V_c(\text{m/phút})$. *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 $D16\text{mm}$ đến $D21.8\text{mm}$. *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 $D21.8\text{mm}$ đến $D22\text{mm}$.

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). 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.



Hình 3.7. Mô hình phay thực nghiệm



Hình 3.2. Chiến lược phay hốc tròn trên Unigraphics (NX)



Hình 3.4. Phôi thép sau nhiệt luyện



Hình 3.5. Thiết bị Turbo-IPSEN/Đức



Hình 3.6. Máy đo FR-1E/Hard Machine



Hình 3.7. DMG-DMC1450V



Hình 3.8. YG SGN09080H



Hình 3.9. AVOWATT



Hình 3.10. Thiết bị đo điện áp và dòng



Hình 3.11. Thiết bị đo độ nhám và máy đo CMM

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.

Kết quả gia công thử: 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. 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.



Hình 3.12. Vị trí các lỗ gia công

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

Bảng 3.1. 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 (α)	Các biến tương ứng
$t(mm)$	0.57	1	3	5	5.43	x_1
$F(mm/ph)$	378.5	400	500	600	621.5	x_2
$v_c(m/ph)$	55	60.3	80.4	100.5	105	x_3
$t(mm)$	2188	2400	3200	4000	4181	
$a_p(mm)$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	

Bảng 3.2. 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 (α)	Các biến tương ứng
$t(mm)$	2.25	3	6	9	9.75	x_1
$F(mm/ph)$	575	600	700	800	825	x_2
$v_c(m/ph)$	95.5	100.5	120.6	140.7	145.7	x_3
$n(vg/ph)$	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. Chế độ công nghệ được xác định tương ứng với các mức như đã xác định ở bảng ma trận thực nghiệm và được thể hiện ở bảng 3.4 và 3.5.

3.1.3. Thu thập kết quả thực nghiệm

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

TT	t (mm)	F (mm/ph)	V (vg/ph)	TT	t (mm)	F (mm/ph)	V (vg/ph)
1	5	600	4000	1	9	800	5600
2	1	600	4000	2	3	800	5600
3	5	400	4000	3	9	600	5600
4	1	400	4000	4	3	600	5600
5	5	600	2400	5	9	800	4000
6	1	600	2400	6	3	800	4000
7	5	400	2400	7	9	600	4000
8	1	400	2400	8	3	600	4000
9	5.43	500	3200	9	9.75	700	4800
10	0.57	500	3200	10	2.25	700	4800
11	3	621.5	3200	11	6	825	4800
12	3	378.5	3200	12	6	575	4800
13	3	500	4181	13	6	500	5800
14	3	500	2188	14	6	500	3800
15	3	500	3200	15	6	500	3200
16	3	500	3200	16	6	500	3200
17	3	500	3200	17	6	500	3200
18	3	500	3200	18	6	500	3200
19	3	500	3200	19	6	500	3200

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
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

TN	Y_{NL} (Kwh)	Y_{DK} (mm)	Y_{ss} (mm)	Y_{Nham} (μ m)
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 và kết quả thực nghiệm ở Bảng 3.6, ta xây dựng được phương trình hồi quy như sau:

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

3.2.2. Phương trình hồi quy ứng với đường kính lỗ

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

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

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

Sử dụng phần mềm DESIGN EXPERT/ANOVA để phân tích, kiểm chứng kết quả (các bước được mô tả chi tiết trong thuyết minh luận án) và cho kết quả hoàn toàn phù hợp với các tính toán theo phương pháp Quy hoạch trực giao cấp 2.

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

Ảnh hưởng của chiều sâu cắt: cho $-1.215 \leq x_1 \leq 1.215$ và $x_2 = x_3 = -1.215$.

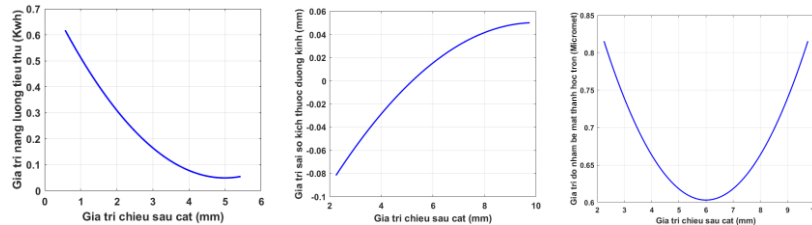
Kết quả thể hiện trên hình 3.30.

Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao: cho $-1.215 \leq x_2 \leq 1.215$ và $x_1 = x_3 = -1.215$.

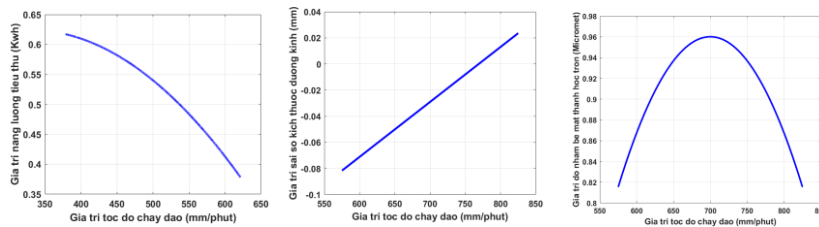
. Kết quả thể hiện trên hình 3.31.

Ảnh hưởng của tốc độ trục chính (vận tốc cắt): cho $-1.215 \leq x_3 \leq 1.215$ và $x_1 = x_2 = -1.215$. Kết quả thể hiện trên hình 3.32.

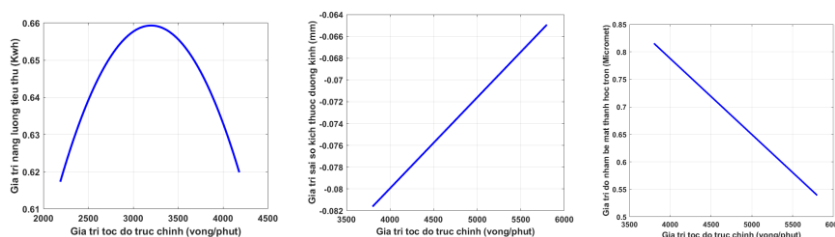
Đánh giá sơ bộ: Khi gia công thô, chiều sâu cắt tăng, tốc độ chạy dao tăng thì năng lượng tiêu thụ có xu hướng giảm. Khi vận tốc cắt tăng, năng lượng tiêu thụ ban đầu tăng, sau đó giảm dần. Khi gia công tinh, giá trị sai số kích thước có chiều hướng tăng theo xu hướng dung sai dương. Khi vận tốc cắt 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.



Hình 3. 1. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt



Hình 3. 2. Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao



Hình 3. 3. Ảnh hưởng của vận tốc cắt

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. 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.

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

4.1.1. Thuật toán di truyền (GA)

4.1.2. Thuật toán bầy đàn (PSO)

4.2. Tối ưu hóa đơn mục tiêu

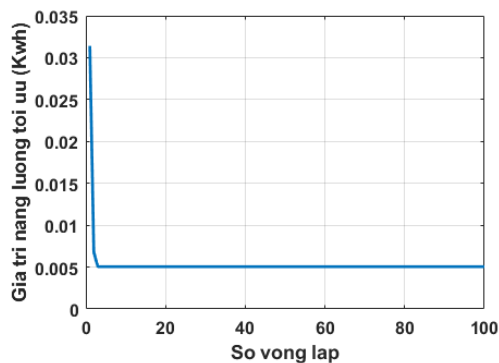
4.2.1. Tối ưu hóa năng lượng tiêu thụ khi phay thô cao tốc

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.

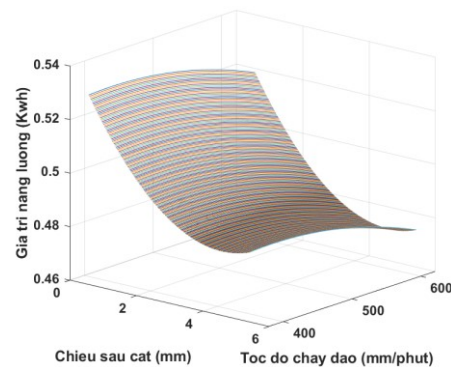
Bảng 4. 1. Thông số thuật toán PSO

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

Kết quả tối ưu



Hình 4.2. Giá trị năng lượng tối ưu trong thuật toán PSO



Hình 4.3. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao

Phân tích kết quả tối ưu

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 $Y_{N/min} = 0.005(Kwh)$ (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 $V_c = 55.6(m/ph)$.

