

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH GIÁM SÁT MÒN ĐÁ KHI GIA CÔNG HỢP KIM Ti_6Al_4V TRÊN MÁY MÀI PHẪNG

A RESEARCH FOR BUILDING THE MODEL OF MONITORING WHEEL WEAR
GRINDING WHEN MACHING Ti_6Al_4V ALLOY ON FLAT GRINDING MACHINE

Phạm Vũ Dũng, Đỗ Anh Tuấn

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Đến Tòa soạn ngày 14/02/2023, chấp nhận đăng ngày 12/04/2023

Tóm tắt: Quyết định thay dụng cụ phù hợp và đúng lúc là yêu cầu cấp thiết, nhằm tránh hư hỏng chi tiết hoặc thay dụng cụ không cần thiết. Giám sát trực tuyến tình trạng của dụng cụ là cần thiết đối với các máy công cụ hiện đại. Mài là quá trình, được đặc trưng bởi sử dụng đá mài có nhiều lưỡi cắt, chịu mài mòn không đồng nhất, vì vậy mòn đá mài là phức tạp nhất so với các loại dụng cụ cắt khác. Bài báo đề cập sự phát triển hệ thống giám sát mòn đá mài trên cơ sở ANN. Thiết lập được hệ giám sát trực tuyến mòn đá gồm DAQ và DSS. Xây dựng các quan hệ cơ bản trong quá trình mài, đặc biệt giữa mòn đá và các thông số đầu ra (lực cắt, rung động, độ nhám bề mặt...) sử dụng chúng trong giám sát mòn đá.

Từ khóa: Mài, mòn đá mài, giám sát quá trình mài...

Abstract: Appropriate and in-time decision for tool-change is urgently required to avoid damage of the workpiece or unnecessary change of the cutting tool. Reliable on-line tool condition monitoring is an essential feature of modern machine tools. Grinding is the process characterised by using tool with a high number of cutting edges undergoing non-uniform wear, so wheel wear is the most complicated in comparison with other cutting tools. This paper concerns with the development of a grinding wheel wear condition-monitoring system based on ANN model. Set up system on the on-line monitoring of rock wear including DAQ and DSS. Establish basic relationships in grinding process, especially between stone wear and output parameters (cutting force, vibration, surface roughness,...), use them in stone wear monitoring.

Keywords: Grinding, grinding wheel wear, monitoring the grinding process ...

1. MỞ ĐẦU

1.1. Đặt vấn đề

Vấn đề giám sát trực tuyến quá trình gia công, xuất hiện từ giữa thế kỷ trước, do nhu cầu giám sát thường xuyên chất lượng gia công, phát hiện sớm và phòng ngừa các sự cố có thể gây nên phế phẩm và mất an toàn, và phục vụ điều khiển thích nghi quá trình công nghệ.

Mài là quá trình gia công phức tạp nhất trong

các phương pháp gia công cơ, dụng cụ mài có đặc điểm là có vô số hạt mài trên bề mặt làm việc của đá mài, các hạt mài rất nhỏ, có kích thước, hình dáng, vị trí rất khác nhau và do đó điều kiện làm việc hoàn toàn khác nhau. Điều đó làm cho quá trình cắt của các hạt mài mang tính vi mô và ngẫu nhiên. Tính ngẫu nhiên càng rõ hơn do sự bong tróc của các hạt mài ra khỏi bề mặt làm việc của đá mài trong quá trình gia công. Việc nghiên cứu giám sát trực

tuyến (GSTT) quá trình mài là yêu cầu cần thiết.

1.2. Phương pháp nghiên cứu

Xây dựng khái niệm mòn đá là giảm khả năng cắt của đá, khả năng cắt, mòn và tuổi bền của đá liên hợp với nhau thành một mảng vấn đề quan trọng khi giám sát trực tuyến mòn đá. Trong quá trình mài, có nhiều yếu tố xuất hiện nhưng ở đây tác giả sử dụng trị số lực cắt đo được gián tiếp làm tín hiệu đầu vào để giám sát online mòn đá vì lực cắt là trung tâm, thông qua trị số lực cắt đo được ta có thể xác định được nhiều thông số khác như: rung động, tuổi bền, mòn đá, độ nhám bề mặt... Đặc biệt lực cắt là một thông số có thể dễ dàng đo được ngay trong quá trình mài.

1.2.1. Xây dựng thực nghiệm kiểm nghiệm các quy luật mòn đá

Các quy luật mòn đá bao gồm quy luật biến thiên của mòn đá theo thời gian và quy luật ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ đến mòn đá và đến tuổi bền của đá. Ứng với các bộ

thông số công nghệ khác nhau, xác định các quan hệ đánh giá mức độ mòn đá theo thời gian mài, dạng:

$$G=G(t); F=F(t); R_a=R(t) \quad (1)$$

Thời gian mài (t) có thể được thay bằng số hành trình mài (p), thể tích vật liệu bị mài (V),... Từ đây, có thể xác định các giá trị giới hạn, tương ứng tuổi bền của đá. Kết quả nhận được sẽ là các đồ thị thể hiện quy luật mòn đá.

Sau đó, xác định ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến các đại lượng đặc trưng cho mòn đá, dạng:

$$F_n = F_n(v_s, v_w, a) \text{ hay } F_n = F_n(h_{eq}) \quad (2)$$

$$F_t = F_t(v_s, v_w, a) \text{ hay } F_t = F_t(h_{eq}) \quad (3)$$

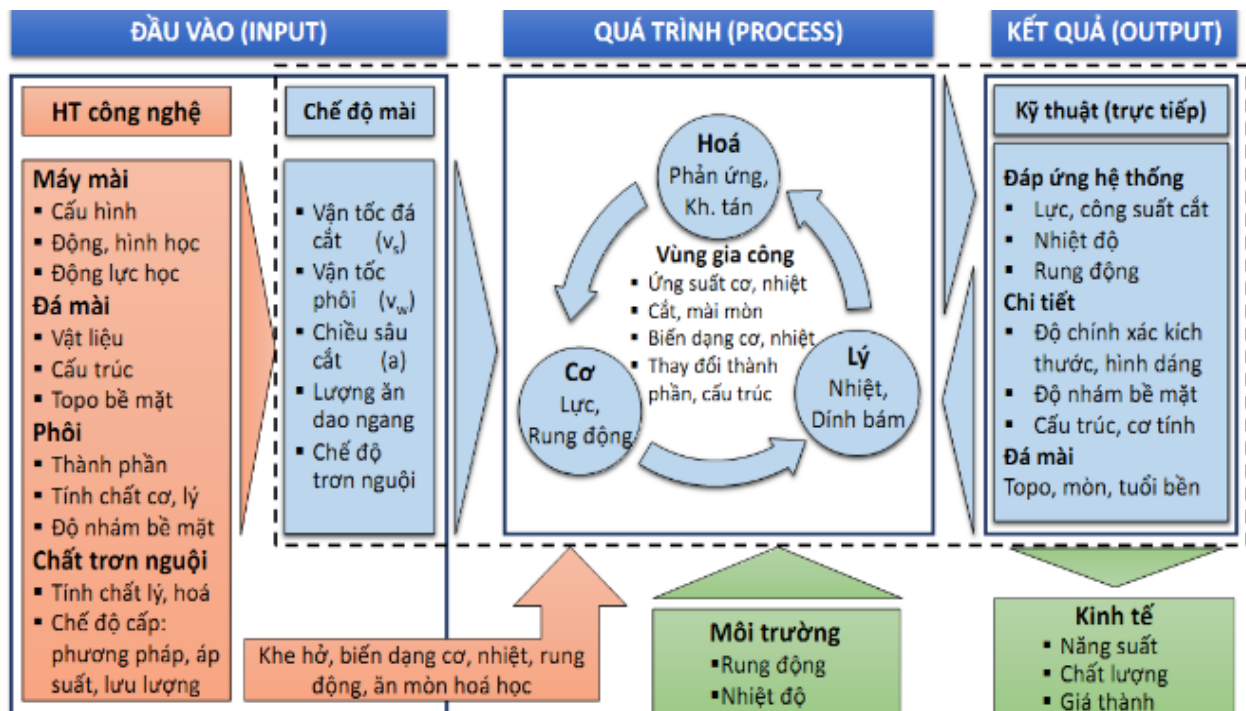
$$R_a = R(v_s, v_w, a) \text{ hay } R_a = R(h_{eq}) \quad (4)$$

$$R_{ad} = R(v_s, v_w, a) \text{ hay } R_{ad} = R(h_{eq}) \quad (5)$$

$$G = G(v_s, v_w, a) \text{ hay } G = G(h_{eq}) \quad (6)$$

$$\Delta V = \Delta V(v_s, v_w, a) \text{ hay } \Delta V = \Delta V(h_{eq}) \quad (7)$$

Các quan hệ trên sẽ được dùng để giám sát mòn đá. Ngoài ra, nhờ chúng có thể vẽ đồ thị mài hoặc tối ưu hoá chế độ công nghệ.



