

XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM DỰ ĐOÁN CHIỀU SÂU PHAY BẰNG TIA NƯỚC CHỨA HẠT MÀI TRÊN HỢP KIM NHÔM

AN EMPIRICAL MODEL FOR PREDICTING THE MILLED DEPTH USING THE ABRASIVE WATER JET PROCESS ON ALUMINUM ALLOY

Bùi Văn Hưng^{1,*},
Ngô Anh Vũ¹, Khương Quang Sơn²

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.90>

TÓM TẮT

Áp dụng công nghệ gia công bằng tia nước chứa hạt mài trên các chi tiết hợp kim có chiều dày mỏng hoặc vật liệu khó gia công được coi là một trong các giải pháp thay thế các phương pháp gia công gia công truyền thống đầy hứa hẹn. Tuy nhiên để ứng dụng công nghệ này một cách có hiệu quả trong công nghiệp, đòi hỏi cần nghiên cứu nhiều hơn nhằm kiểm soát chiều sâu trong khi gia công. Trong nghiên cứu này trình bày các kết quả gia công trên hợp kim nhôm Al6065 sử dụng công nghệ gia công bằng tia nước có chứa hạt mài. Các kết quả này được so sánh với chiều sâu gia công được dự đoán khi sử dụng mô hình thực nghiệm đã được công bố trước đây. Kết quả cho thấy độ chính xác cao khi so sánh giữa chiều sâu khi gia công so với chiều sâu khi sử dụng mô hình dự đoán với sai số nhỏ hơn 10%.

Từ khóa: Tia nước chứa hạt mài, gia công hợp kim nhôm, vết cắt cơ sở, hốc, chiều sâu gia công.

ABSTRACT

Applying abrasive waterjet machining technology on alloy parts with thin thickness or parts made of machined difficult material is considered as one of the promising alternatives to conventional machining methods. However, to perform this technology effectively in industry, more researches are required to control depth machined. This study presents the results of machining on aluminum alloy Al6065 with abrasive water jet. The cut depths of samples are compared with the predicted depths using the previously published experimental model. The results show a high accuracy of machined depth in the comparison with the error less than 10%.

Keywords: Abrasive water jet, machining aluminum alloy, elementary pass, milled pocket, depth milled.

¹Trường Đại học Giao thông Vận tải

²Trường Cao đẳng Công nghiệp Bắc Ninh

*Email: hungtkm@utc.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/6/2022

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/7/2022

Ngày chấp nhận đăng: 23/12/2022

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Trong bối cảnh của công nghiệp 4.0, những năm gần đây các ngành sản xuất quan tâm nhiều hơn đến khía cạnh

môi trường và sinh thái của sản xuất bên cạnh năng suất và chất lượng của các thành phần. Trong các phương pháp sản xuất bền vững, tác động tới môi trường được quan tâm đến hiệu quả năng lượng, giảm tiêu thụ điện, lượng khí thải carbon là những vấn đề quan trọng. Sự gia tăng cảnh báo toàn cầu và các tác động bất lợi của nó đã buộc các nhà sản xuất phải thích ứng với các phương pháp bền vững để sản xuất các sản phẩm chất lượng một cách kinh tế và thân thiện với môi trường. Tính bền vững trong sản xuất đã trở thành một điều cần thiết hơn là một sự lựa chọn. Do đó, nhiệm vụ của những nhà nghiên cứu khoa học, đặc biệt là các nhà nghiên cứu trong lĩnh vực cơ khí chế tạo là cần thiết tìm ra những giải pháp mới thân thiện với môi trường hơn để thay thế một phần hoặc toàn bộ các phương pháp gia công truyền thống trong lĩnh vực gia công chế tạo.

Trong đó, phương pháp gia công bằng tia nước chứa hạt mài (AWJM) là một phương pháp gia công đầy hứa hẹn được sử dụng để gia công các loại hợp kim hoặc các loại vật liệu khó gia công bằng phương pháp truyền thống bởi các đặc tính nổi bật của nó. Quá trình gia công phi truyền thống này sử dụng nước với áp lực rất cao đi qua lỗ với đường kính rất nhỏ, sau đó tia nước này được hòa trộn với các hạt mài mòn và hướng thẳng đến vật liệu gia công ở tốc độ rất cao. Khi tiếp xúc với chi tiết gia công, vật liệu sẽ bị loại bỏ bởi hiện tượng xói mòn. AWJM sử dụng nguyên liệu đơn giản (nước tinh khiết và các hạt mài mòn), tác động lực không đáng kể lên môi trường trong quá trình, không tạo ra bất kỳ vùng ảnh hưởng nhiệt nào trên bề mặt gia công. Khi xét về mức độ ảnh hưởng đến môi trường, phương pháp này có thể được coi là ít gây hại nhất.

