

NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM GIA CÔNG MÀI TINH BỀ MẶT CẦU BẰNG CHẤT LỎNG PHI NEWTON

NGUYỄN ĐỨC NAM, VŨ VĂN BỘ

*Khoa Công nghệ Cơ khí, Trường Đại học Công Nghiệp Tp. Hồ Chí Minh;
nguyenducnam@iuh.edu.vn*

Tóm tắt. Phương pháp gia công bằng chất lỏng phi Newton là phương pháp đơn giản để gia công các bề mặt cầu phức tạp. Trước đây, đối với các bề mặt cầu, để gia công mài tinh ta phải trải qua nhiều bước gia công phức tạp để đạt độ nhám bề mặt theo yêu cầu. Để đơn giản hoá quá trình gia công, hạt mài sẽ được trộn với chất kết dính để tạo thành một hỗn hợp dung dịch mài và khi chuyển động hỗn hợp dung dịch mài này sẽ tạo ra ứng suất cắt tác động lên bề mặt cần gia công. Trong bài báo này sẽ nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ mài, nồng độ dung dịch mài và kích thước hạt mài đến độ nhám bề mặt chi tiết và lượng vật liệu được cắt bỏ. Kết quả thí nghiệm cho thấy rằng, tốc độ mài ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng bề mặt gia công và lượng vật liệu được cắt bỏ. Tốc độ gia công càng tăng thì lượng vật liệu cắt bỏ càng lớn và độ nhám bề mặt càng giảm. Bên cạnh đó, nồng độ dung dịch mài cũng ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt gia công như tốc độ mài. Còn kích thước hạt mài dường như không ảnh hưởng đến chất lượng bề mặt gia công mà chỉ ảnh hưởng đến lượng vật liệu được cắt bỏ. Cuối cùng, kết quả độ nhám bề mặt cầu bằng thép có đường kính $\varnothing 32$ mm sau khi gia công giảm từ $Ra = 110$ nm xuống còn $Ra = 13$ nm.

Từ khoá. Mài tinh bề mặt cầu, chất lỏng phi Newton, tốc độ mài, nồng độ dung dịch mài, kích thước hạt mài, lượng vật liệu cắt gọt, độ nhám bề mặt.

EXPERIMENTAL STUDY ON POLISHING OF CURVED SURFACES BY NON-NEWTONIAN LIQUID MACHINING METHOD

Abstract. Non-Newtonian liquid machining method is a simple method for processing complex curved surfaces. Previously, the curved surfaces are polishing by complex machining process to achieve the required surface roughness. To simplify the polishing process, the abrasives will be mixed with the binder to form a fluid of polishing slurry, in which the abrasives were dispersed. When the polishing slurry is moved, it will produce a shear thickening stress on the polished curved surface. In this study, the influence of polishing speed, abrasive concentration and abrasive size on the surface roughness and material removal rate were investigated by experiments. The experimental results revealed that the polishing speed has the greatest influence on the polishing effect. With the increase of the polishing speed, the material removal rate increases rapidly and smoother surfaces with better roughness can be obtained. Abrasive concentration affects the polishing results in a manner that is similar to polishing speed. Abrasive size seems to have no effect on the surface roughness, but material removal rate increases as the abrasive size decreases. Finally, surface roughness of curved surfaces work-piece ($\varnothing 32$ mm) was reduced rapidly from $Ra = 110$ nm to $Ra = 13$ nm.

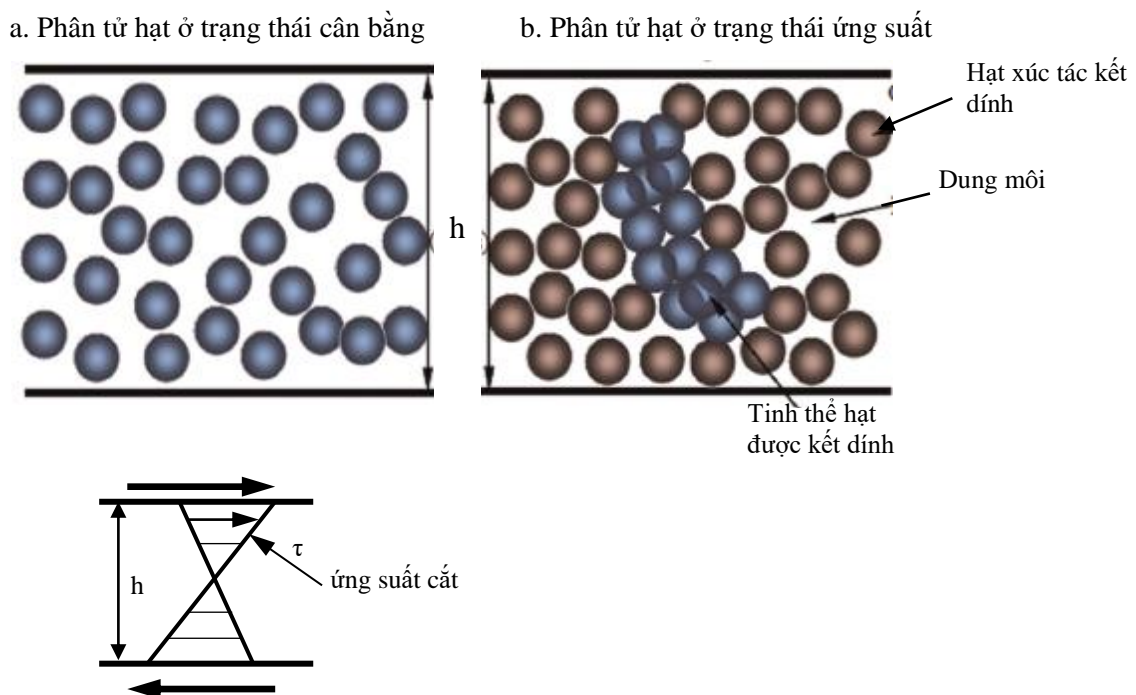
Keywords. Curved surfaces polishing; non-Newtonian fluids; polishing speed; abrasive concentration; abrasive size; material removal rate; surface roughness.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các bề mặt cong đóng vai trò quan trọng trong các lĩnh vực của ngành sản xuất công nghiệp như các cánh quạt của động cơ phản lực [1], các thấu kính quang học [2], khuôn đúc trong ngành sản xuất sản phẩm nhựa, khớp hông và khớp gối nhân tạo trong lĩnh vực cấy ghép y sinh học [3]. Các bề mặt này đòi hỏi yêu cầu chất lượng bề mặt rất cao và công nghệ gia công hiệu suất cao. Trước đây, quá trình gia công tinh bề mặt được chế tạo thông qua phương pháp gia công truyền thống như tiện, phay và kết thúc bằng mài tinh. Quá trình này yêu cầu một lượng thời gian gia công lớn nên năng suất hạn chế. Bên cạnh đó, chất lượng bề mặt sau gia công chỉ ở một giới hạn nhất định. Hiện nay, có rất nhiều công nghệ gia công