Hình 1. Mô hình tổng quát quá trình mài [8]

1.2.2. Xây dựng mô hình thực nghiệm giám sát mòn đá

Nhiệm vụ của thực nghiệm là xác định các đại lượng vào, gồm độ hạt của đá (S), các thông số công nghệ (v_s , v_w , a) hay h_{eq} và các đại lượng đặc trưng của độ mòn đá (G , R_a , R_{ad} , F_n , F_t) tại thời điểm giới hạn của tuổi bền. Các quan hệ này có dạng:

$$\Delta V' = \Delta V' (v_s, v_w, a, F_n) \quad (8)$$

$$R_a = R_a (v_s, v_w, a, F_n) \quad (9)$$

Nếu máy mài là máy CNC thì chế độ cắt thay đổi theo thời gian thực và có thể truyền trực tuyến cho máy tính giám sát. Lực F_n cũng đo được trực tuyến. Vì vậy các quan hệ (8) và (9) là cơ sở giám sát trực tuyến mòn đá cho máy CNC. Vì máy được sử dụng là máy vạn năng nên chế độ cắt không thay đổi, chỉ có F_n được đo trực tuyến. Trong trường hợp này, (8) và (9) đơn giản chỉ là:

$$\Delta V' = \Delta V' (F_n) \quad (8a)$$

$$R_a = R_a (F_n) \quad (9a)$$

Các quan hệ này dùng trong mô hình GSTT mòn đá cho máy vạn năng – trường hợp của bài báo.

1.3. Thiết lập hệ thống giám sát trực tuyến

1.3.1. Phần cứng

- Sensor lực kế 9257 BA;
- Hệ thống thu nhận dữ liệu DAQ, USB.

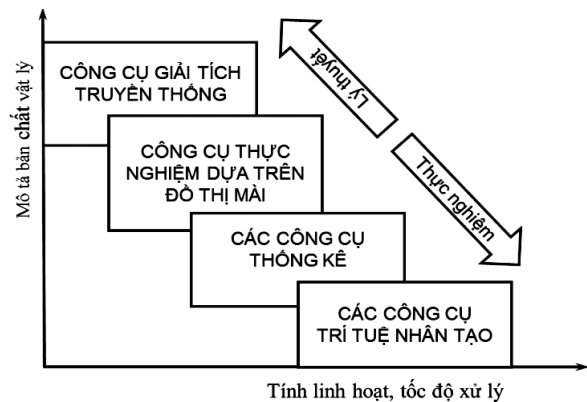
1.3.2. Phần mềm

Công cụ xử lý, thiết lập hệ trợ giúp ra quyết định (DSS). Các BT tĩnh, *off-line* dùng các PP thống kê (hồi quy, Taguchi) trong môi trường Microsoft Excel;

Các BT động, *online* với tín hiệu rời rạc dùng TTNT(ANFIS) trong Matlab;

Bài toán GSOL cảnh báo sửa đá dùng phần

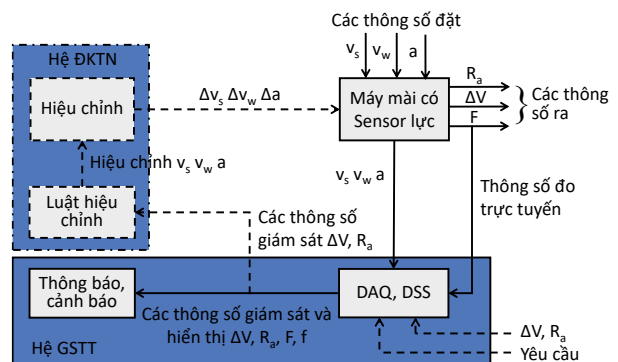
mềm DAQ chuyên dùng *DasyLab*. Để giám sát và đưa ra cảnh báo on-line mòn đá, thời điểm sửa đá.



Hình 2. Ứng dụng của các công cụ mô hình hóa quá trình mài

1.4. Đề xuất cấu trúc hệ GSTT quá trình mài

Hệ gồm có máy mài (CNC hoặc thường), có gắn sensor đo lực cắt và ghép on-line với hệ GSTT. Máy tính (PC) có ghép phần cứng DAQ và phần mềm DSS chịu trách nhiệm thu nhận, xử lý và đưa ra thông số cần giám sát ΔV và R_a (hình 3). Các thông số này được thông báo, cảnh báo cho người dùng trên màn hình máy tính, mặt khác có thể đưa vào modul xử lý của bộ ĐKTN để hiệu chỉnh chế độ cắt.



Hình 3. Sơ đồ chức năng đề xuất cho hệ thống GSTT

2. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

Thực nghiệm, thiết kế theo mảng trực giao đa yếu tố. Các BT tĩnh, *off-line* dùng các phương pháp thống kê (hồi quy, taguchi) trong môi trường Microsoft Excel. Các bài toán động

online với tín hiệu rời rạc dùng trí tuệ nhân tạo (ANFIS) trong Matlab, Bài toán giám sát online cảnh báo sửa đá dùng phần mềm DAQ chuyên dùng DasyLab.

2.1. Mô tả thí nghiệm

▪ **Máy mài:** Máy mài phẳng kiểu ESG-4080AH (Đài Loan - Trung Quốc).

▪ **Hệ thống đo, ghi lực cắt 3 thành phần gồm:** 9257BA, hộp điều khiển 5233A1, Bộ thu nhận tín hiệu (DAQ) kiểu NI USB-6008, Phần mềm thu thập, giám sát, điều khiển DasyLab ver.10.0. Thiết bị đo độ nhám bề mặt kiểu SJ-201 Mitutoyo (Nhật).

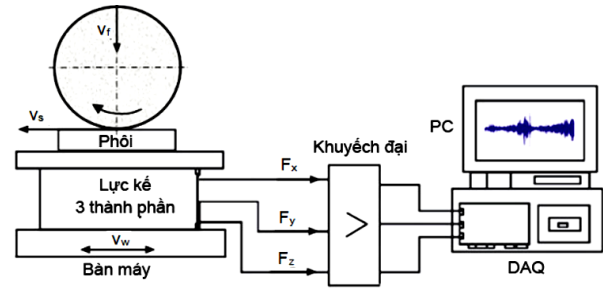
▪ **Đá mài:** Sx-S-TB2-G-V1-ds×40×127. Độ hạt S=(48, 60, 80); ds=(300, 350, 400); B=40; di=127; vận tốc tối đa 35 m/s.

▪ **Chế độ sửa đá:** mũi kim cương C9, chiều sâu cắt ad = 0,02 mm/ht; s = 0,5 m/ph;

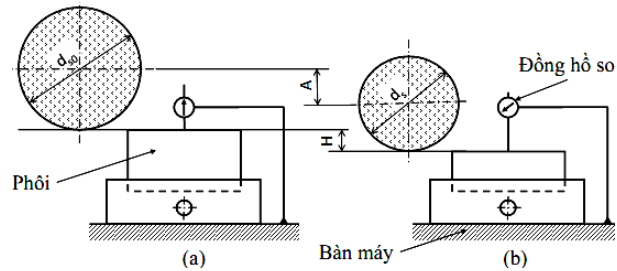
▪ **Phôi gia công:** Ti-6Al-4V, kích thước:

(L×b×h) = (100×10×20) mm.

▪ **Chế độ công nghệ:** n = 1450 v/ph, vs = [22, 26, 30] m/s, a = (0,01÷0,04)mm; vw = (6÷24) m/ph, hay (0,1÷0,4) m/s.



Hình 4. Sơ đồ nối ghép hệ thống đo lực



Hình 5. Sơ đồ đo lường mòn hướng kính của đá, từ đó tính tỷ số mài G cho trường hợp mài phẳng bằng mặt trụ của đá [8]

2.2. Thí nghiệm

2.2.1. Thí nghiệm kiểm nghiệm hệ thống

Kiểm nghiệm Quy luật biến đổi theo thời gian thực mài của một số thông số đầu ra, vốn được xem là đại diện cho khả năng cắt của đá:

$$G = G(t); F = F(t); R_a = R(t) \quad (10)$$

Do ảnh hưởng của rung động, số liệu ở hàng cuối cùng tăng đột biến nên sẽ được bỏ qua khi xây dựng các quan hệ thực nghiệm bảng 1.