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

Phương trình hồi quy năng lượng tiêu thụ phản ánh ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao có dạng:

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

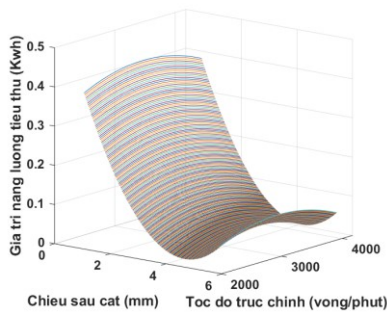
Từ hình 4.3 nhận thấy, năng lượng tiêu thụ càng lớn khi chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao càng nhỏ. Ngược lại, chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao càng lớn thì năng lượng tiêu thụ nhỏ. Khi tốc độ chạy dao cao nhất mà chiều sâu cắt nhỏ thì vẫn tiêu hao năng lượng lớn.

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

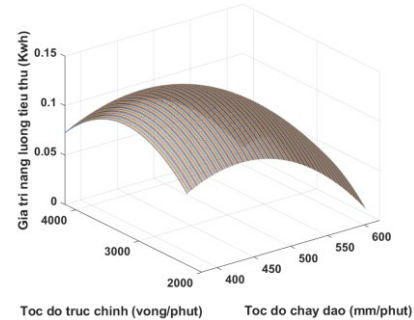
Phương trình hồi quy năng lượng tiêu thụ phản ánh ảnh hưởng của chiều sâu cắt và vận tốc cắt có dạng:

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

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.



Hình 4.4. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ cắt



Hình 4.5. Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao và tốc độ cắt

Việc tăng tốc độ cắt không làm tiêu hao nhiều năng lượng.

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

Phương trình hồi quy năng lượng tiêu thụ phản ánh ảnh hưởng của chiều sâu cắt và vận tốc cắt có dạng:

$$Y_{NL} = 0.11967 - 0.02774x_2 - 0.02873x_2^2 - 0.02626x_3^2 \quad (4.3)$$

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.

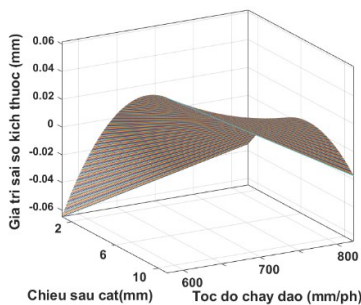
4.2.2. Nâng cao độ chính xác kích thước khi phay tinh cao tốc

Mục tiêu: cần tìm các thông số công nghệ đảm bảo sai số kích thước gia công là nhỏ nhất. 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 $-1.215 \leq x_1, x_2, x_3 \leq 1.215$ 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.

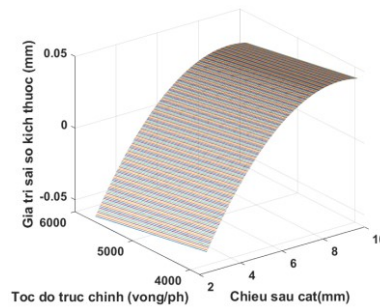
Kết quả đáp ứng yêu cầu $Y_{\min} = -0.02(mm)$.

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 $V_c = 139(m/ph)$.

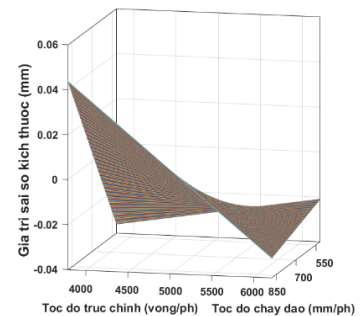
Đánh giá ảnh hưởng của chiều sâu cắt (t) và tốc độ chạy dao (F)



Hình 4.6. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao



Hình 4.7. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ cắt



Hình 4.8. Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao và tốc độ cắt

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).