đã được phát triển và áp dụng để gia công các bề mặt cong, chẳng hạn như công nghệ gia công bằng bức xạ đàn hồi [4], gia công bằng cơ – hoá học [5], gia công bằng thủy động lực học [6], gia công bằng chất lỏng từ biến [7,8]. Phương pháp bức xạ đàn hồi có thể gia công bề mặt cong đạt chất lượng cao nhưng hiệu suất thấp. Phương pháp gia công bằng cơ – hoá học có thể đạt hiệu suất cao hơn, tuy nhiên chất thải hoá học sẽ gây ảnh hưởng đến môi trường. Phương pháp gia công bằng chất lỏng từ biến được áp dụng gia công các bề mặt cong với độ chính xác bề mặt cao do được điều khiển bằng máy tính. Tuy nhiên, phương pháp này ứng dụng hạn chế do chi phí tương đối cao cho chất điện từ và thiết kế các điện cực. Do đó, tìm ra phương pháp gia công mới để mài tinh bề mặt cong với hiệu suất, chất lượng cao và giá thành thấp là rất quan trọng. Ngoài ra, cần phải thân thiện với môi trường cũng là yêu cầu cấp bách của công nghệ hiện nay.

Trong bài báo này, phương pháp gia công mài tinh bằng chất lỏng phi Newton được đề xuất để cải thiện hiệu suất và chất lượng bề mặt gia công. Trong phương pháp này, ứng suất chất lỏng phi Newton được sử dụng để tạo nên quá trình cắt gọt trong gia công [9]. Cơ học của quá trình tạo ra ứng suất chất lỏng dựa trên sự hình thành, kết dính của các hạt tinh thể được thể hiện ở hình 1.



Hình 1: Cơ học của ứng suất chất lỏng khi chuyển động

Hiệu quả của chất lỏng phi Newton là tạo ra ứng suất cắt nhờ sự chuyển động của chất lỏng. Dưới tác dụng của lực chuyển động, độ nhớt của chất lỏng phi Newton sẽ thay đổi và phản ứng hoàn toàn khác với chất lỏng thông thường. Chất lỏng phi Newton này có khả năng gia công linh hoạt với các bề mặt cong mà vẫn đáp ứng được yêu cầu cắt gọt và chất lượng bề mặt, trong khi đó dung dịch mài có thể sử dụng lại sẽ không gây ảnh hưởng đến môi trường.

Vì vậy, để đơn giản hoá quá trình gia công, tiết kiệm chi phí sản xuất và có thể gia công các bề mặt cầu thì phương pháp dùng chất lỏng phi Newton là cần thiết. Trong bài báo này, mô hình thí nghiệm gia công mài tinh bề mặt cầu được thiết lập để nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số gia công đến chất lượng bề mặt và tính toán lượng vật liệu cắt gọt để đánh giá khả năng gia công của phương pháp.

2. NGUYÊN LÝ GIA CÔNG BẰNG CHẤT LỎNG PHI NEWTON

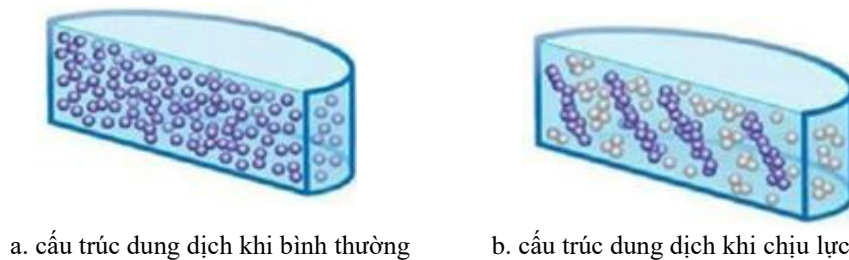
Hầu hết chất lỏng mà ta biết là chất lỏng Newton vì tuân theo định luật ma sát trong của Newton. Theo Newton, “độ nhớt” là thông số đại diện cho ma sát trong của dòng chảy. Ví dụ: quan sát hiện tượng gió thổi trên mặt nước. Gió tác động lên mặt nước một lực nhất định và làm bề mặt nước chuyển động với

vật tốc v . Dưới tác động của độ nhớt (lực ma sát giữa các lớp của chất lỏng), lớp nước liền kề bên dưới sẽ bị kéo theo chuyển động của lớp nước phía trên.

Trong chất lỏng Newton, độ nhớt là một hằng số đối với lực tác động, chỉ thay đổi nếu có thay đổi nhiệt độ. Ví dụ, nước đông đá khi lạnh và tan chảy khi nóng, nhưng nếu lắc chai đựng nước (dùng lực) thì độ nhớt của nước không đổi hay dòng nước vẫn tiếp tục chảy bình thường bất kể lực tác động lên nó (hình 2.a).

Trong khi đó, độ nhớt của chất lỏng phi Newton không phải là hằng số, có thể thay đổi theo nhiều cách khác nhau dưới tác động của một hay nhiều yếu tố: lực, thời gian, nhiệt độ... Khi độ nhớt thay đổi, loại chất lỏng này phản ứng hoàn toàn khác chất lỏng thông thường: lỏng hóa rắn, rắn hóa lỏng, dầy và xóp lên...