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm đo mòn đá

| P (ht) | A(mm) | H(mm) | V'(mm ² mm) | F _n (N) | F _t (N) | R _a (μm) | R _{ad} (μm) | G |
|--------|-------|-------|------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|------|
| 10 | 0,1 | 0,097 | 9,7 | 11,21 | 6,06 | 1,75 | 0,81 | 2,57 |
| 20 | 0,2 | 0,192 | 1,92 | 31,53 | 9,3 | 1,85 | 0,85 | 1,91 |
| 30 | 0,3 | 0,286 | 28,6 | 49,45 | 16,22 | 2,05 | 0,98 | 1,63 |
| 40 | 0,4 | 0,38 | 38 | 69,21 | 25,86 | 2,2 | 1,12 | 1,51 |
| 50 | 0,5 | 0,473 | 47,3 | 87,53 | 47,42 | 2,55 | 1,25 | 1,39 |
| 60 | 0,6 | 0,564 | 56,4 | 135,69 | 75,42 | 3,15 | 1,65 | 1,25 |
| 70 | 0,7 | 0,65 | 65 | 467,69 | 205,98 | 2,45 | 2,45 | 1,03 |

Bảng 2. Tổng hợp kết quả khảo sát mòn đá

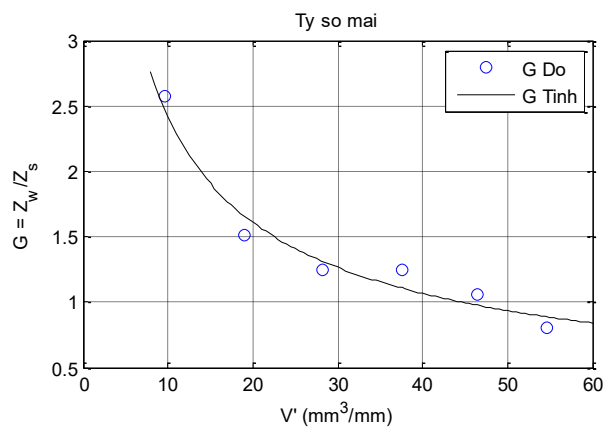
| Hệ số và số mũ | | | Đầu vào | Đầu ra (y = ax ^b) | | | | |
|-----------------|-------|-------|---------|-------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|-------|
| | a | b | x = V' | F' _n | F' _t | R _a | R _{ad} | G |
| F' _n | 0,052 | 1,362 | 10 | 1,158 | 0,455 | 1,604 | 0,725 | 2,467 |

| Hệ số và số mũ | | | Đầu vào | Đầu ra ($y = ax^b$) | | | | |
|----------------|-------|--------|---------|-----------------------|--------|-------|----------|-------|
| | a | b | $x=V'$ | F'_n | F'_t | R_a | R_{ad} | G |
| F'_t | 0,018 | 1,434 | 20 | 2,893 | 1,194 | 1,966 | 0,931 | 1,657 |
| R_a | 0,807 | 0,302 | 30 | 4,943 | 2,101 | 2,214 | 1,078 | 1,312 |
| R_{ad} | 0,313 | 0,371 | 40 | 7,228 | 3,136 | 2,41 | 1,195 | 1,112 |
| G | 9,449 | -0,591 | 50 | 9,707 | 4,28 | 2,573 | 1,296 | 1,979 |
| | | | 60 | 12,35 | 5,517 | 2,714 | 1,384 | 0,881 |

Nhiệm vụ của xử lý số liệu thí nghiệm là xác định các quan hệ (10), trong đó thời gian mài được tính bằng thể tích vật liệu được mài.

$$G = G(V'); F_n = F_n(V'); F_t = F_t(V')$$

$$R_a = R_a(V'); R_{ad} = R_{ad}(V') \quad (11)$$



Hình 6. Mòn đá trong quá trình mài

Các quan hệ thực nghiệm trên thường được biểu diễn dưới dạng hàm mũ. Sơ bộ quan sát đồ thị cũng cho thấy dạng hàm mũ ($y = a.x^b$), là phù hợp. Với hàm mũ, xử lý tĩn nên lấy logarit 2 vế rồi áp dụng phương pháp hồi quy tuyến tính.

- Khi đá bị mòn khả năng cắt của nó giảm, kết quả thu được phương trình (12).

$$G = 9.449(V')^{-0.591} \quad (12)$$

- Do mòn đá, lực cắt thay đổi theo thời gian như phương trình (13).

$$F'_n = 0.052(V')^{1.362} \quad (13)$$

$$F'_t = 0.018(V')^{1.434}$$

- Các phương trình độ nhám bề mặt, trước

và sau khi mài tia lửa (14)

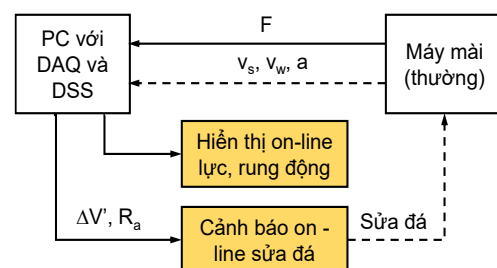
$$\begin{aligned} R_a &= 0.807(V')^{0.302} \\ R_{ad} &= 0.313(V')^{0.371} \end{aligned} \quad (14)$$

Từ kết quả tính toán có thể rút ra các nhận xét:

- Các phương trình và đồ thị thể hiện đúng quy luật và khá tương đồng với các nghiên cứu trước đây [6]. Mòn đá ảnh hưởng rõ nét và thống nhất đến khả năng cắt (G), lực cắt (F_n , F_t) và độ nhám bề mặt (R_a , R_{ad}). Vì vậy, quan sát bất cứ thông số nào ta cũng có thể dự báo thời điểm phải sửa đá (tuổi bền). Tuy nhiên, nếu không được sửa thì đá sẽ tự mài sắc.

Mòn đá là yếu tố tích lũy nên giá trị của nó thay đổi liên tục trong quá trình mài. Quy luật mòn đá là quy luật thay đổi của mức độ mòn theo thời gian thực mài, thường được tính bằng thể tích vật liệu phôi bị mài (V). Mòn đá khiến các thông số đầu ra, như lực cắt, rung động, nhám bề mặt... cũng thay đổi theo ngay cả khi chế độ mài không đổi. Điều này mở ra khả năng GSTT mòn đá (không đo được trực tiếp trong quá trình) thông qua các đại lượng đo được.

2.2.2. Thực nghiệm giám sát mòn đá



Hình 7. Mô hình tổng hợp GSTT mòn đá

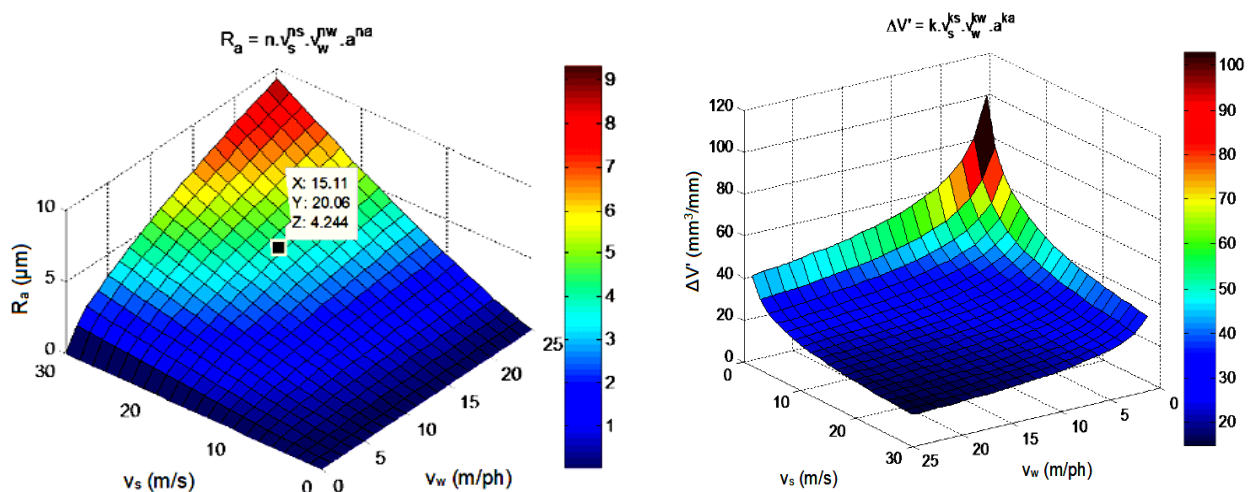
1. Dự báo mòn đá theo chế độ mài:

Khảo sát và dự báo đáp ứng đầu ra của quá trình khi biết trước điều kiện gia công (đầu

vào), các quan hệ sẽ xác định được từ thực nghiệm này cũng là cơ sở toán học cho GSTT mòn đá.