Ban đầu, quá trình gia công tia nước được phát triển nhằm phục vụ cho quá trình cắt các loại vật liệu cứng khó gia công bởi phương pháp truyền thống là chủ yếu. Quy trình này đã đang được nghiên cứu áp dụng cho quá trình gia công với mục tiêu điều khiển được chiều sâu cắt như trong quy trình gia công phay truyền thống [1-3]. AWJ được đặc trưng bởi một số lượng lớn các thông số quá trình như áp lực tia nước, tốc độ di chuyển, tốc độ dòng hạt mài, kích thước hạt mài, khoảng cách phun, chiều dài ống chuẩn trực [4]. Chính các thông số này ảnh hưởng trực tiếp đến

các kết quả gia công. Trong nghiên cứu Fowler, G. [3] áp dụng quá trình gia công tia nước chứa hạt mài trên hợp kim Titan (Ti6Al4V) với việc khảo sát ảnh hưởng của các thông số vận tốc di chuyển của tia nước trên bề mặt phôi gia công, kích thước của các hạt mài, và số lần cắt đến kết quả gia công. Kết quả nghiên cứu đã kết luận rằng tất cả các thông số trên đều có ảnh hưởng đến quá trình loại bỏ vật liệu gia công. Với vận tốc di chuyển thấp hoặc kích thước hạt mài to đều làm tăng tốc độ loại bỏ vật liệu trên chi tiết gia công nhưng đồng thời nó dẫn đến ảnh hưởng xấu đến chất lượng bề mặt. Do đó, để kiểm soát kết quả gia công cần lựa chọn các thông số này phù hợp dựa trên việc xác định mục tiêu giữa tốc độ loại bỏ vật liệu và chất lượng bề mặt gia công.

Với quá trình AWJ có thể được sử dụng để đạt được một chiều sâu gia công là hằng số với các chi tiết có chiều dày mỏng dễ bị cong vênh trong quá trình gia công hay gá đặt do chiều sâu gia công ít phụ thuộc vào khoảng cách phun của tia nước [5]. Trong các nghiên cứu [6, 7] đã chỉ ra khả năng ứng dụng của AWJ cho các loại vật liệu khác nhau như hợp kim titan, composite (CFRP - Carbon Fibers Reinforced Polymer).

Tuy nhiên, việc chọn lựa các thông số cho quá trình gia công là một thách thức lớn để đạt được chiều sâu cắt mong muốn. Rất nhiều nghiên cứu được công bố với các mô hình khác nhau cho việc dự đoán chiều sâu gia công với một tập hợp các thông số gia công được lựa chọn trước khi gia công các loại vật liệu khác nhau. Anwar [8] và Lozano Torrubia [9] đề xuất mô hình sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn dự đoán chiều sâu của các vết cắt bởi AWJ với các áp suất và vận tốc cắt khác nhau trên hợp kim Ti6Al4V. Mặc dù, các mô hình tính này cho kết quả với độ chính xác cao nhưng với phương pháp này yêu cầu về trang bị máy tính với cấu hình xử lý cao và mất nhiều thời gian tính toán và xử lý kết quả. Zitoune [10] đề xuất mô hình phân tích thực nghiệm để xác định tốc độ dòng hạt mài tối ưu trong mục tiêu đạt được chiều sâu cắt lớn nhất với một bộ thông số quá trình được lựa chọn trước trên hợp kim nhôm và vật liệu composite carbon/epoxy. Trong nghiên cứu này đã xem xét áp suất nước, đường kính lỗ nạp, tốc độ dòng hạt mài như những tham số thay đổi trong quá trình thực nghiệm. Kết quả cho thấy độ chính xác cao dưới 10% và mô hình có thể dễ dàng hiệu chỉnh nhờ số lượng thí nghiệm ít. Tarek [11] trên cơ sở xây dựng mô hình thực nghiệm cho các vết cắt cơ sở dựa trên mô hình Gauss tổng hợp làm căn cứ để xây dựng mô hình thực nghiệm dự đoán chiều sâu gia công. Với việc lựa chọn tốc độ di chuyển của tia nước và bước quét phù hợp thì chiều sâu gia công trên hợp kim titan là hoàn toàn kiểm soát được. Bui, V H. [12] đã phát triển mô hình dự đoán chiều sâu gia công với phương pháp hiệu chỉnh nhanh áp dụng trên hợp kim titan. Mô hình mới này đã được rút gọn với các hệ số hiệu chỉnh được xác định qua thực nghiệm. X. Sourd [13] nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ (áp suất, tốc độ di chuyển, bước quét) đến chiều sâu cắt của vật liệu composite Polymer (CFRP) gia cường bằng sợi carbon. Kết quả nghiên cứu đã

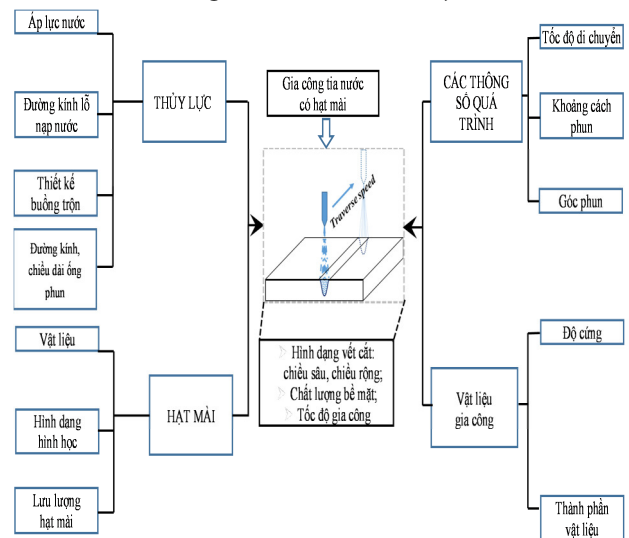
được so sánh với các mô hình thực nghiệm trước đó và cho kết quả sai số nhỏ hơn 16% trong tất cả các trường hợp.