Sự tương tác giữa các hạt: khi chịu tác động của lực, khoảng cách giữa các hạt trong hỗn hợp thay đổi. Tại vị trí chịu lực, các hạt chụm lại, tạo thành cụm có hình dạng như tinh thể. Đây là nguyên nhân khiến dung dịch rắn lại (hình 2.b).



a. cấu trúc dung dịch khí bình thường

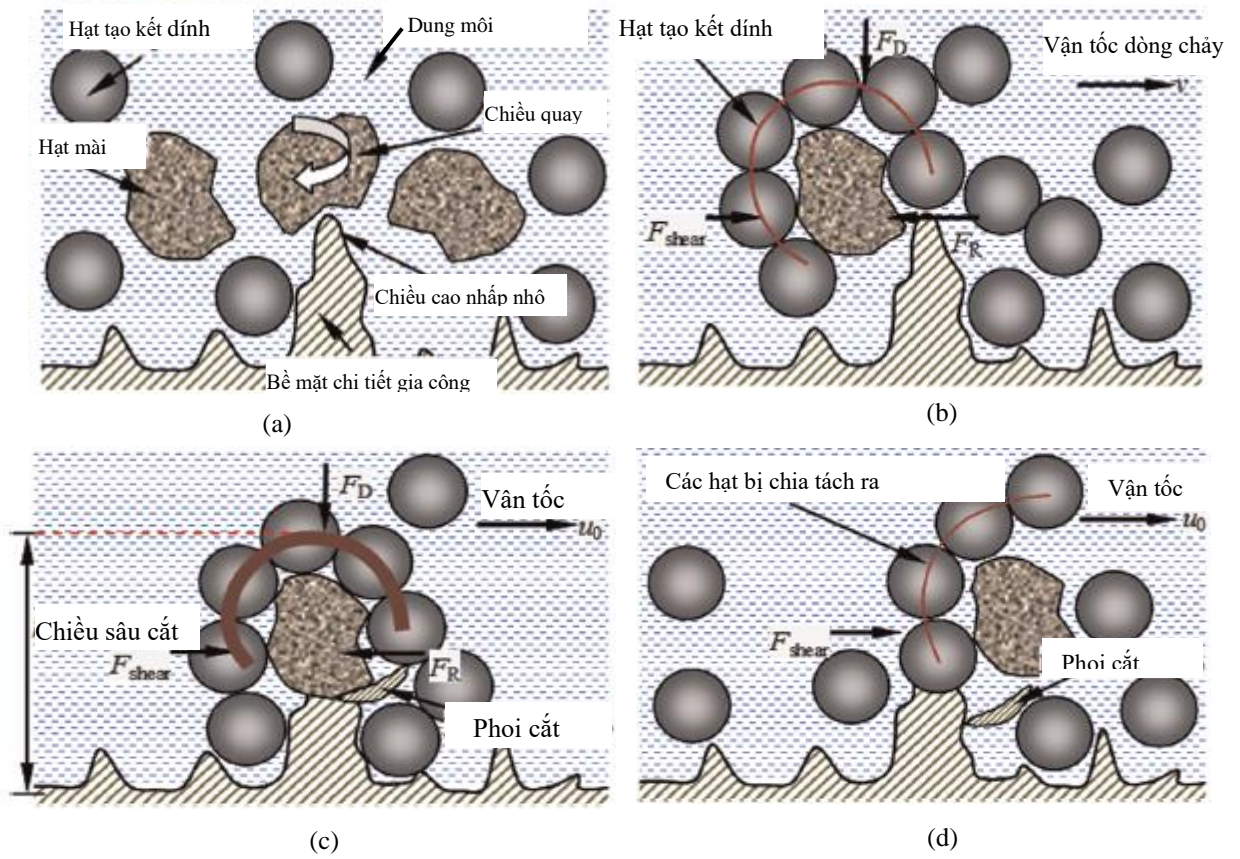
b. cấu trúc dung dịch khí chịu lực

Hình 2: Cơ học tương tác giữa các hạt

Như vậy, kết hợp chất lỏng phi Newton với dung dịch hạt mài sẽ cho ra phương pháp gia công phù hợp với các bề mặt phức tạp. Hạt mài sẽ được trộn lẫn vào trong dung dịch. Trong quá trình gia công bề mặt chi tiết được giữ cố định, đồng thời dung dịch cộng với hạt mài sẽ được chuyển động.

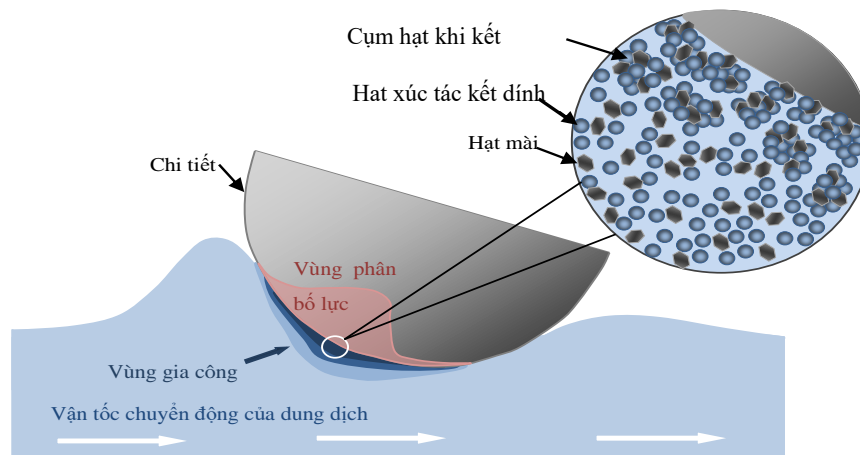
Cơ học của quá trình gia công được thể hiện trong Hình 3. Đầu tiên, dung dịch mài được cho chuyển động để tạo ra ứng suất cắt. Nếu tốc độ chuyển động và chiều sâu cắt không đủ lớn thì quá trình cắt gọt không diễn ra. Hạt mài chỉ trượt lên trên bề mặt gia công bởi vì lực thủy động tác dụng lên dung dịch mài không đạt yêu cầu (hình 3.a).