Bảng 3. Kết quả thí nghiệm

| Cấu trúc thí nghiệm | | | | Chế độ mài | | | | Số liệu đo các thông số đầu ra | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-----|------------|-------|-----|----------|--------------------------------|-------|-------|----------|------|-------------|
| TN | v_s | v_w | a | v_s | v_w | a | h_{eq} | F'n | F't | R_a | R_{ad} | G | $\Delta V'$ |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 22 | 0,10 | 10 | 0,05 | 4,26 | 4,25 | 1,42 | 1,01 | 2,84 | 34,22 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 22 | 0,25 | 25 | 0,28 | 14,14 | 10,07 | 3,76 | 2,82 | 1,97 | 21,17 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 22 | 0,40 | 40 | 0,73 | 17,75 | 12,73 | 6,21 | 3,84 | 1,63 | 16,92 |
| 4 | 2 | 1 | 3 | 26 | 0,10 | 40 | 0,15 | 9,65 | 6,52 | 3,30 | 2,29 | 2,02 | 24,14 |
| 5 | 2 | 2 | 1 | 26 | 0,25 | 10 | 0,10 | 10,35 | 6,70 | 3,01 | 1,69 | 2,22 | 25,03 |
| 6 | 2 | 3 | 2 | 26 | 0,40 | 25 | 0,38 | 20,67 | 14,10 | 6,12 | 3,63 | 1,68 | 17,63 |
| 7 | 3 | 1 | 2 | 30 | 0,10 | 25 | 0,08 | 11,89 | 7,16 | 3,15 | 2,17 | 2,06 | 24,72 |
| 8 | 3 | 2 | 3 | 30 | 0,25 | 40 | 0,33 | 20,24 | 13,64 | 6,81 | 4,00 | 1,56 | 17,36 |
| 9 | 3 | 3 | 1 | 30 | 0,40 | 10 | 0,13 | 16,89 | 11,98 | 4,76 | 2,53 | 1,87 | 20,49 |



Hình 8. Ảnh hưởng của v_s và v_w đến R_a và $\Delta V'$ ($a = 40\mu m$)

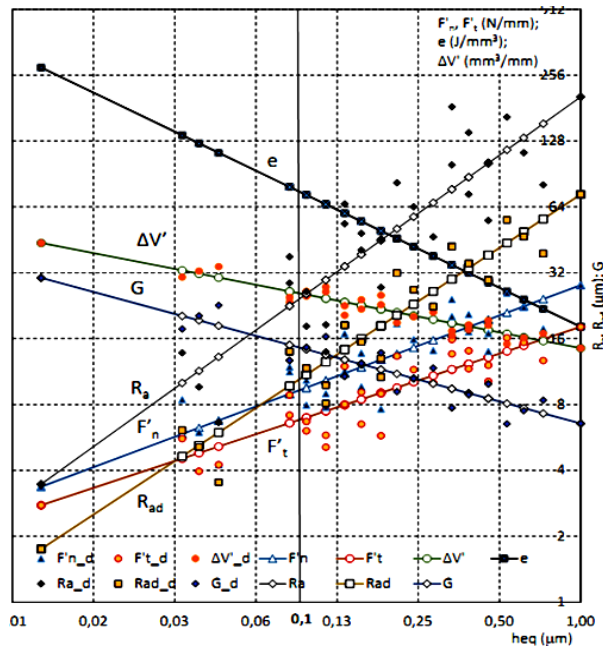
Từ đây, nhận được các quan hệ, mô tả ảnh hưởng của chế độ mài đến các thông số đầu ra theo dạng chung:

$$y = y_0 v_s^{x_s} v_w^{x_w} a^{x_a} (a) \text{ hoặc:}$$

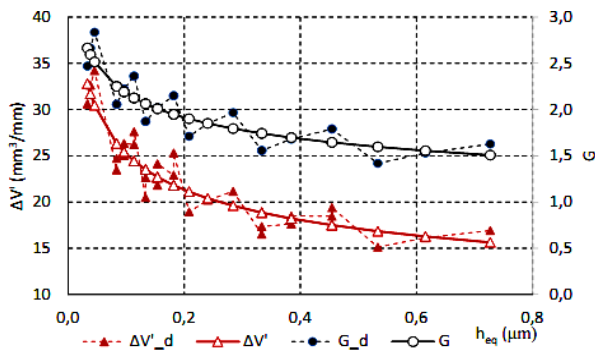
$$y = y_1 h_{eq}^{x_{eq}} (b) \quad (15)$$

Ảnh hưởng của chế độ cắt đến các đại lượng ra có thể được biểu diễn bằng các đồ thị 3D. Các đồ thị trên Hình 8 được vẽ làm ví dụ, các đồ thị khác có dạng tương tự. Ngoài cho phép

hình dung một cách trực quan và tổng thể các quan hệ, các đồ thị dạng này còn cho phép tra nhanh thông số đầu ra theo chế độ cắt. Ví dụ khi $v_s=15.11m/s$, $v_w=20.06m/ph$, $a=40\mu m$ thì $R_a=4,244\mu m$. Ảnh hưởng của h_{eq} đến các đại lượng ra được thể hiện trên đồ thị mài (hình 9) và các biểu đồ dạng hình 10 là đồ thị thể hiện tổng hợp các mối quan hệ cơ bản của quá trình mài.



Hình 9. Đồ thị mài ứng điều kiện thí nghiệm



Hình 10. Đồ thị theo phương trình (15) dạng (b)

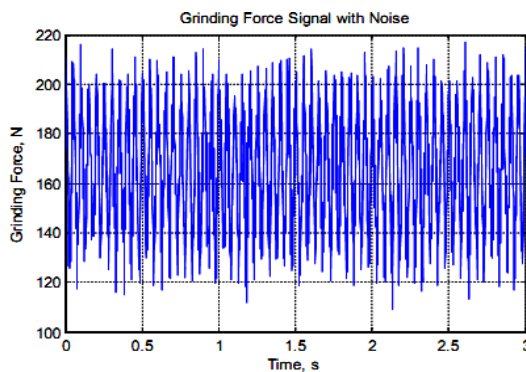
Kết luận: Mô hình hồi quy tuyến tính dạng (13) với các hệ số và số mũ trong Bảng 4 mô tả các quan hệ cơ bản của quá trình mài, cho phép dự báo các đại lượng ra theo chế độ mài. kiểm nghiệm ảnh hưởng của chế độ mài (v_s , v_w ,

a) đến các thông số đầu ra đại diện cho mòn đá (F_n , F_t , R_a , R_{ad} , G , ΔV), dạng (15). Quy hoạch thực nghiệm dựa trên mảng trực giao L9, dùng mô hình hồi quy tuyến tính nhiều yếu tố. Các hệ số và số mũ được tổng hợp trong Bảng 4. Kết quả được biểu diễn bằng đồ thị mài, đồ thị 2D và 3D. So sánh với các công trình đã công bố về mài HKTi cho thấy kết quả nhận được là tương đồng [7, 8].

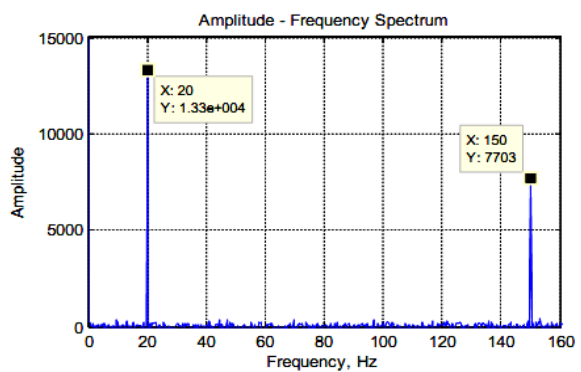
2. Thử nghiệm chức năng GSTTMD theo tín hiệu rung động và lực cắt

Kiểm nghiệm mối liên hệ lý thuyết giữa lực cắt rung động và mòn đá và kiểm tra khả năng của hệ thống. Vì vậy thực nghiệm trải qua 2 bước, tách được 2 tần số dao động tái sinh: Bề mặt phôi: tần số thấp, biên độ lớn. Bề mặt đá: tần số cao, biên độ nhỏ. Tín hiệu nhiễu: tần số thấp, biên độ lớn.

Phân tích FFT tín hiệu lực cắt, đo on-line nhờ sensor lực khi mài. Công cụ xử lý bằng phần mềm DasyLab. Thử nghiệm với tín hiệu lực cắt tự tạo (biết trước tần số, biên độ) và tín hiệu lực cắt đo khi mài với chiều sâu cắt thay đổi cho thấy phép FFT lực cắt phản ánh đúng quy luật nói trên. Hệ thống đã hiển thị các thành phần lực cắt, biên độ và tần số rung động, phát tín hiệu cảnh báo giới hạn sửa đá theo thời gian thực. Sau thử thách đạt yêu cầu, hệ thống được sử dụng chính thức vào giám sát rung động.