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

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)

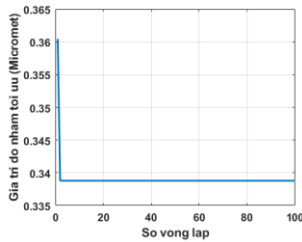
Hình 4.8 cho thấy, tốc độ chạy dao và tốc độ cắt tiến về mức trung bình thì sai số cũng tiến dần về 0. Tốc độ cắt nhỏ nhất hay lớn nhất và tốc độ chạy dao lớn nhất tạo ra sai số lớn nhất.

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

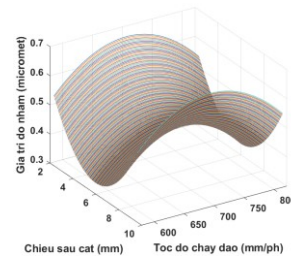
Mục tiêu: cần tìm các thông số công nghệ tối ưu đảm bảo độ nhám bề mặt thành lỗ là nhỏ nhất.

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 $Y_{nhám} = 0.34(\mu m)$ (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



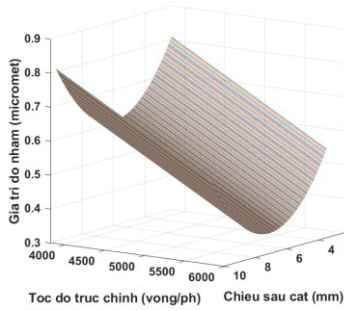
Hình 4.10. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ chạy dao

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

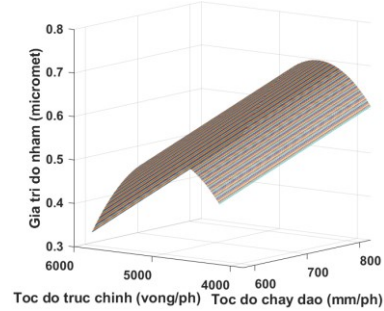
Chiều sâu cắt tăng dần hay giảm dần cùng với tốc độ chạy dao sẽ làm tăng giá trị độ nhám bề mặt.

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

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. 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 4.11. Ảnh hưởng của chiều sâu cắt và tốc độ cắt



Hình 4.12. Ảnh hưởng của tốc độ chạy dao và tốc độ cắt

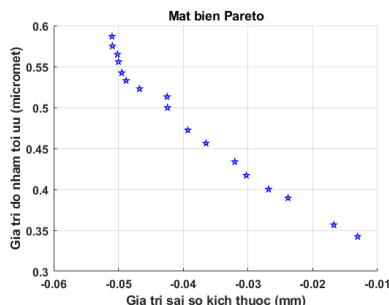
Đánh giá ảnh hưởng của tốc độ chạy dao (F) và vận tốc cắt (v_c)

4.3. Tối ưu hóa đa mục tiêu

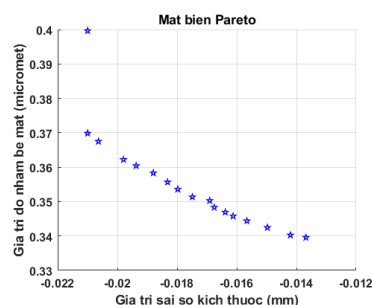
4.3.1. Phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu

4.3.2. Tối ưu hóa đa mục tiêu khi phay tinh cao tốc thép hợp kim sau nhiệt luyện

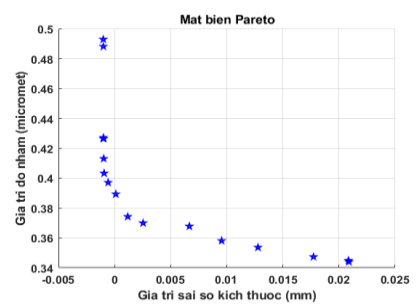
Trong trường hợp này, cần tìm được bộ thông số công nghệ phù hợp khi phay tinh cao tốc đảm bảo sai số kích thước là nhỏ nhất, độ nhám bề mặt thành lỗ là tốt nhất (nghĩa là giá trị độ nhám là nhỏ nhất). Hàm mục tiêu sai số kích thước được chia làm 3 trường hợp ứng với 3 miền giới hạn hàm mục tiêu sai 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). Kết quả bài toán tối ưu đa mục tiêu cho các trường hợp được thể hiện trong các hình 4.15, 4.16 và 4.17.