Sau khi lực thủy động tác dụng lên dung dịch đủ lớn thì hiện tượng đông đặc và độ nhớt của chất lỏng không tuân theo định luật Newton trong vùng tiếp xúc sẽ tăng lên nhanh chóng. Lúc này, các hạt phân tán trong hỗn hợp sẽ kết hợp thành các cụm hạt, trong đó hạt mài sẽ được bao quanh bởi các hạt kết dính (hình 3.b). Kết quả là, dung dịch mài trong vùng gia công sẽ hoạt động như một chất rắn tức thời, và một đĩa mài linh hoạt được hình thành trong vùng tiếp xúc, và cường độ mài sẽ tăng lên nhanh chóng tác động lên phiê để tăng tốc độ loại bỏ vật liệu (hình 3.c). Để tăng tốc độ loại bỏ vật liệu thì cần tăng tốc độ của dòng dung dịch mài và chiều sâu tiếp xúc thì khi đó lực cắt (F_{shear}) sẽ lớn hơn lực cản sinh ra trên vết nhấp nhô của chi tiết (F_R). Khi bề mặt gia công được mài phẳng và lực cắt được loại bỏ thì cụm hạt kết dính sẽ bị chia tách ra và trở về như trạng thái ban đầu như chất lỏng tuân theo định luật Newton (hình 3.d) [10].



Hình 3: Cơ học của quá trình gia công

Do vậy, tính lưu động của chất lỏng phi Newton sẽ tạo ra một đĩa mài linh hoạt có thể phù hợp với các bề mặt cong khác nhau. Bề mặt cong phức tạp có thể được mài bóng thuận lợi với quy trình đơn giản. Dung dịch mài sẽ kết dính và đông đặc trong gia công và trở lại bình thường như chất lỏng Newton một khi lực cắt được loại bỏ. Vì vậy, có thể đạt được hiệu quả và chất lượng mài bóng cao. Hiệu quả của phương pháp gia công này phụ thuộc vào sự chuyển động tương đối giữa chi tiết và dung dịch đánh bóng để tạo ra quá trình đông đặc. Do đó, gia công bằng chất lỏng phi Newton trình bày trong nghiên cứu này là một phương pháp mài tinh chi phí thấp, thân thiện với môi trường. Nguyên lý của quá trình gia công được thể hiện ở hình 4.

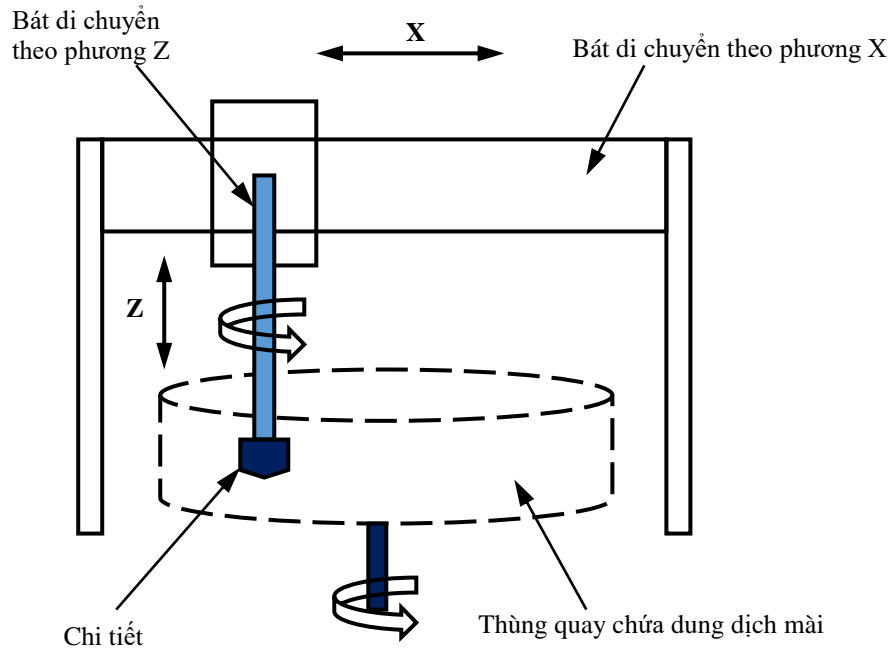


Hình 4: Nguyên lý của quá trình gia công

3. MÔ HÌNH THỰC NGHIỆM

Nguyên lý hoạt động và tiến trình thực nghiệm như hình 5a và 5b. Mô hình thực nghiệm có thể cung cấp chuyển động tương đối giữa chi tiết gia công và dung dịch mài. Chi tiết được kẹp chặt dưới trục chính và được điều khiển bởi một động cơ bước. Động cơ và trục chính được lắp đặt trên trục Z, có thể di chuyển theo chiều dọc trục Z bằng một trục vít dẫn. Ngoài ra, trục Z đã được lắp đặt trên trục X, do đó chuyển động qua lại có thể thực hiện được. Chi tiết được quay tròn và tịnh tiến lên xuống theo phương Z trong quá trình gia công.

Dung dịch mài bóng bao gồm hạt mài và chất kết dính được khuấy trộn thành khối dung dịch. Khối dung dịch này sẽ được chứa trong một rãnh tròn và được điều khiển chuyển động quay tròn bởi một động cơ đặt ở dưới cùng của thiết bị. Các thông số của quá trình gia công như đường kính chi tiết, tốc độ quay của trục chính, đường kính của đĩa mài, tốc độ quay của đĩa mài được liệt kê trong Bảng 1.