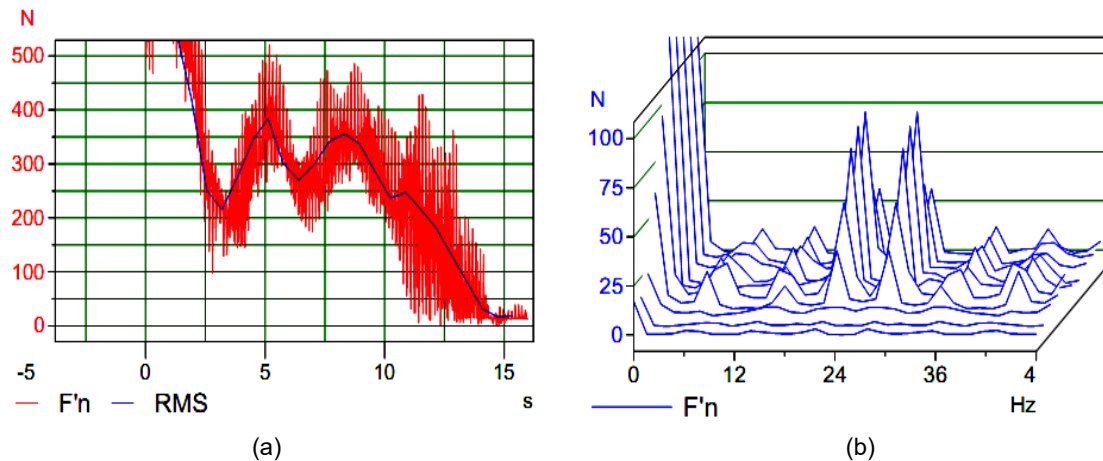


(a)



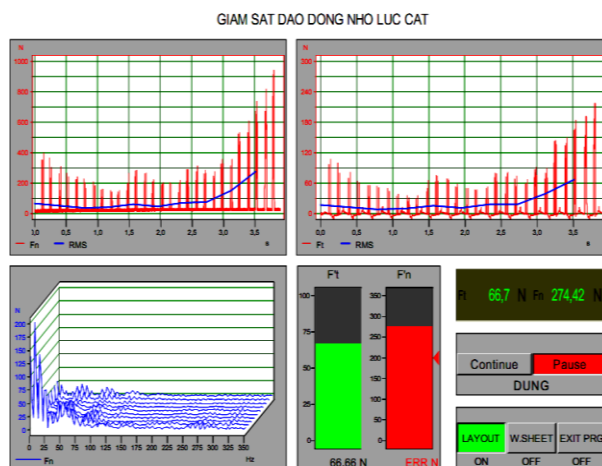
(b)

Hình 11. Tín hiệu lực cắt đo được (a) và phân tích FFT (b)



Hình 12. Tín hiệu lực cắt thực theo thời gian (a) và tần số (b)

Để tăng tiện ích sử dụng, một mặt máy ảo đã được thiết kế như trong hình 13, gồm các cửa sổ hiển thị tín hiệu theo thời gian của 2 thành phần lực cắt, đồ thị FFT của lực pháp tuyến F'_n , đồ thị dạng cột (*bar graph*) giá trị lực, ... Đặc biệt, trên cột F'_n có đặt ngưỡng tối đa, khi bị vượt thì chuyển sang màu đỏ, báo hiệu dừng cắt. Ngưỡng F'_n không đáng quan tâm với người dùng nên chức năng này chỉ có tác dụng thử nghiệm.



Hình 13. Màn hình GSTT mòn đá qua lực cắt và rung động

Ngoài ra, còn có các phím điều khiển ngừng (*pause*), chạy (*continue*); điều khiển chế độ hiển thị và thoát chương trình. Thử nghiệm cho thấy hệ thực hiện được các chức năng mong muốn. Dao động tái sinh do sóng bề

mặt phôi luôn xuất hiện ở tần số (50-75) Hz, dao động do bề mặt đá ở khoảng 275 Hz. Rung động được coi là xuất hiện khi F'_n vượt quá ngưỡng quy định xuất hiện F'_n vượt quá ngưỡng quy định.

3. Xây dựng mô hình giám sát trực tuyến mòn đá trong quá trình mài

Nhằm thực thi mô hình GSTT mòn đá.

- Đo trực tuyến lực cắt (F_n) thay cho công suất (P) của động cơ mang đá để nâng cao độ chính xác và tin cậy;
- Thay vì đo và nhập off-line giá trị R_a , ở đây tính toán on-line giá trị tuổi bền $\Delta V'$ và độ nhám R_a , (bảng 5) sử dụng chúng để giám sát on-line mòn đá và cảnh báo on-line thời điểm sửa đá;
- Bổ sung thông tin rung động, thu được từ modul phân tích FFT on-line tín hiệu lực cắt, đã được thử nghiệm thành công trong thực nghiệm trước, hệ thống có nhiệm vụ GSTT mòn đá, dùng cho máy mài thông thường. Tuy nhiên, để đón trước sự phát triển sau này, hệ thống được thiết kế như một modul trong hệ thống ĐKTN như đề xuất trong hình 3.
- Để xác định quan hệ giữa $\Delta V'$ và R_a với lực pháp tuyến F'_n theo dạng (8) và (9).

Trước hết, xác định quan hệ đầy đủ dạng (8) và (9). Bằng phương pháp HQT. Giá trị V , R được tính sẵn theo chế độ cắt và lưu trong

bảng 5. Chúng cho phép tính $\Delta V'$ và R_a theo thời gian thực.

Bảng 4. Tổng hợp kết quả dự báo mòn đá

| Đại lượng | Quan hệ dạng a | | | | | Quan hệ dạng (b) | | |
|-----------|----------------|--------|-------|-------|--------|------------------|------|--------|
| | y_o | x_s | x_w | x_a | $SS\%$ | y_i | h | $SS\%$ |
| F'_n | 0,052 | 1,362 | 10 | 1,158 | 0,455 | 1,604 | 0,73 | 2,467 |
| F'_t | 0,018 | 1,434 | 20 | 2,893 | 1,194 | 1,966 | 0,93 | 1,657 |
| R_a | 0,807 | 0,302 | 30 | 4,943 | 2,101 | 2,214 | 1,08 | 1,312 |
| R_{ad} | 0,313 | 0,371 | 40 | 7,228 | 3,136 | 2,41 | 1,2 | 1,112 |
| G | 9,449 | -0,591 | 50 | 9,707 | 4,28 | 2,573 | 1,3 | 1,979 |
| Δ | | | 60 | 12,35 | 5,517 | 2,714 | 1,38 | 0,881 |

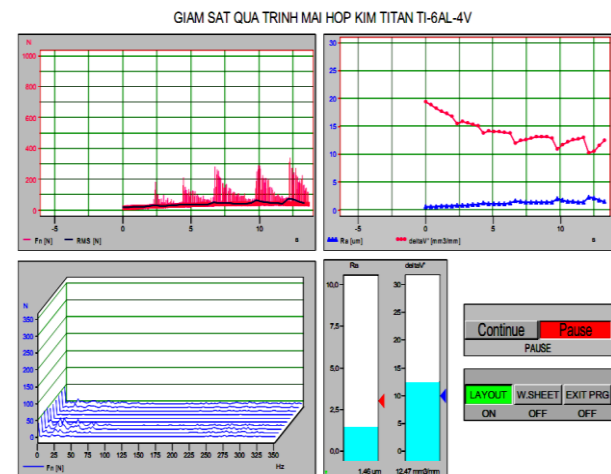
Bảng 5. Số liệu để tính online $\Delta V'$ và R_a

| TN | Chế độ mài | | | Các thông số đo | | | Tính R_a | | | Tính $\Delta V'$ | | |
|----|------------|-------------|-----------|-----------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------------|---------------|--------------|
| | v_s | v_w | a | F'_n | R_a | $\Delta V'$ | R | R_a | $SS(\%)$ | V | $\Delta V'$ | $SS(\%)$ |
| 1 | 22 | 0,10 | 10 | 4,26 | 1,42 | 34,22 | 1,288 | 1,403 | 1,164 | 38,086 | 34,604 | 1,121 |
| 6 | 26 | 0,40 | 10 | 13,77 | 3,89 | 21,84 | 3,382 | 3,952 | 1,590 | 25,723 | 21,626 | 0,980 |
| 7 | 30 | 0,10 | 10 | 8,43 | 2,13 | 30,63 | 1,849 | 2,098 | 1,507 | 35,005 | 30,401 | 0,749 |
| 8 | 30 | 0,25 | 10 | 11,31 | 3,54 | 23,48 | 3,077 | 3,553 | 0,380 | 27,831 | 23,704 | 0,955 |
| 26 | 30 | 0,25 | 40 | 20,24 | 6,81 | 17,36 | 5,699 | 6,813 | 0,037 | 21,197 | 17,372 | 0,071 |
| 27 | 30 | 0,40 | 40 | 25,87 | 8,95 | 15,15 | 7,401 | 8,977 | 0,305 | 18,844 | 15,195 | 0,299 |

Các chức năng của hệ được thể hiện đầy đủ nhờ giao diện trong hình 14. Đó là một mặt máy ảo, gồm:

- Cửa sổ (trên-trái) hiển thị tín hiệu thô (đo được) và RMS của lực pháp tuyến F_n theo thời gian thực;
- Cửa sổ (trên-phải) hiển thị diễn tiến của độ nhám bề mặt (R_a) và tuổi bền ($\Delta V'$) theo thời gian, được tính từ (8) và (9);
- Cửa sổ (dưới-trái) hiển thị phổ biên độ - tần số của tín hiệu lực cắt (dùng modul FFT từ thực nghiệm trước);
- Biểu đồ dạng cột (bar graph) biểu diễn giá trị tức thời của R_a và $\Delta V'$, trong đó có đặt ngưỡng cảnh báo (ví dụ ở đây $R_a \geq 3\mu m$, $\Delta V' \leq 10 \text{ mm}^3/\text{mm}$).
- Các phím tiện ích cho người dùng: điều khiển ngừng (Pause) hay tiếp tục (Continue)

quá trình đo; thay đổi chế độ hiển thị (Layout, Work sheet) và thoát chương trình (Exit Program).