Có thể thấy rằng sử dụng mô hình thực nghiệm hoặc phân tích nửa thực nghiệm để dự đoán chiều sâu cắt là phương pháp phù hợp cho mục đích công nghiệp hóa công nghệ này bởi việc sử dụng các số lượng mẫu thí nghiệm ít và khả năng hiệu chỉnh nhanh để tìm ra các mô hình cho các vật liệu khác nhau.

Để công nghiệp hóa công nghệ này, cần có nhiều nghiên cứu về kiểm soát độ sâu khi gia công với AWJ. Cho mục đích này, nghiên cứu này trình bày các kết quả gia công trên hợp kim nhôm Al6065 sử dụng công nghệ gia công bằng tia nước có chứa hạt mài AWJ. Các kết quả này được so sánh với chiều sâu gia công dự đoán khi sử dụng mô hình thực nghiệm đã được công bố trước đây. Kết quả nghiên cứu này là cơ sở để lựa chọn các thông số hợp lý nhằm đạt được các yêu cầu về hình dạng và chất lượng bề mặt khi áp dụng công nghệ AWJM.

2. CƠ SỞ XÂY DỰNG MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM

Có thể thấy rằng cơ chế loại bỏ vật liệu trong công nghệ AWJ là rất phức tạp với rất nhiều thông số đầu vào của quá trình và phụ thuộc vào loại vật liệu được gia công. Những thông số ảnh hưởng đến việc điều khiển quá trình gia công tia nước cho mục đích kiểm soát chiều sâu gia công được thể hiện như trong sơ đồ được trình bày hình 1.



Hình 1. Các thông số ảnh hưởng trong công nghệ gia công bằng tia nước

Các thông số này thường được phân loại theo bốn nhóm, cụ thể là: các thông số thủy lực; đặc điểm hạt mài; thông số sử dụng trong quá trình; vật liệu phôi gia công. Để kiểm soát được quá trình gia công bằng tia nước cần xem xét một vết cắt được hình thành khi tia nước di chuyển trên bề mặt phôi với khoảng cách không đổi. Sự di chuyển này hình thành một vết cắt được gọi là "vết cắt cơ sở", đã có rất nhiều nghiên cứu thực hiện để xem xét ảnh hưởng của các thông số đầu vào đến tốc độ loại bỏ vật liệu (MRR), hình dạng của vết cắt cơ sở: chiều sâu và chiều rộng của vết cắt, góc côn...

Trong các nghiên cứu [12, 13] đã chỉ ra rằng ngay sau khi đi ra từ miệng ống phun, biên dạng vận tốc của chùm tia nước chứa hạt mài tuân theo biên dạng Gauss (có hình dạng chuông). Đặc biệt, có thể sử dụng phương trình Gauss để mô tả biên dạng của vết cắt cơ sở khi tia nước dịch chuyển trên bề mặt phôi theo đường thẳng [2,12]. Ngoài ra, khi xét đến ảnh hưởng của các thông số trong quá trình gia công tới kích thước vết cắt cơ sở. Các nghiên cứu trên cũng chỉ ra rằng áp suất phun (P) và vận tốc (Vf) di chuyển của chùm tia nước trên bề mặt gia công có ảnh hưởng nhiều nhất đến chiều sâu của vết cắt cơ sở. Trong khi đó, khoảng cách phun (SOD) và kích thước hạt mài (Gr) có ảnh hưởng chủ yếu đến chiều rộng của vết cắt cơ sở [12].

Trong nghiên cứu này, cho mục đích nghiên cứu khả năng áp dụng công nghệ gia công bằng tia nước trong điều kiện trang thiết bị hiện có tại Việt nam. Nghiên cứu này tập trung vào đánh giá so sánh chiều sâu gia công trên vật liệu hợp kim nhôm Al6065 với chiều sâu được tính toán từ mô hình dự đoán chiều sâu của các hốc gia công [12]. Do đó việc kiểm soát độ chính xác của chiều sâu gia công được ưu tiên hơn là chiều rộng. Thêm vào đó, với mục đích ban đầu của công nghệ gia công bằng tia nước phục vụ cho việc cắt vật liệu, nên trong khi gia công việc thay đổi các thông số đầu vào (áp suất, khoảng phun, hạt mài...) trên các máy cắt tia nước hiện nay là một trở ngại lớn cho điều khiển quá trình cắt gọt. Trên cơ sở đó, vận tốc dịch chuyển của đầu cắt (Vf) được chọn làm tham số điều khiển, các thông số khác sẽ được giữ cố định là các hằng số không đổi trong suốt quá trình gia công.

Từ phân tích trên, kết hợp nghiên cứu thực nghiệm, phương trình Gauss cơ bản được chọn sử dụng trong nghiên cứu này và được viết lại theo phương trình (1) [12]:

$$y(x) = H(Vf) * e^{\frac{-(x)^2}{B(Vf)^2}} \tag{1}$$

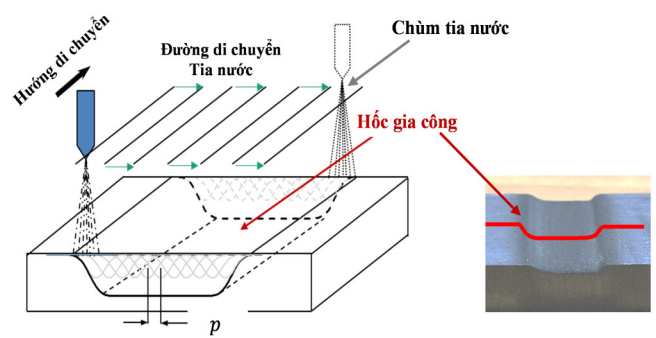
Trong đó, H(Vf) và B(Vf) là các tham số biểu diễn sự phụ thuộc chiều sâu và chiều rộng của vết cắt cơ sở vào vận tốc dịch chuyển (Vf) của tia nước - tốc độ cắt. Các tham số này được xác định theo phương trình (2) và (3) [12]:

$$H(Vf) = a_0 * Vf^{a_1} \tag{2}$$

$$B(Vf) = b_0 * Vf^{b_1} \tag{3}$$

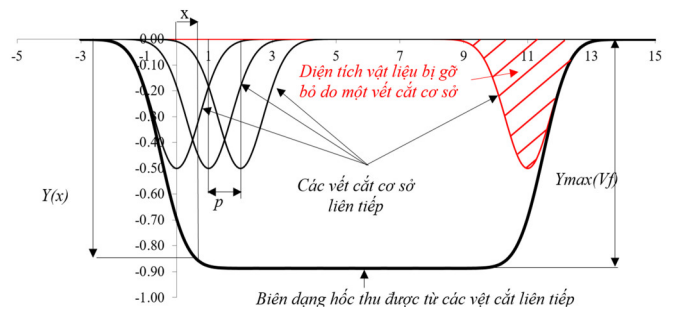
Các hệ số a₀, a₁, b₀, b₁ được xác định bằng thực nghiệm và sử dụng phương pháp bình phương bé nhất. Cần lưu ý rằng để xác định hai phương trình (2) và (3), thực tế chỉ cần làm thí nghiệm ở 3 vận tốc khác nhau. Khi đó phương trình (1) là hoàn toàn xác định. Điều này cho phép dự đoán biên dạng vết cắt cơ sở phụ thuộc vào vận tốc Vf một cách chính xác và nhanh chóng.

Khi tia nước ở trạng thái ổn định (vận tốc, áp lực, lưu lượng hạt mài mòn trong dòng chảy), các hốc có thể được hình thành bằng cách điều khiển tia nước theo một trong các chiến lược gia công cơ bản như trong điều khiển quá trình gia công gia công CNC. Tuy nhiên, trạng thái bề mặt của hốc phụ thuộc rất nhiều vào khoảng cách bước quét ngang (p) (hình 2) trong quá trình điều khiển [12].



Hình 2. Sự hình thành của hốc khi gia công bằng tia nước

Do đó biên dạng của hốc gia công có thể được xác định bằng sự tổng hợp từ các vết cắt cơ sở (hình 3).



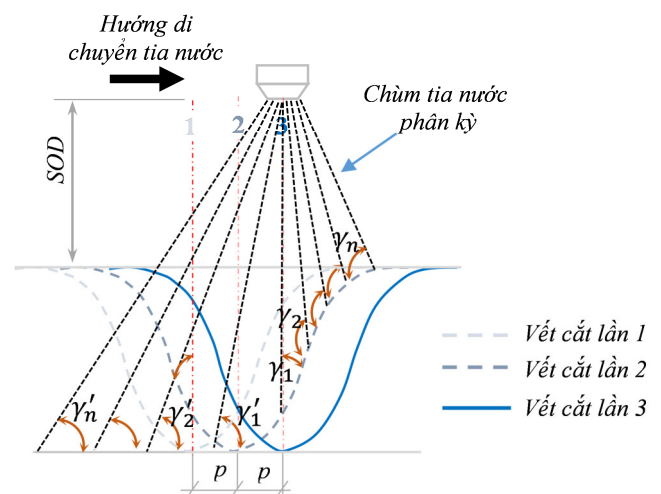
Hình 3. Nguyên lý hình thành biên dạng hốc gia công từ các vết cắt cơ sở [12]

Như vậy, khi một vết cắt cơ sở (1) được xác định thì biên dạng của hốc gia công hoàn toàn xác định và được mô tả sử dụng phương trình (4) bằng phương pháp tổng hợp [12]:

$$Y(x) = \sum_{i=0}^n \left[H(Vf) \cdot e^{\left(\frac{-(x-i \cdot p)^2}{B(Vf)^2} \right)} \right] \tag{4}$$

Trong đó:

- i - Số lần đường gia công của tia nước trên bề mặt vật liệu
- p - Bước dịch quét ngang giữa hai lần chạy của tia nước
- H(Vf) và B(Vf) - Hệ số chiều sâu lớn nhất và chiều rộng của vết cắt cơ sở tương ứng với vận tốc Vf.



Hình 4. Sơ đồ minh họa ảnh hưởng của quá trình xói mòn thứ cấp đến chiều sâu gia công

Tuy nhiên, do ảnh hưởng của hiện tượng xói mòn thứ cấp. Khi tia nước đi ra từ miệng ống phun sẽ bị phân kỳ thành chùm tia nước chứa hạt mài và tác động lên bề mặt phôi dưới các góc γ_i (hình 4). Từ các vết cắt cơ sở thứ hai trở đi, các hạt mài sau khi tác động lần đầu lên bề mặt phôi, sau đó, chúng sẽ tiếp tục có tác động thứ cấp lên các vết cắt cơ sở trước đó hoặc theo dòng hỗn hợp tạp chất: nước, hạt kim loại vật liệu phôi, các tạp chất... thoát ra ngoài qua các vết cắt trước đó gây ra hiện tượng gia công thứ cấp ảnh hưởng đến chiều sâu cắt.