Hình 5a: Nguyên lý hoạt động máy mài thực nghiệm



Hình 5b: Mô hình máy mài thực nghiệm

Bảng 1: Thông số máy và chi tiết gia công

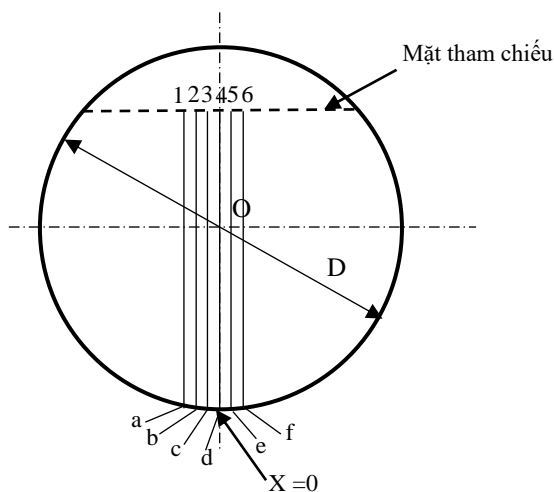
Thông số	Giá trị
Đường kính chi tiết (mm)	32
Tốc độ quay của trục chính (vòng /phút)	0 - 200
Đường kính của đĩa mài (mm)	350
Tốc độ quay của đĩa mài (vòng/phút)	0 - 120

Các yếu tố ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt và tốc độ cắt bỏ vật liệu bao gồm tốc độ gia công, nồng độ dung dịch mài và kích thước hạt mài được thiết lập trong nghiên cứu này. Hạt mài được sử dụng trong quá trình thực nghiệm là Al_2O_3 . Chi tiết được sử dụng trong thực nghiệm là mặt cầu có đường kính 32 mm. Các thông số của quá trình thực nghiệm được trình bày trong bảng 2.

Bảng 2: Thông số của quá trình gia công

Thông số	Giá trị
Đường kính chi tiết (mm)	32
Hạt mài	Al_2O_3
Đường kính của hạt mài (μm)	3.5, 5, 7.5, 15
Nồng độ dung dịch mài (wt%)	10, 17, 23, 30
Tốc độ quay của đĩa mài (vòng/phút)	20, 40, 60, 80
Tốc độ quay của chi tiết (vòng/phút)	100
Thời gia gia công (giờ)	1

Trong quá trình thực nghiệm, lượng vật liệu được cắt gọt trong quá trình gia công trên một đơn vị thời gian được đo bằng máy kiểm tra độ dày bằng tia laser CMT -1100 (độ chính xác $0.1 \mu m$). Mô hình để thiết lập quá trình đo lượng cắt gọt được trình bày như hình 6. Lượng vật liệu cắt gọt được tính toán dựa và kết quả đo tại các điểm a, b, c, d, e và f. Chiều dài các đường tại các điểm đo đặc trước gia công và sau gia công (tính từ mặt tham chiếu) được tính toán để suy ra lượng vật liệu cắt gọt trong một đơn vị thời gian. Còn độ nhám bề mặt sau khi gia công ứng với các thông số khác nhau được tiến hành trên máy đo độ nhám SJ-310.

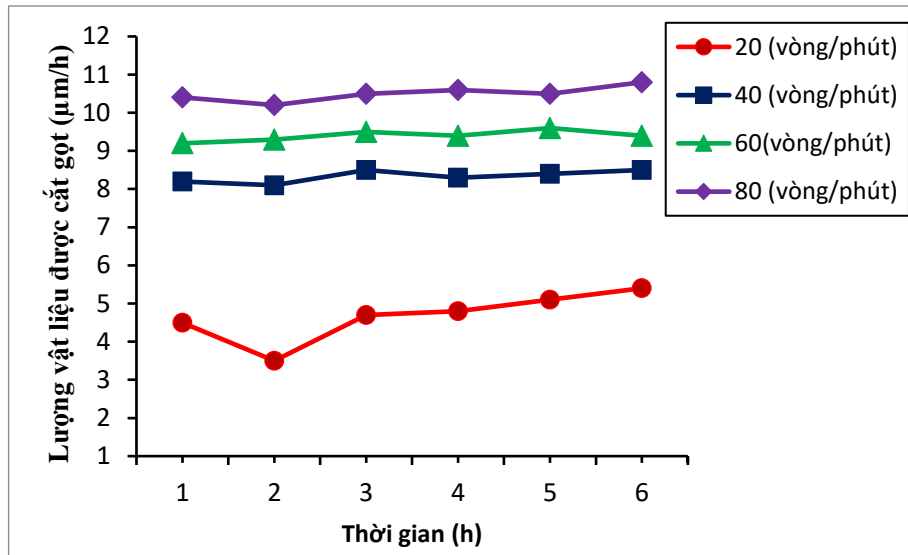


Hình 6. Mô hình đo lượng cắt gọt

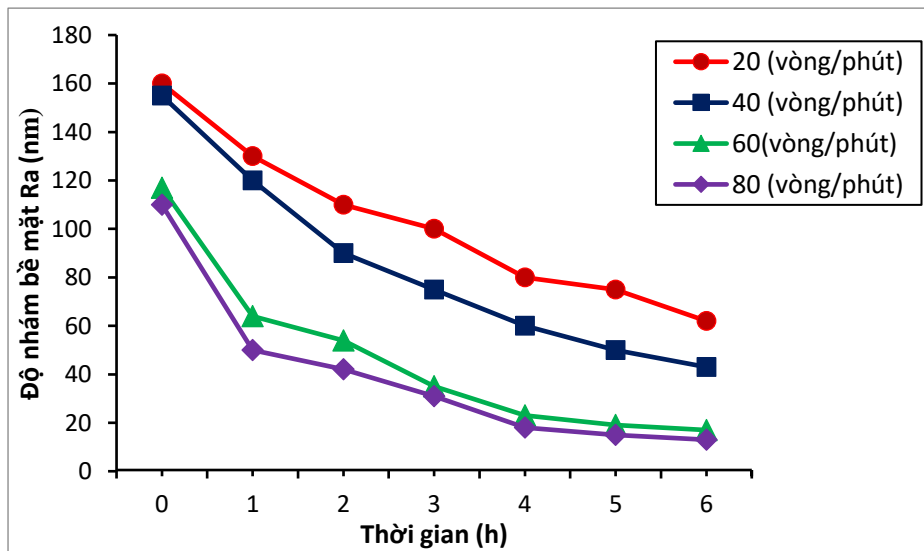
4. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM

4.1. Ảnh hưởng của tốc độ cắt

Quá trình thực nghiệm ảnh hưởng của tốc độ đĩa mài đến lượng vật liệu cắt gọt và độ nhám bề mặt được thực hiện với hạt mài có đường kính hạt mài trung bình là $7.5 \mu\text{m}$ và nồng độ dung dịch hạt mài 23%. Tốc độ đĩa mài được thiết lập lần lượt là 20, 40, 60, 80 (vòng/phút). Kết quả ảnh hưởng của tốc độ đĩa mài đến lượng vật liệu được cắt gọt và độ nhám bề mặt như hình 7 và hình 8.