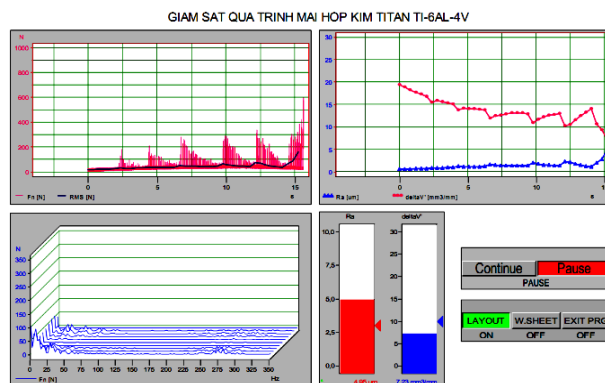


Hình 14. Thể hiện trạng thái mài bình thường

Hình 14 thể hiện trạng thái mài bình thường: đá còn sắc nên lực cắt nhỏ, biên độ dao động thấp, R_a chưa chạm ngưỡng tối đa và $\Delta V'$

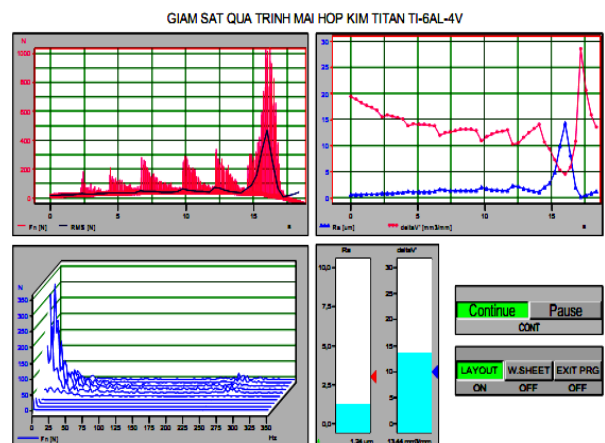
chưa chạm ngưỡng tối thiểu (biểu đồ cột có màu xanh da trời).

Gần tới ngưỡng giới hạn ($R_a = 2,2\mu\text{m}$; $\Delta V' = 30 \text{ mm}^3/\text{mm}$), lực cắt và độ nhám tăng đột ngột, còn $\Delta V'$ cũng giảm rất nhanh. Để cảnh báo trạng thái chạm ngưỡng, biểu đồ cột R_a chuyển sang màu đỏ (ngưỡng trên), còn biểu đồ $\Delta V'$ chuyển sang màu xanh sẫm (ngưỡng dưới) (hình 15).



Hình 15. Trạng thái giới hạn sửa đá

Nếu tiếp tục mài, không sửa đá thì lực cắt, biên độ rung động đều tăng đến đỉnh điểm, kéo theo sự tăng của độ nhám và giảm của tuổi bền. Tại thời điểm đó, rung động xảy ra mãnh liệt, có thể nhận ra bằng mắt thường. Trong mọi điều kiện mài, tuy giá trị lực và biên độ tự dao động có thay đổi nhưng tần số vẫn ở khoảng 25 Hz (tần số thấp), 275Hz (tần số cao). Khoảnh khắc đá mòn mãnh liệt kéo dài không lâu



Hình 16. Trạng thái tự mài sắc của đá

Ngay sau đó lực cắt, rung động, độ nhám đều giảm, tuổi bền tăng, như thấy trong hình 16. Đó là trạng thái tự mài sắc của đá. Các biểu đồ cột trở lại màu xanh da trời, báo hiệu cho phép tiếp tục mài (nếu điều kiện kỹ thuật cho phép). Trạng thái tự mài sắc có xuất hiện rõ hay không tùy thuộc vào cặp đá phôi và chế độ cắt.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Bài báo đã khái quát cơ sở lý thuyết về mòn đá, xác định quy luật mòn đá khi mài phẳng hợp kim titan:

- Thiết lập được các quan hệ cơ bản trong quá trình mài, đặc biệt giữa mòn đá và các thông số đầu ra (lực cắt, rung động, độ nhám bề mặt,...), sử dụng chúng trong giám sát mòn đá;
- Nghiên cứu thực nghiệm với các cấp độ khác nhau: ảnh hưởng đến mòn đá của các yếu tố cố định (đá, dung dịch), các thông số điều khiển (chế độ cắt); ảnh hưởng qua lại giữa các thông số đầu ra (lực, rung động, độ nhám bề mặt, mòn đá). Đề xuất được mô hình quá trình mài theo quan điểm điều khiển. Mô hình và hệ thống khái niệm liên quan phù hợp với yêu cầu ĐKTN và GSTT cũng như ĐKTN quá trình mài nói chung và mòn đá nói riêng.
- Xây dựng được mô hình cảnh báo on-line giới hạn sửa đá, thực chất đây là hệ thống giám sát trực tuyến (on-line), thời gian thực (Real-Time) các thông số công nghệ đầu ra cơ bản của quá trình: lực cắt, rung động, độ nhám bề mặt, tuổi bền của đá. Ngưỡng cảnh báo (sớm) do người dùng tự đặt theo yêu cầu gia công thực tế. Đây là phần cốt lõi của hệ điều khiển thích nghi, mà Malkin gọi là "manual adaptive control".