Hiện tượng này dẫn đến sự sai lệch giữa mô hình và thực nghiệm. Do đó, trong nghiên cứu [12], phương trình (4) được viết dưới dạng phương trình sau (5):

$$Y(x) = H_e \cdot \sum_{i=0}^n \left[H(Vf) \cdot e^{\left(\frac{-(x-i.p)^2}{B(Vf)^2} \right)} \right] \quad (5)$$

Trong đó: H_e - Hệ số xói mòn khi xét đến ảnh hưởng của quá trình gia công vật liệu thứ cấp của tia nước chứa hạt mài, được xác định bằng thực nghiệm và phụ thuộc vào rất nhiều yếu tố khác nhau. Bên cạnh đó, chiều sâu lớn nhất của hốc ứng với vận tốc Vf xác định bởi phương trình (PT6) [12]:

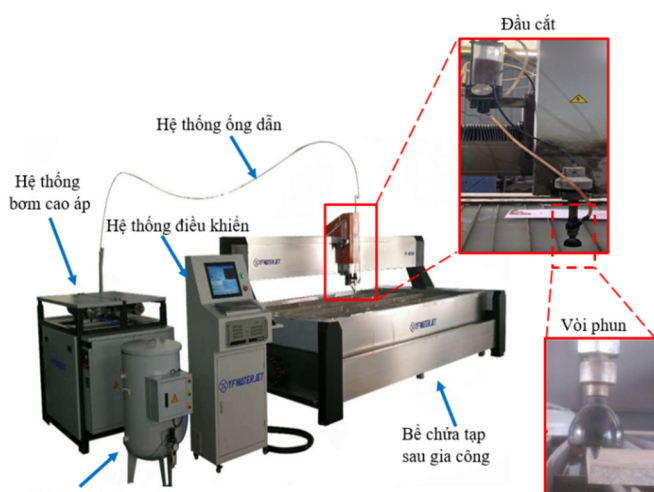
$$Y_{max}(Vf) = H_e \frac{\sqrt{\pi} \cdot H(Vf) \cdot B(Vf)}{p} \quad (6)$$

Từ các phương trình (5, 6) chiều sâu gia công của các hốc trong quá trình gia công bằng tia nước là hoàn toàn kiểm soát được khi lựa chọn được các giá trị Vf và p phù hợp.

3. THỬ NGHIỆM QUÁ TRÌNH GIA CÔNG BẰNG TIA NƯỚC

3.1. Máy gia công và thiết bị đo kết quả

Trong nghiên cứu này, các thí nghiệm được thực hiện trên máy gia công tia nước YF WATERJET tại nhà máy sản xuất của Công ty TNHH gương kính Thủ Đô có địa chỉ tại Cụm Đà - Hà Đông - Hà Nội (hình 5).



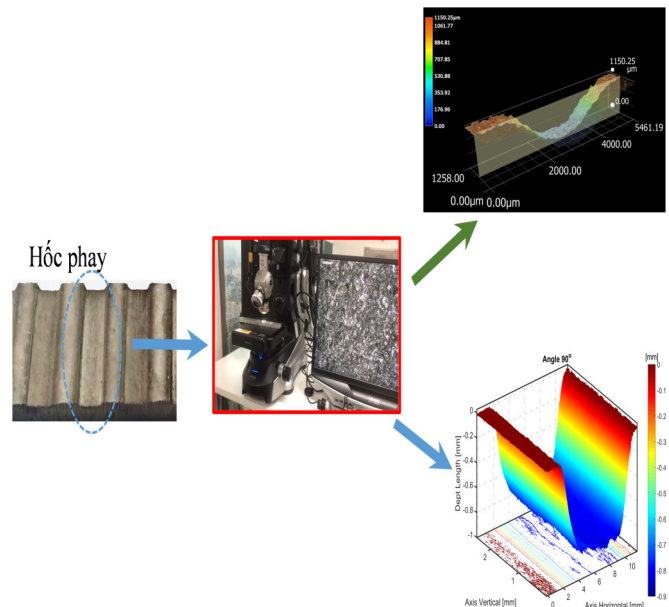
Hình 5. Máy cắt tia nước chứa hạt mài YF-Water Jet

Như đã công bố trong các nghiên cứu trước [12], khi tia nước tác dụng lên vật liệu ở trạng thái ổn định, hốc gia công phụ thuộc vào vận tốc dịch chuyển (Vf) và bước dịch chuyển ngang (p). Để chứng minh khả năng áp dụng của PT6 cho việc dự đoán chiều sâu các hốc gia công trên hợp kim nhôm Al6065. Các thông số cơ bản cho đầu vào của quá trình gia công được lựa chọn như trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số đầu vào cho quá trình gia công.