Hình 7: Mối quan hệ giữa tốc độ cắt và lượng vật liệu cắt gọt



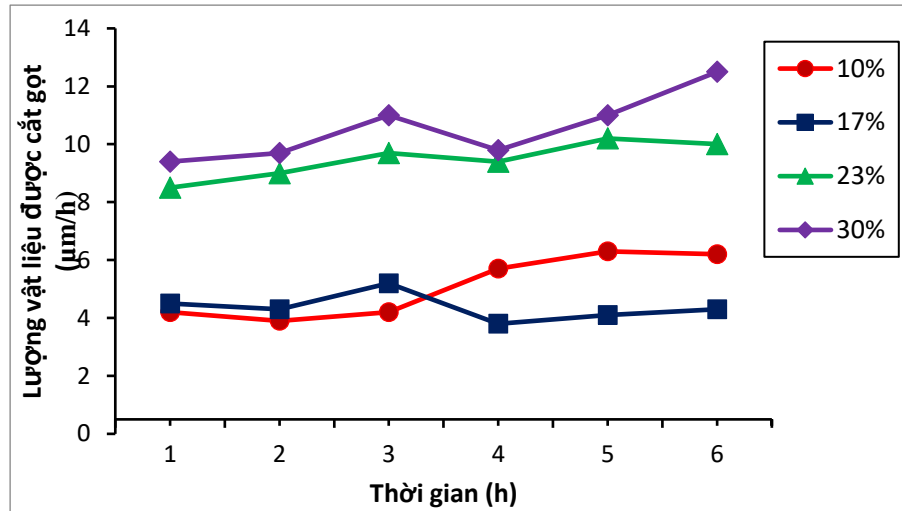
Hình 8: Mối quan hệ giữa tốc độ cắt và độ nhám bề mặt

Kết quả thực nghiệm ở hình 7 cho thấy rằng, với tốc độ cắt khác nhau thì lượng vật liệu cắt gọt sẽ thay đổi. Tốc độ cắt càng tăng thì lượng vật liệu được loại bỏ sẽ tăng lên. Khi tốc độ cắt tăng từ 20 (vòng/phút) đến tốc độ 80 (vòng/phút) thì tỷ lệ loại bỏ vật liệu theo thời gian sẽ tăng lên khoảng 3 lần.

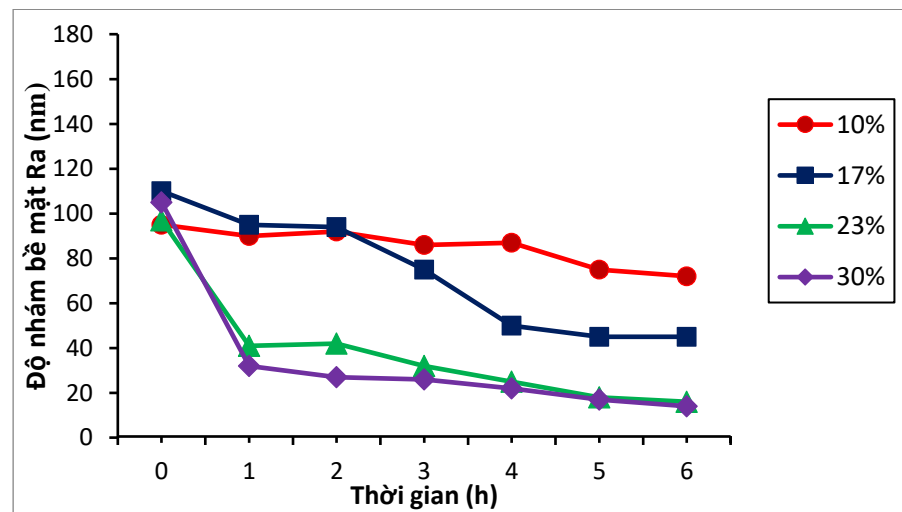
Ở kết quả thực nghiệm hình 8, độ nhám bề mặt của chi tiết giảm khi tăng tốc độ gia công và thời gian gia công. Độ nhám bề mặt giảm nhanh ở 3 giờ gia công đầu tiên, còn sau đó độ nhám bề mặt có thay đổi nhưng tốc độ giảm tương đối ít. Với tốc độ gia công 80 (vòng/phút) và sau 6 giờ gia công thì độ nhám bề mặt đạt được cao nhất là khoảng 13nm.

4.2. Ảnh hưởng của nồng độ dung dịch mài

Quá trình thực nghiệm ảnh hưởng của nồng độ dung dịch mài đến lượng vật liệu cắt gọt và độ nhám bề mặt được thực hiện với hạt mài có đường kính hạt mài trung bình là $7.5 \mu\text{m}$ và tốc độ chuyển động của đĩa mài là 80 (vòng/phút). Nồng độ dung dịch mài được thiết lập lần lượt là 10%, 17%, 23%, 30%. Kết quả ảnh hưởng của nồng độ dung dịch mài đến lượng vật liệu được cắt gọt và độ nhám bề mặt như hình 9 và hình 10.