PHỤ LỤC

Bảng 1. Ảnh hưởng của v_s , v_w , a đến các đại lượng ra

| Thí nghiệm | Đại lượng vào | | | Kết quả tính toán theo PP hồi quy | | | | | | | Sai số (%) | | | | | |
|-------------------|---------------|-------|----|-----------------------------------|--------|-------|----------|------|-------------|----------|------------|---------|------------|------|---------------|--|
| | v_s | v_w | a | F'_n | F'_t | R_a | R_{ad} | G | $\Delta V'$ | $E-F'_n$ | $E-F'_t$ | $E-R_a$ | $E-R_{ad}$ | E-G | $E-\Delta V'$ | |
| 1 | 22 | 0,10 | 10 | 4,67 | 4,06 | 1,50 | 1,07 | 2,85 | 34,24 | 9,67 | 4,66 | 4,67 | 5,69 | 0,39 | 0,07 | |
| 2 | 22 | 0,25 | 10 | 8,21 | 6,84 | 2,60 | 1,65 | 2,37 | 26,25 | 8,59 | 18,05 | 2,70 | 6,97 | 0,39 | 0,07 | |
| 3 | 22 | 0,40 | 10 | 10,98 | 8,95 | 3,45 | 2,07 | 2,16 | 22,90 | 3,44 | 0,34 | 17,47 | 0,34 | 0,39 | 0,07 | |
| 4 | 26 | 0,10 | 10 | 5,93 | 4,64 | 1,84 | 1,21 | 2,64 | 32,27 | 0,87 | 16,86 | 4,46 | 2,49 | 0,85 | 1,17 | |
| 5 | 26 | 0,25 | 10 | 10,44 | 7,83 | 3,20 | 1,87 | 2,20 | 24,74 | 0,86 | 16,79 | 3,97 | 4,36 | 0,85 | 1,17 | |
| 6 | 26 | 0,40 | 10 | 13,95 | 10,24 | 4,24 | 2,35 | 2,00 | 21,59 | 1,31 | 12,11 | 1,78 | 2,45 | 0,85 | 1,17 | |
| 7 | 30 | 0,10 | 10 | 7,28 | 5,20 | 2,19 | 1,35 | 2,48 | 30,67 | 13,70 | 6,91 | 1,98 | 1,62 | 0,46 | 0,13 | |
| 8 | 30 | 0,25 | 10 | 12,81 | 8,78 | 3,81 | 2,09 | 2,07 | 23,51 | 13,29 | 0,81 | 1,11 | 3,51 | 0,46 | 0,13 | |
| 9 | 30 | 0,40 | 10 | 17,12 | 11,48 | 5,06 | 2,61 | 1,88 | 20,52 | 1,38 | 4,13 | 1,41 | 3,37 | 0,46 | 0,13 | |
| 10 | 22 | 0,10 | 25 | 6,71 | 5,35 | 2,29 | 1,65 | 2,37 | 27,99 | 14,02 | 4,65 | 5,88 | 3,42 | 0,39 | 1,36 | |
| 11 | 22 | 0,25 | 25 | 11,81 | 9,03 | 3,98 | 2,56 | 1,97 | 21,46 | 16,47 | 10,32 | 5,99 | 8,96 | 0,39 | 1,36 | |
| 12 | 22 | 0,40 | 25 | 15,79 | 11,81 | 5,28 | 3,21 | 1,80 | 18,72 | 6,71 | 2,38 | 19,36 | 2,48 | 0,39 | 1,36 | |
| 13 | 26 | 0,10 | 25 | 8,53 | 6,12 | 2,81 | 1,87 | 2,20 | 26,38 | 7,08 | 0,80 | 12,00 | 4,58 | 0,85 | 0,11 | |
| 14 | 26 | 0,25 | 25 | 15,01 | 10,33 | 4,89 | 2,91 | 1,83 | 20,22 | 5,50 | 10,74 | 3,17 | 6,41 | 0,85 | 0,11 | |
| 15 | 26 | 0,40 | 25 | 20,05 | 13,51 | 6,49 | 3,64 | 1,67 | 17,64 | 2,97 | 4,16 | 16,74 | 0,25 | 0,85 | 0,11 | |
| 16 | 30 | 0,10 | 25 | 10,47 | 6,87 | 3,35 | 2,09 | 2,07 | 25,07 | 11,99 | 4,05 | 3,80 | 3,73 | 0,46 | 1,43 | |
| 17 | 30 | 0,25 | 25 | 18,42 | 11,59 | 5,83 | 3,24 | 1,72 | 19,22 | 1,45 | 13,04 | 0,32 | 5,58 | 0,46 | 1,43 | |
| 18 | 30 | 0,40 | 25 | 24,62 | 15,16 | 7,74 | 4,05 | 1,57 | 16,77 | 1,59 | 4,58 | 14,59 | 1,15 | 0,46 | 1,43 | |
| 19 | 22 | 0,10 | 40 | 8,09 | 6,17 | 2,85 | 2,07 | 2,16 | 25,24 | 5,89 | 7,04 | 9,66 | 11,10 | 0,39 | 0,24 | |
| 20 | 22 | 0,25 | 40 | 14,23 | 10,42 | 4,95 | 3,21 | 1,80 | 19,35 | 1,63 | 1,91 | 6,14 | 2,20 | 0,39 | 0,24 | |
| 21 | 22 | 0,40 | 40 | 19,02 | 13,62 | 6,57 | 4,02 | 1,64 | 16,88 | 7,14 | 6,99 | 14,52 | 4,76 | 0,39 | 0,24 | |
| 22 | 26 | 0,10 | 40 | 10,27 | 7,06 | 3,50 | 2,35 | 2,00 | 23,78 | 6,42 | 8,36 | 10,83 | 2,51 | 0,85 | 1,47 | |
| 23 | 26 | 0,25 | 40 | 18,08 | 11,91 | 6,08 | 3,64 | 1,67 | 18,23 | 5,22 | 2,08 | 11,88 | 0,53 | 0,85 | 1,47 | |
| 24 | 26 | 0,40 | 40 | 24,16 | 15,58 | 8,07 | 4,56 | 1,52 | 15,91 | 8,44 | 1,18 | 16,52 | 7,70 | 0,85 | 1,47 | |
| 25 | 30 | 0,10 | 40 | 12,61 | 7,92 | 4,17 | 2,61 | 1,88 | 22,61 | 10,98 | 1,24 | 8,78 | 3,42 | 0,46 | 0,17 | |
| 26 | 30 | 0,25 | 40 | 22,19 | 13,37 | 7,25 | 4,05 | 1,57 | 17,33 | 9,65 | 2,03 | 12,33 | 1,43 | 0,46 | 0,17 | |
| 27 | 30 | 0,40 | 40 | 29,66 | 17,48 | 9,62 | 5,08 | 1,43 | 15,12 | 14,66 | 8,12 | 12,79 | 8,66 | 0,46 | 0,17 | |
| Sai số trung bình | | | | | | | | | | 7,07 | 6,46 | 8,33 | 4,06 | 0,57 | 0,68 | |

Bảng 2. Ảnh hưởng của h_{eq} đến các đại lượng ra

| Vào | Kết quả tính theo PP hồi quy | | | | | | | Sai số (%) | | | | | |
|-------------------|------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|------|-------|--------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------|-------|
| heq | F' _n | F' _t | R _a | R _{ad} | G | ΔV' | e | E-F' _n | E-F' _t | E-R _a | E-R _{ad} | E-G | E-ΔV' |
| 0,01 | 3,37 | 2,78 | 1,00 | 0,68 | 3,33 | 43,85 | 277,57 | | | | | | |
| 0,03 | 5,87 | 4,53 | 1,80 | 1,17 | 2,67 | 32,82 | 136,02 | 30,43 | 18,91 | 16,19 | 14,18 | 7,93 | 7,16 |
| 0,04 | 6,27 | 4,81 | 1,93 | 1,25 | 2,60 | 31,71 | 124,97 | 4,77 | 21,07 | 9,85 | 1,00 | 2,65 | 2,87 |
| 0,05 | 6,77 | 5,15 | 2,10 | 1,35 | 2,52 | 30,46 | 113,19 | 59,03 | 20,94 | 46,77 | 33,76 | 11,28 | 10,97 |
| 0,08 | 8,95 | 6,59 | 2,83 | 1,77 | 2,25 | 26,33 | 79,04 | 20,86 | 25,60 | 24,98 | 18,05 | 9,45 | 12,12 |
| 0,08 | 8,95 | 6,59 | 2,83 | 1,77 | 2,25 | 26,33 | 79,04 | 24,74 | 8,02 | 12,46 | 18,23 | 9,45 | 6,52 |
| 0,10 | 9,56 | 6,98 | 3,03 | 1,89 | 2,19 | 25,44 | 72,62 | 7,62 | 4,19 | 1,29 | 3,55 | 1,28 | 1,63 |
| 0,10 | 9,56 | 6,98 | 3,03 | 1,89 | 2,19 | 25,44 | 72,62 | 20,05 | 14,92 | 20,86 | 3,77 | 1,28 | 3,45 |
| 0,11 | 10,32 | 7,47 | 3,29 | 2,04 | 2,13 | 24,44 | 65,78 | 14,88 | 28,95 | 30,01 | 14,65 | 10,03 | 6,85 |
| 0,11 | 10,32 | 7,47 | 3,29 | 2,04 | 2,13 | 24,44 | 65,78 | 32,26 | 46,09 | 52,35 | 27,45 | 10,03 | 11,50 |
| 0,13 | 11,11 | 7,98 | 3,56 | 2,19 | 2,06 | 23,51 | 59,83 | 34,19 | 33,40 | 30,59 | 13,40 | 10,23 | 14,76 |
| 0,13 | 11,11 | 7,98 | 3,56 | 2,19 | 2,06 | 23,51 | 59,83 | 2,19 | 0,56 | 22,05 | 13,35 | 10,23 | 3,83 |
| 0,15 | 11,87 | 8,46 | 3,82 | 2,34 | 2,01 | 22,72 | 54,97 | 13,77 | 7,37 | 11,53 | 1,92 | 0,57 | 4,01 |
| 0,15 | 11,87 | 8,46 | 3,82 | 2,34 | 2,01 | 22,72 | 54,97 | 22,98 | 29,77 | 2,50 | 1,97 | 0,57 | 5,89 |
| 0,18 | 12,82 | 9,05 | 4,15 | 2,52 | 1,95 | 21,82 | 49,79 | 12,76 | 0,82 | 0,87 | 21,15 | 9,38 | 4,66 |
| 0,18 | 12,82 | 9,05 | 4,15 | 2,52 | 1,95 | 21,82 | 49,79 | 67,88 | 56,95 | 31,72 | 35,05 | 9,38 | 13,74 |
| 0,21 | 13,65 | 9,57 | 4,44 | 2,68 | 1,90 | 21,12 | 45,93 | 26,97 | 28,22 | 23,62 | 21,91 | 10,99 | 11,45 |
| 0,24 | 14,58 | 10,14 | 4,76 | 2,85 | 1,85 | 20,41 | 42,20 | 8,18 | 12,37 | 5,67 | 8,11 | 0,11 | 1,02 |
| 0,28 | 15,75 | 10,86 | 5,17 | 3,08 | 1,79 | 19,60 | 38,22 | 11,35 | 7,80 | 22,12 | 9,23 | 8,76 | 7,40 |
| 0,33 | 16,95 | 11,59 | 5,59 | 3,31 | 1,74 | 18,86 | 34,77 | 30,04 | 27,05 | 38,30 | 17,49 | 11,79 | 14,07 |
| 0,33 | 16,95 | 11,59 | 5,59 | 3,31 | 1,74 | 18,86 | 34,77 | 16,25 | 15,06 | 13,34 | 17,26 | 11,79 | 8,64 |
| 0,38 | 18,11 | 12,29 | 6,00 | 3,53 | 1,70 | 18,22 | 31,94 | 12,40 | 12,86 | 23,03 | 2,89 | 0,83 | 3,39 |
| 0,38 | 18,11 | 12,29 | 6,00 | 3,53 | 1,70 | 18,22 | 31,94 | 5,37 | 5,27 | 10,44 | 2,62 | 0,83 | 1,53 |
| 0,45 | 19,56 | 13,15 | 6,51 | 3,80 | 1,65 | 17,51 | 28,93 | 15,56 | 8,67 | 0,61 | 15,43 | 8,10 | 5,23 |
| 0,45 | 19,56 | 13,15 | 6,51 | 3,80 | 1,65 | 17,51 | 28,93 | 39,64 | 28,67 | 39,71 | 15,75 | 8,10 | 9,74 |
| 0,53 | 21,05 | 14,04 | 7,04 | 4,09 | 1,60 | 16,85 | 26,32 | 18,62 | 13,18 | 17,44 | 12,56 | 12,59 | 11,19 |
| 0,62 | 22,49 | 14,88 | 7,56 | 4,36 | 1,56 | 16,28 | 24,18 | 0,91 | 3,38 | 9,14 | 2,90 | 1,55 | 0,78 |
| 0,73 | 24,28 | 15,93 | 8,20 | 4,70 | 1,51 | 15,63 | 21,90 | 36,79 | 25,11 | 43,03 | 22,31 | 7,44 | 7,62 |
| 1,00 | 28,12 | 18,14 | 9,59 | 5,42 | 1,42 | 14,48 | 18,14 | | | | | | |
| Sai số trung bình | | | | | | | | 21,87 | 18,71 | 20,76 | 13,70 | 6,91 | 7,11 |