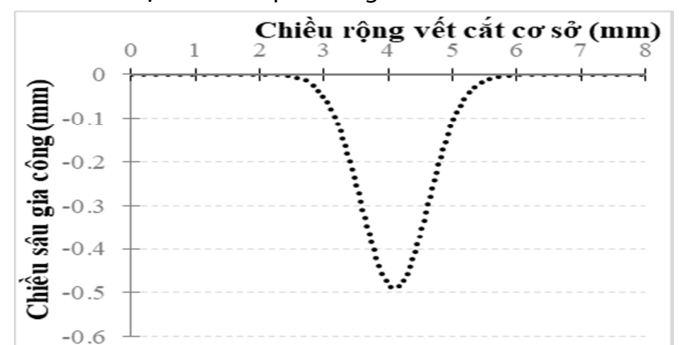
| | | | |
|---------------------------------|------|-----------------------------|-------|
| Áp suất bơm (MPa) | 100 | Đường kính lỗ ống phun (mm) | 1,016 |
| Đường kính cửa nạp hạt mài (mm) | 6,0 | Kích thước hạt mài (mesh) | 80 |
| Đường kính cửa nạp nước (mm) | 0,33 | Khoảng cách phun (mm) | 100 |

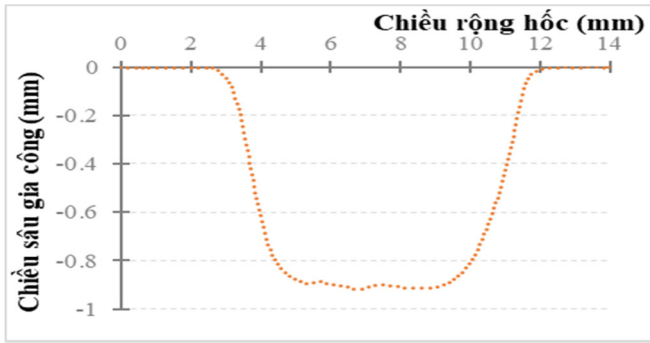
Để kiểm tra kích thước sau gia công, sử dụng thiết bị đo kính hiển vi kỹ thuật số VHX-7000 (hình 6) cho phép thu được các bề mặt của các hốc gia công với độ phân giải cao. Thiết bị này cho phép đo và xử lý kết quả với rất nhiều chức năng từ độ nhám bề mặt đến hình thái bề mặt chi tiết gia công.



Hình 6. Dụng cụ đo - kính hiển vi kỹ thuật số VHX-7000

Các biên dạng được xem xét trong nghiên cứu này (hình 7) là các biên dạng trung bình tương ứng với chiều rộng 2mm của diện tích khi quét bằng kính hiển vi.



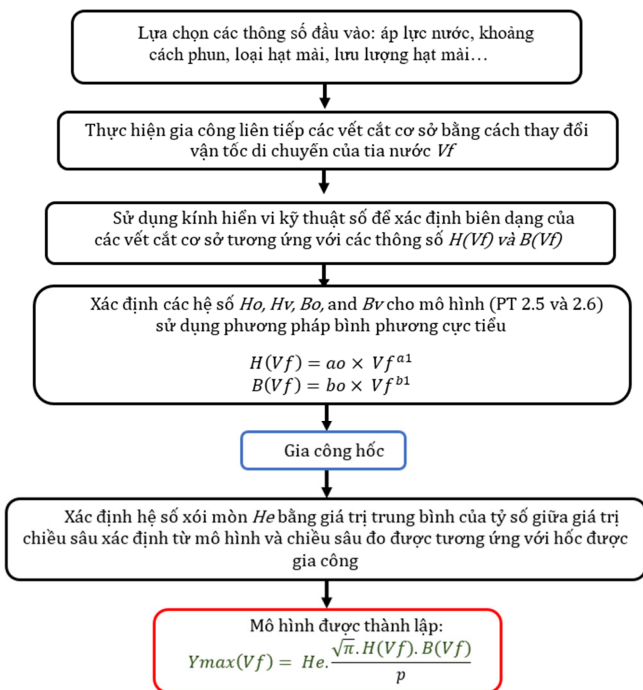


Hình 7. Biên dạng trung bình của phép đo trên kính hiển vi kỹ thuật số

3.2. Phương pháp và kết quả thực nghiệm

a) Phương pháp xác định mô hình thực nghiệm chiều sâu các hốc gia công

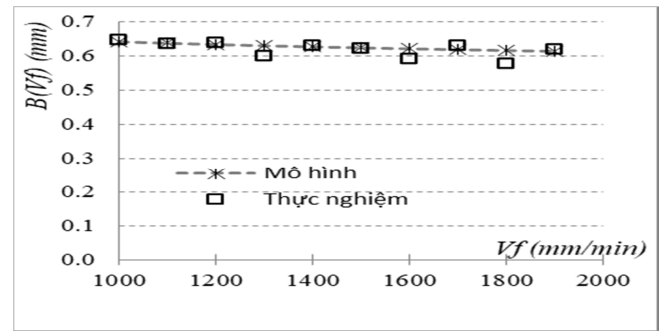
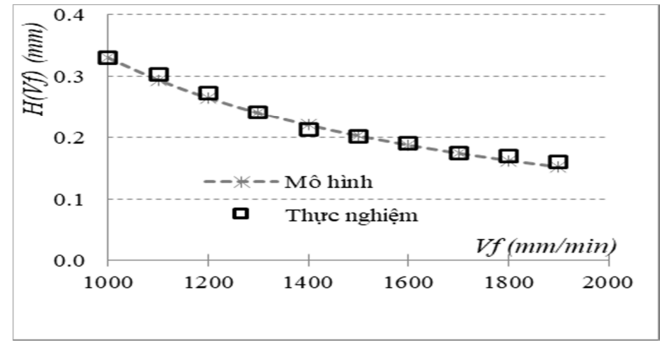
Phương pháp và cách thức thực hiện mô hình thực nghiệm dự đoán chiều sâu gia công được thực hiện tương tự như trong nghiên cứu [12] và được trình bày trong lưu đồ hình 8. Mô hình dự đoán chiều sâu trên hợp kim nhôm Al6065 được xây dựng từ việc lựa chọn trước các thông số đầu vào cho quá trình thực nghiệm dựa trên các thí nghiệm cắt đơn giản trên máy cắt tia nước.