Hình 9: Mối quan hệ giữa nồng độ dung dịch mài và lượng vật liệu cắt gọt



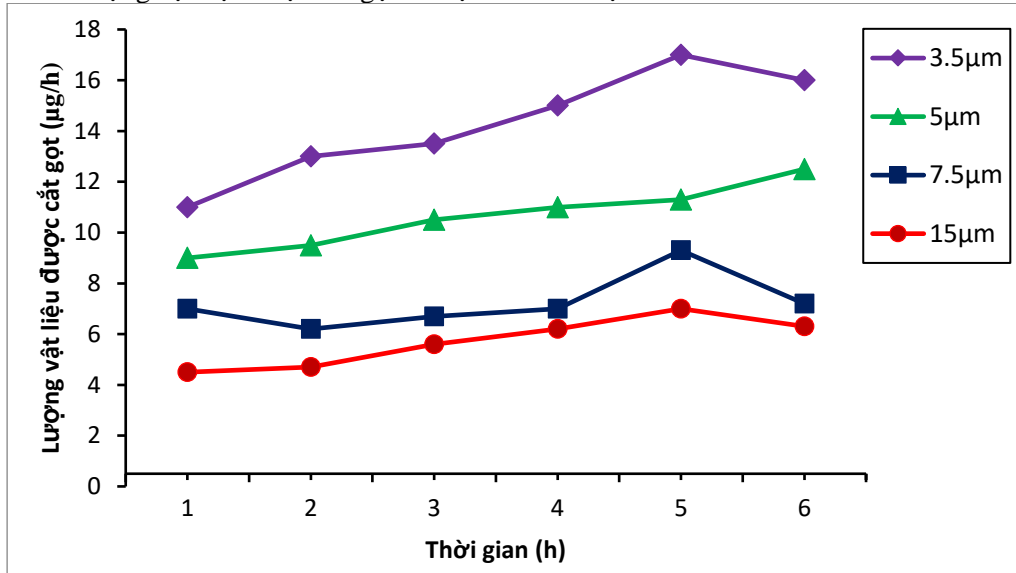
Hình 10: Mối quan hệ giữa nồng độ dung dịch mài và độ nhám bề mặt

Kết quả thực nghiệm ở hình 9 cho thấy rằng, với nồng độ dung dịch mài khác nhau thì lượng vật liệu cắt gọt sẽ thay đổi. Lượng vật liệu được loại bỏ sẽ tăng lên khi tăng nồng độ dung dịch mài. Lượng vật liệu được loại bỏ đạt giá trị lớn nhất là $12.5 (\mu\text{m}/\text{h})$ với nồng độ dung dịch mài 30% sau khoảng 6 giờ gia công.

Với kết quả ở hình 10 cho thấy rằng, độ nhám bề mặt chi tiết giảm rõ rệt tương thích với sự thay đổi của nồng độ dung dịch mài. Độ nhám bề mặt giảm nhanh chóng trong một giờ gia công đầu tiên với nồng độ dung dịch mài là 23% và 30%. Độ nhám bề mặt đạt giá trị tốt nhất là khoảng 14nm với nồng độ dung dịch mài 30%. Tuy nhiên, với nồng độ dung dịch mài 10% thì độ nhám hầu như ít thay đổi theo thời gian gia công. Điều này có nghĩa là, khi nồng độ dung dịch thấp thì tỷ lệ hạt mài trong dung dịch sẽ ít, do đó khả năng tạo ra ứng suất cắt, sự kết dính và đông đặc của dung dịch giảm xuống. Kết quả là hiệu quả của quá trình mài và chất lượng bề mặt gia công sẽ giảm xuống.

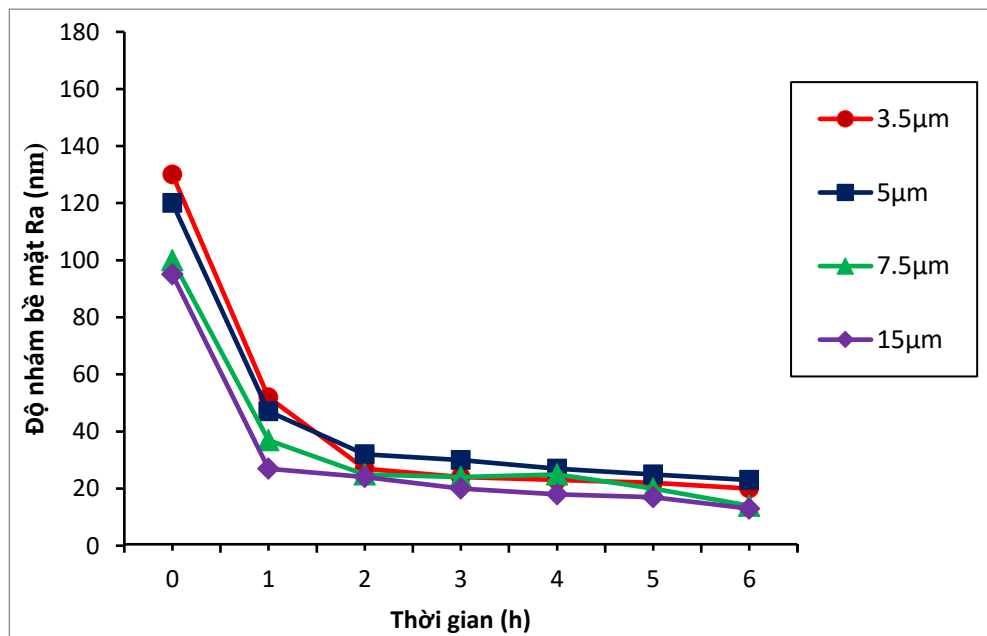
4.3. Ảnh hưởng của kích thước hạt mài

Ảnh hưởng của kích thước hạt mài đến lượng vật liệu cắt gọt và độ nhám bề mặt được thực hiện với dung dịch mài có nồng độ 23% và tốc độ chuyển động của đĩa mài là 80 (vòng/phút). Kích thước hạt mài được chọn trong thực nghiệm lần lượt là $3.5\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$, $7.5\mu\text{m}$, và $15\mu\text{m}$. Kết quả ảnh hưởng của kích thước hạt mài đến lượng vật liệu được cắt gọt và độ nhám bề mặt như hình 11 và hình 12.