Hình 4.15. TH1



Hình 4.16. TH2



Hình 4.17. TH3

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 $n = 5760(vg/ph)$.

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.

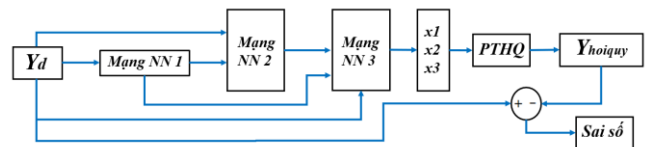
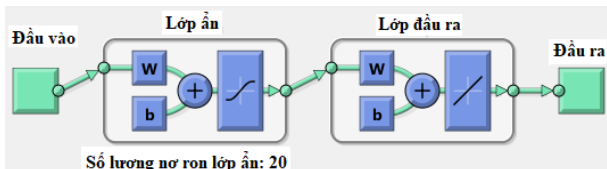
4.4.1. Bài toán thuận

4.4.2. Bài toán ngược

4.4.3. Lập bộ dữ liệu để huấn luyện mạng trí tuệ nhân tạo

4.4.4. Xây dựng cấu trúc mạng và huấn luyện mạng nơ ron

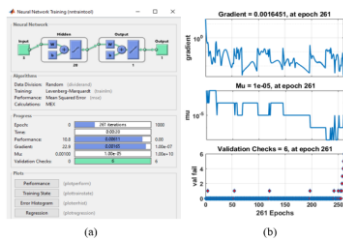
Mạng tổng thể được xây dựng theo 03 mạng nhỏ ứng với ba giá trị biến x_1, x_2, x_3 . Mô hình mạng được mô tả như hình 4.18. Sơ đồ mạng tổng thể được mô tả như hình 4.19.



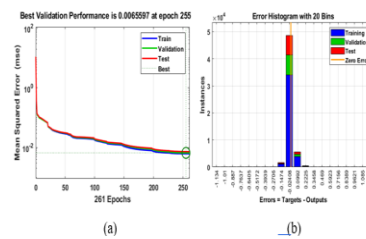
Hình 4.18. Mô hình mạng nơ ron Hình 4.19. Mô hình mạng tổng thể

4.4.5. Đánh giá độ tin cậy của mạng nơ ron

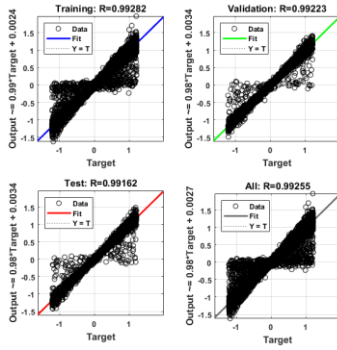
4.4.6. Dự đoán thông số công nghệ cho các hàm mục tiêu



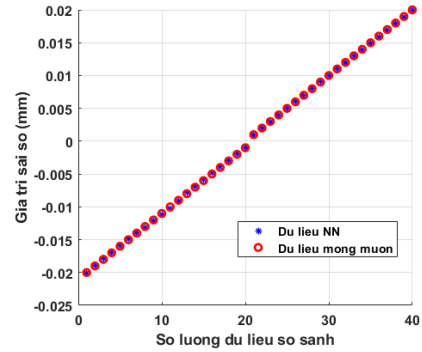
Hình 4.20. Kết quả huấn luyện mạng nơ ron



Hình 4.21. Kết quả đánh giá độ tin cậy của mạng NN sau huấn luyện



Hình 4.22. Phân bố dữ liệu giữa đầu ra của mạng và dữ liệu đích



Hình 4.23. So sánh dữ liệu hàm mục tiêu

Hình 4.22 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%.

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. 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

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] **Đào Văn Dưỡng**, Dương Xuân Biên, 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.