Hình 8. Lưu đồ phương pháp xác định mô hình thực nghiệm chiều sâu gia công [13]

b) So sánh kết quả thực nghiệm và mô hình dự đoán chiều sâu gia công

Với các thông số được cho trong bảng 1. Để xây dựng mô hình xác định chiều sâu gia công, phương trình (1) được thành lập bằng cách xác định các hệ số H(Vf) và B(Vf). Cụ thể, 10 vết cắt cơ sở được gia công tương ứng với ba giá trị vận tốc nằm trong khoảng giá trị từ 1000 mm/phút đến 2000mm/phút với bước tăng 100 mm/phút. Hệ số H(Vf) và B(Vf) được xác định (hình 9).



Hình 9. Giá trị H(Vf) và B(Vf) giữa mô hình và thực nghiệm

Từ kết quả đo trên thiết bị kính hiển vi kỹ thuật số áp dụng phương pháp bình phương bé nhất các hệ số a_0, a_1, b_0, b_1 được xác định lần lượt là: $a_0 = 1362,66, a_1 = -1,205, b_0 = 1,023, b_1 = -0,067$. Độ chính xác trung bình đạt được cho giá chiều sâu và chiều rộng đạt được từ mô hình (PT 1) nhỏ hơn 7%.

Từ mô hình cho vết cắt cơ sở được xác định, 10 hốc được gia công sử dụng các giá trị tốc độ cắt - Vf (mm/phút) (tốc độ di chuyển của tia nước) và bước quét ngang giữa hai đường di chuyển liên tiếp p. Giá trị p được lấy trong khoảng giá trị từ $[0,6 \times B(Vf) - 0,9 \times B(Vf)]$ nhằm đảm bảo các chi tiết được gia công có đáy phẳng [12]. Các giá trị cụ thể được trình bày trong bảng 2.

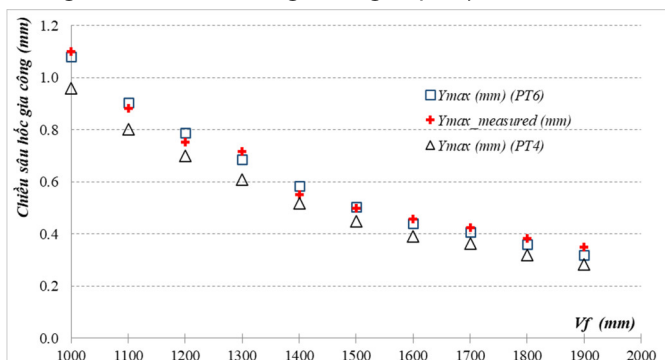
Trong số 10 hốc được gia công, các hốc số 1, 5, 8 được chọn để xác định hệ số xói mòn $H_e = 1,127$ trong các phương trình số 5 và 6. Giá trị chiều sâu của các hốc còn lại được chọn để đánh giá độ chính xác của mô hình thực nghiệm. Kết quả so sánh giữa chiều sâu gia công của biên dạng dự đoán (PT5) và kết quả đo trên thiết bị kính hiển vi kỹ thuật số được thể hiện trên hình 10.

Từ kết quả so sánh, có thể thấy chiều sâu khi gia công bằng tia nước có thể dự đoán được khi sử dụng phương trình (PT6) thông qua việc lựa chọn hai thông số quá trình là Vf và p. Giá trị sai số lớn nhất giữa chiều sâu được dự đoán (PT 6) với kết quả thí nghiệm là 8,7% ứng với giá trị lớn nhất của tốc độ cắt Vf = 2000 mm/phút. Các sai số xuất hiện có thể giải thích bởi hai nguyên nhân chính: kích thước hạt mài không đồng nhất, tần số động cơ điện 3 pha dẫn đến áp suất nước không ổn định trong suốt quá trình. Cho mục đích cắt các yếu tố này không gây ảnh hưởng tới kết quả, nhưng đối với mục đích gia công kiểm soát chiều sâu như trong quy trình gia công phay thì đây là một trở ngại lớn. Bên cạnh đó có thể thấy rằng trong nghiên cứu

Bảng 2. Các giá trị sử dụng và kết quả trong thực nghiệm

| TN _o | Vf (mm/min) | H(Vf) (mm) | B(Vf) (mm) | p (mm) | Chiều sâu tính Ymax (PT 4) | Chiều sâu đo Ymax (mm) | Chiều sâu đo/chiều sâu tính Ymax | Chiều sâu Ymax (PT 6) | Sai số |
|-----------------|-------------|------------|------------|--------|----------------------------|------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------|
| 1 | 1000 | 0,330 | 0,641 | 0,39 | 0,958 | 1,099 | 1,147 | 1,080 | 1,7% |
| 2 | 1100 | 0,294 | 0,637 | 0,41 | 0,802 | 0,883 | | 0,904 | 2,4% |
| 3 | 1200 | 0,265 | 0,633 | 0,42 | 0,700 | 0,753 | | 0,789 | 4,9% |
| 4 | 1300 | 0,240 | 0,630 | 0,44 | 0,609 | 0,718 | | 0,686 | 4,4% |
| 5 | 1400 | 0,220 | 0,627 | 0,47 | 0,520 | 0,551 | 1,06 | 0,586 | 6,3% |
| 6 | 1500 | 0,202 | 0,624 | 0,50 | 0,448 | 0,500 | | 0,505 | 1,0% |
| 7 | 1600 | 0,187 | 0,621 | 0,53 | 0,390 | 0,457 | | 0,440 | 3,8% |
| 8 | 1700 | 0,174 | 0,618 | 0,53 | 0,363 | 0,426 | 1,174 | 0,409 | 4,0% |
| 9 | 1800 | 0,162 | 0,616 | 0,55 | 0,320 | 0,383 | | 0,360 | 5,8% |
| 10 | 1900 | 0,152 | 0,614 | 0,58 | 0,284 | 0,350 | | 0,320 | 8,7% |
| | | | | | | He = | 1,127 | | |