Hình 11: Mối quan hệ giữa kích thước hạt mài và lượng vật liệu cắt gọt

Kết quả thực nghiệm cho thấy rằng lượng vật liệu được cắt gọt sẽ giảm với việc tăng kích thước của hạt mài. Sau khoảng 3 giờ gia công thì lượng vật liệu cắt gọt giảm từ $13.5 (\mu\text{m}/\text{h})$ xuống $5.6 (\mu\text{m}/\text{h})$ với kích thước hạt mài khác nhau từ $3.5 \mu\text{m}$ đến $15 \mu\text{m}$. Điều này có thể giải thích rằng, khi kích thước hạt mài càng tăng thì lượng hạt mài trong dung dịch tiếp xúc với bề mặt chi tiết gia công sẽ giảm xuống, dẫn đến là lượng vật liệu cắt gọt trên đơn vị thời gian cũng giảm theo. Còn khi kích thước hạt mài nhỏ thì lượng hạt mài trong dung dịch sẽ tiếp xúc nhiều hơn với bề mặt gia công nên lượng vật liệu cắt gọt tăng lên.



Hình 12: Mối quan hệ giữa kích thước hạt mài và độ nhám bề mặt

Như kết quả ở hình 12, ảnh hưởng của kích thước hạt mài đến độ nhám bề mặt chi tiết gia công cũng không đáng kể. Độ nhám bề mặt giảm xuống nhanh chóng ở giờ gia công đầu tiên. Sau đó, độ nhám hầu như không thay đổi khi thời gian gia công tăng lên. Độ nhám bề mặt đạt được sau 6 giờ gia công khoảng từ 16 nm đến 21 nm với kích thước hạt mài từ 3.5 μm đến 15 μm . Điều này cho thấy rằng, kích thước hạt mài ảnh hưởng không đáng kể đến độ nhám bề mặt.

Bề mặt chi tiết trước và sau gia công được thể hiện như hình 13.



Hình 13: Bề mặt chi tiết: (a) trước gia công và (b) sau gia công

5. KẾT LUẬN

Một phương pháp gia công mài tinh bề mặt cầu bằng chất lỏng phi Newton đã được nghiên cứu trong bài báo này. Đây là phương pháp gia công đơn giản mà có thể gia công mài tinh các bề mặt cong phức tạp. Dựa trên các kết quả thực nghiệm về ảnh hưởng của tốc độ gia công, nồng độ dung dịch mài và kích thước hạt mài đến lượng vật liệu cắt gọt và độ nhám bề mặt, có thể rút ra một số kết luận như sau:

1. Tốc độ quay của đĩa mài có ảnh hưởng lớn đến lượng vật liệu cắt gọt và độ nhám bề mặt. Tốc độ quay càng tăng thì lượng vật liệu cắt gọt sẽ tăng lên và chất lượng bề mặt tốt hơn. Với tốc độ quay của đĩa mài là 80 (vòng /phút) thì lượng vật liệu được cắt gọt là khoảng 11 $\mu\text{m}/\text{h}$ và độ nhám bề mặt $Ra = 13$ nm.
2. Nồng độ dung dịch mài cũng là nhân tố quan trọng quyết định đến lượng vật liệu được cắt gọt và độ nhám bề mặt chi tiết gia công. Khi nồng độ dung dịch càng tăng thì hiệu quả cắt gọt và chất lượng bề mặt sẽ tốt hơn. Tuy nhiên, nếu nồng độ dung dịch quá lớn thì ứng suất cắt lại không tăng theo và như vậy hiệu quả gia công không đạt.
3. Kích thước hạt mài hầu như không ảnh hưởng đến độ nhám bề mặt chi tiết gia công. Kích thước hạt mài càng giảm thì lượng vật liệu cắt gọt sẽ tăng lên. Do kích thước càng giảm thì tỷ lệ tiếp xúc của hạt mài lên bề mặt gia công sẽ tăng lên làm lượng vật liệu được cắt gọt đồng nghĩa tăng theo.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi quỹ nghiên cứu khoa học cấp cơ sở của trường Đại học Công Nghiệp TP.HCM (mã số đề tài: IUH.KCK 02/2016).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. X. Zhang, B. Kuhlenk Otter, K. Kneupner, An efficient method for solving the signorini problem in the simulation of freeform surfaces produced by belt grinding, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 46, no. 1, pp. 641–648, 2005.
2. D.W. Kim, J. H. Burge, Rigid conformal polishing tool using non-linear visco - elastic effect, *Opt. Express*, vol. 18, no. 3, pp. 2242–2257, 2010.

3. S.Y. Zeng, L. Blunt, Experimental investigation and analytical modelling of the effects of process parameters on material removal rate for bonnet polishing of cobalt chrome alloy, *Precision Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 348–355, 2014.
4. H. Tsuwa, N. Ikawa, Y. Mori, Numerically controlled elastic emission machine, *CIRP Ann. – Manuf. Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 193–197, 1979.
5. J.M. Steigerwald, S.P. Murarka, R.J. Gutmann, Chemical Mechanical Planarization of Microelectronic Materials, A Wiley – Interscience Publication John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
6. J. Watanabe, J. Suzuki, A. Kobayashi, High precision polishing of semi-conductor materials using hydrodynamic principle, *CIRP Ann. – Manuf. Technol.*, vol. 30, no. 1, pp. 91–95, 1981
7. Y. Tani, K. Kawata, K. Nakayama, Development of high - efficient fine finishing process using magnetic fluid, *CIRP Ann. – Manuf. Technol.*, vol. 33, no. 1, pp. 217–220, 1984.
8. A.B. Shorey, K.M. Kwong, K.M. Johnson, S.D. Jacobs, Nanoindentation hardness of particles used in magnetorheological finishing (MRF), *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 28, pp. 5194 –5204, 2000
9. N.J. Wagner, J.F. Brady. Shear thickening in colloidal dispersions, *Phys.Today.*, vol. 62, no. 10, pp. 27–32, 2009
10. M. Li, B.H. Lyu, J.L. Yuan, C.C. Dong, W. Dai, Shear thickening polishing method, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 94, no. 1, pp. 88–99, 2015.

Ngày nhận bài: 21/03/2017

Ngày chấp nhận đăng: 08/07/2017