Bảng 3. Dữ liệu đo dựa trên màng trực giao L27

| Cấu trúc thí nghiệm | | | | Chế độ mài | | | | Số liệu đo các thông số đầu ra | | | | | |
|---------------------|-------|-------|---|------------|-------|----|----------|--------------------------------|-------|-------|----------|------|-------------|
| TN | v_s | v_w | a | v_s | v_w | a | h_{eq} | F'n | F't | R_s | R_{ad} | G | $\Delta V'$ |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 22 | 0,10 | 10 | 0,05 | 4,26 | 4,25 | 1,42 | 1,01 | 2,84 | 34,22 |
| 2 | 1 | 2 | 1 | 22 | 0,25 | 10 | 0,11 | 8,99 | 5,80 | 2,51 | 1,78 | 2,36 | 26,23 |
| 3 | 1 | 3 | 1 | 22 | 0,40 | 10 | 0,18 | 11,37 | 8,98 | 3,11 | 2,08 | 2,15 | 22,89 |
| 4 | 2 | 1 | 1 | 26 | 0,10 | 10 | 0,04 | 5,98 | 3,97 | 1,75 | 1,14 | 2,67 | 32,65 |
| 5 | 2 | 2 | 1 | 26 | 0,25 | 10 | 0,10 | 10,35 | 6,70 | 3,01 | 1,96 | 2,22 | 25,03 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 26 | 0,40 | 10 | 0,15 | 13,77 | 9,13 | 3,89 | 2,29 | 2,02 | 21,84 |
| 7 | 3 | 1 | 1 | 30 | 0,10 | 10 | 0,03 | 8,43 | 5,59 | 2,13 | 1,37 | 2,47 | 30,63 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 30 | 0,25 | 10 | 0,08 | 11,31 | 8,85 | 3,54 | 2,16 | 2,06 | 23,48 |
| 9 | 3 | 3 | 1 | 30 | 0,40 | 10 | 0,13 | 16,89 | 11,98 | 4,76 | 2,53 | 1,87 | 20,49 |
| 10 | 1 | 1 | 2 | 22 | 0,10 | 25 | 0,11 | 7,81 | 5,12 | 2,16 | 1,60 | 2,36 | 27,61 |
| 11 | 1 | 2 | 2 | 22 | 0,25 | 25 | 0,28 | 14,14 | 10,07 | 3,76 | 2,82 | 1,97 | 21,17 |
| 12 | 1 | 3 | 2 | 22 | 0,40 | 25 | 0,45 | 16,92 | 12,10 | 5,05 | 3,29 | 1,79 | 18,47 |
| 13 | 2 | 1 | 2 | 26 | 0,10 | 25 | 0,10 | 7,96 | 6,08 | 2,51 | 1,96 | 2,22 | 26,35 |
| 14 | 2 | 2 | 2 | 26 | 0,25 | 25 | 0,24 | 15,88 | 11,58 | 4,72 | 3,11 | 1,85 | 20,20 |
| 15 | 2 | 3 | 2 | 26 | 0,40 | 25 | 0,38 | 20,67 | 14,10 | 6,12 | 3,63 | 1,68 | 17,63 |
| 16 | 3 | 1 | 2 | 30 | 0,10 | 25 | 0,08 | 11,89 | 7,16 | 3,15 | 2,17 | 2,06 | 24,72 |
| 17 | 3 | 2 | 2 | 30 | 0,25 | 25 | 0,21 | 18,69 | 13,33 | 5,52 | 3,43 | 1,71 | 18,95 |
| 18 | 3 | 3 | 2 | 30 | 0,40 | 25 | 0,33 | 24,23 | 15,89 | 7,12 | 4,01 | 1,56 | 16,54 |
| 19 | 1 | 1 | 3 | 22 | 0,10 | 40 | 0,18 | 7,64 | 5,77 | 2,75 | 1,86 | 2,15 | 25,30 |
| 20 | 1 | 2 | 3 | 22 | 0,25 | 40 | 0,45 | 14,00 | 10,22 | 4,46 | 4,28 | 1,79 | 19,40 |
| 21 | 1 | 3 | 3 | 22 | 0,40 | 40 | 0,73 | 17,75 | 12,73 | 6,21 | 3,84 | 1,63 | 16,92 |
| 22 | 2 | 1 | 3 | 26 | 0,10 | 40 | 0,15 | 9,65 | 6,52 | 3,30 | 2,29 | 2,02 | 24,14 |
| 23 | 2 | 2 | 3 | 26 | 0,25 | 40 | 0,38 | 17,18 | 11,67 | 5,81 | 3,62 | 1,68 | 18,51 |
| 24 | 2 | 3 | 3 | 26 | 0,40 | 40 | 0,62 | 22,28 | 15,40 | 7,55 | 4,23 | 1,53 | 16,15 |
| 25 | 3 | 1 | 3 | 30 | 0,10 | 40 | 0,13 | 11,36 | 8,02 | 4,08 | 2,53 | 1,87 | 22,65 |
| 26 | 3 | 2 | 3 | 30 | 0,25 | 40 | 0,33 | 20,24 | 13,64 | 6,81 | 4,00 | 1,56 | 17,36 |
| 27 | 3 | 3 | 3 | 30 | 0,40 | 40 | 0,53 | 25,87 | 16,17 | 8,95 | 4,67 | 1,42 | 15,15 |

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Đào Văn Hiệp. "Giám sát và điều khiển thông minh quá trình gia công cơ". Tài liệu chuyên khảo sau đại học, NXB Quân đội nhân dân (2015).
- [2] Nguyễn Minh Tuyển. "Quy hoạch thực nghiệm". NXB Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội (2004).
- [3] Abellan-Nebot, J., & Subirón, F. "A Review of Machining Monitoring System based on Artificial Intelligence Process Models". *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 47, p. 237-257 (2010).
- [4] Adibi, H., Rezaei, S., Sarhan, "A. Analytical Modeling of Grinding Wheel Loading Phenomena. *Int J Adv Manuf Technol*", Vol. 68, p.373-385 (2013).
- [5] Al-Habaibeh, A., Gindy, N. "A New Approach for Systematic Design of Condition Monitoring Systems for Milling" (2000).
- [6] Choudhury, S., Kishore, K. "Tool Wear Measurement in Turning Using Force Ratio". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 40, p.899-909 (2000).
- [7] Kumar, B., Baskar, N. "Integration of Fuzzy Logic With Response Surface Methodology for Thrust Force and Surface Roughness Modeling of Drilling on Titanium Alloy". *Int J Adv Manuf Technol*, 1501-1514 (2013).
- [8] Ošťádal, B., Hiep, Dao Van "Optimalizace řezných podmínek při broušení podle kritéria nejmenších kladů". *Sborník VAAZ*, Brno (1989).

Thông tin liên hệ: **Phạm Vũ Dũng**

Điện thoại: 0912703855 - Email: pvdung@uneti.edu.vn

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp.

-
-