này, đối với hợp kim nhôm Al6065 hệ số xói mòn H_e trung bình có giá trị lớn hơn hệ số xói mòn H_e được tìm thấy trong nghiên cứu tương tự đối với hợp kim titan Ti6Al4V. Sự khác biệt này có thể giải thích bởi tính chất vật liệu về độ dẻo và tính trơ của hợp kim nhôm là thấp hơn nhiều so với hợp kim titan. Do đó hiện tượng gia công thứ cấp sẽ xảy ra với cường độ mạnh hơn trong trường hợp này.



Hình 10. So sánh kết quả thực nghiệm và mô hình chiều sâu gia công

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu trình bày khả năng áp dụng công nghệ gia công bằng tia nước để gia công các hốc có chiều sâu được kiểm soát trên hợp kim nhôm Al6065. Với các thông số đầu vào của quá trình được lựa chọn trước thành lập lên mô hình dự đoán chiều sâu của các hốc gia công. Sử dụng mô hình này có thể dự đoán và kiểm soát chiều sâu gia công trên mẫu thí nghiệm với việc lựa chọn hai thông số điều khiển là vận tốc di chuyển của tia nước - Vf và khoảng cách giữa các bước quét - p. Kết quả thực nghiệm đã cho thấy sai lệch chiều sâu của các hốc giữa mô hình và thí nghiệm là nhỏ hơn 10% khi xét đến ảnh hưởng của hệ số xói mòn (H_e), hệ số xét đến ảnh hưởng của quá trình gia công thứ cấp xảy ra trong quá trình gia công. Để nâng cao khả năng áp dụng công nghệ này vào thực tế sản xuất công nghiệp, các nghiên cứu khác cần được thực hiện như: thay

đổi vật liệu thí nghiệm, mô phỏng quá trình gia công bằng tia nước, thực hiện gia công các bề mặt có biên dạng phức tạp.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Giao thông vận tải trong đề tài mã số T2022-CK-07.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Goutham U, Hasu BS, Chakraverti G, Kanthababu M, 2016. *Experimental investigation of pocket milling on Inconel 825 using abrasive water jet machining*. Int J Curr Eng Technol 6(1):295–302.

[2]. Alberdi A, Rivero A, López de Lacalle L, Etxeberria I, Suárez A, 2010. *Effect of process parameter on the kerf geometry in abrasive water jet milling*. Int J Adv Manuf Technol 51:467–480

[3]. Fowler G, Pashby I, Shipway P, 2009. *The effect of particle hardness and shape when abrasive water jet milling titanium alloy Ti6Al4V*. Wear 266:613–620.

[4]. Momber AW, Kovacevic R, 1998. *Principles of abrasive water jet machining*. Springer, p 394.

[5]. Hejjaji A, Zitoune R, Crouzeix L, Le Roux S, Collombet F, 2017. *Surface and machining induced damage characterization of abrasive water jet milled carbon/epoxy composite specimens and their impact on tensile behavior*. Wear 376–377:1356–64.

[6]. Hashish M, 1989. *An Investigation of Milling with Abrasive-Waterjets*. J Eng Ind 111:158

[7]. Arola D, Ramulu M, 1997. *Material removal in abrasive waterjet machining of metals - Surface integrity and texture*. Wear 210:50–8

[8]. Anwar S, Axinte DA, Becker AA, 2013. *Finite element modelling of abrasive waterjet milled footprints*. J Mater Process Technol 213:180–93

[9]. Lozano Torrubia P, Axinte DA, Billingham J, 2015. *Stochastic modelling of abrasive waterjet footprints using finite element analysis*. Int J Mach Tools Manuf 95:39–51

[10]. Cénac F, Zitoune R, Collombet F, Deleris M, 2013. *Abrasive water-jet milling of aeronautic aluminum 2024-T3*. Proc Inst Mech Eng Part L J Mater Des.

[11]. Sultan Tarek, Patrick Gilles, Guillaume Cohen, François Cenac, Walter Rubio, 2016. *Modeling incision profile in AWJM of Titanium alloys Ti6Al4V*. Mechanics & Industry 17, no. 4: 403

[12]. Bui, Van Hung, Patrick Gilles, Tarek Sultan, Guillaume Cohen, Walter Rubio, 2017. *A new cutting depth model with rapid calibration in abrasive water jet machining of titanium alloy*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 93, no. 5: 1499-1512.

[13]. X. Sourd R. Zitoune, L. Crouzeix, M. Salem, M. Charlas, 2020. *New model for the prediction of the machining depth during milling of 3D woven composite using abrasive waterjet process*. Composite Structures, Volume 234.

AUTHORS INFORMATION

Bui Van Hung¹, Ngo Anh Vu¹, Khuong Quang Son²

¹University of Transport and Communications, Hanoi

²Bac Ninh College of Industry