

TÌM HIỂU CÔNG NGHỆ MÀI KHI MÀI HỢP KIM TITAN BẰNG ĐÁ MÀI CBN

STUDYING ABOUT GRINDING TECHNOLOGY WHEN GRINDING TITAN ALLOYS WITH CBN GRINDING WHEEL

Lương Hải Chung^{1*}, Trương Hoàn Sơn², Nguyễn Kiên Trung²,
Trần Văn Hưởng², Nguyễn Khắc Chính¹

¹Khoa Cơ khí chế tạo, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Vinh

²Trường Cơ khí, Đại học Bách Khoa Hà Nội

TÓM TẮT

Mài là một trong những nguyên công quan trọng trong lĩnh vực gia công cắt gọt kim loại. Mùi được xem là quá trình gia công tinh cuối cùng sau khi được gia công bằng các phương pháp như hàn, tiện, phay, bào,... nhằm xử lý độ phẳng, nhẵn bóng bề mặt, loại bỏ bavaria của chi tiết gia công. Hiện nay, quá trình ứng dụng vật liệu có khả năng chịu nhiệt, độ bền, độ cứng cao vào chế tạo thiết bị y tế đang ngày càng lớn, mỗi năm cả nước có tới hàng chục nghìn trường hợp cần nẹp xương, trồng răng, làm van tim... Vật liệu hợp kim Titan nhờ đặc tính chống ăn mòn tốt và chịu nhiệt cao, đồng thời tương thích sinh học tốt nên được ứng dụng rộng rãi trong y tế để làm các bộ phận giả, thay thế các cơ quan trong cơ thể, đặc biệt là xương. Các chi tiết làm từ hợp kim Titan thường có độ bền và độ cứng rất cao, do đó nếu gia công bằng các phương pháp như phay, tiện sẽ khó khăn và độ nhẵn bóng bề mặt không cao như phương pháp mài. Như vậy, việc ứng dụng phương pháp mài vào quá trình sản xuất thiết bị y tế là rất cần thiết, đặc biệt đá mài CBN và đá mài kim cương được sử dụng phổ biến để gia công các chi tiết có độ bền, độ cứng cao đạt độ chính xác và độ bóng theo yêu cầu.

Từ khóa: Công nghệ mài; Đá mài CBN; Thiết bị y tế; Hợp kim Titan.

ABSTRACT

Grinding is one of the important operations in the field of metal cutting processing. Grinding is considered the final finishing process after machining by methods such as welding, turning, milling, planing, etc. to handle flatness, smooth surface, and remove burrs of part. Currently, the application of materials with heat resistance, durability, and high hardness in manufacturing medical equipment is growing, every year, the whole country has tens of thousands of cases that need bone splints, dental implants, heart valves... Titanium alloy material - because of its good anti-corrosion, high heat resistance properties and good biocompatibility - be used widely in medicine to make prosthetics and replace organs in the body, especially bones. Parts made from Titanium alloys often have very high strength and hardness, so machining by methods such as milling or turning will be difficult and the surface smoothness will not be as high as grinding. Thus, the application of grinding methods in the production of medical equipment is very necessary, especially CBN grinding wheels and diamond grinding wheels are commonly used to process parts with high durability and hardness, achieve the required precision and gloss.

Keywords: Grinding technology; CBN grinding wheel; Medical equipment; Titanium alloys. 

1. TỔNG QUAN

Hiện nay, trên thị trường, đá mài CBN khá phong phú về chủng loại, hình dáng (hình 1) và được sử dụng ngày càng nhiều do vật liệu hạt mài CBN có các đặc tính mài nổi bật như có độ dẫn nhiệt, độ bền cao và tính chống mài mòn tốt, khả năng mài được ở nhiệt độ cao và đặc biệt là có độ cứng rất cao (chỉ sau kim cương). Do vậy, đá mài CBN được xem là dụng cụ cắt thích hợp để mài hợp kim cứng và các hợp kim khó gia công, đặc biệt trong các lĩnh vực như y tế (hình 3), hàng không và khuôn mẫu nhằm đảm bảo năng suất cũng như độ chính xác. Bài báo này thống kê một số công trình nghiên cứu liên quan đá mài CBN và hợp kim Titan, đồng thời làm rõ đặc điểm cũng như khả năng ứng dụng của chúng.



Hình 1. Một số hình dạng đá mài CBN.



Hình 2. Mài sắc dao mổ y tế (a) và mài bóng, xử lý bavaria chi tiết nẹp xương (b) (làm bằng vật liệu thép không gỉ và hợp kim Titan) bằng đá mài CBN trên máy CNC.

Trong nước đã có một số công trình nghiên cứu liên quan về quá trình mài và đánh giá khả năng cắt gọt của đá mài CBN như: Hoàng Văn Điện và các đồng nghiệp (2007) [1], “Nghiên cứu quá trình mòn của đá mài và ảnh hưởng của nó đến chất lượng bề mặt chi tiết khi mài phẳng”. Nghiên cứu này đã xây dựng được

mối quan hệ giữa mòn đá mài với các thông số chất lượng và các thông số trung gian khác xuất hiện ngay trong quá trình mài thông qua việc nghiên cứu cả lý thuyết và thực nghiệm. Trần Thị Vân Nga và các đồng nghiệp (2017) [2], “Nghiên cứu chế tạo và đánh giá khả năng cắt gọt của đá mài CBN liên kết kim loại bằng phương pháp mạ điện” đã chế tạo thành công đá mài CBN liên kết kim loại sử dụng công nghệ mài Composite Ni-CBN dùng dung dịch Watts thông qua phương pháp mạ điện. Phí Trọng Hùng và các đồng nghiệp (2018) [3], “Phương pháp nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến chất lượng bề mặt, độ mòn đá và năng suất gia công khi mài phẳng hợp kim Ti-6Al-4V bằng đá mài CBN”, đã sử dụng phương pháp nghiên cứu tối ưu bầy đàn (PSO) để xác định chế độ cắt tối ưu khi mài chi tiết vật liệu Ti-6Al-4V bằng đá mài CBN. Phí Trọng Hùng và các đồng nghiệp (2021) [4], “Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến chất lượng bề mặt và năng suất gia công khi mài phẳng chi tiết từ vật liệu hợp kim Ti-6Al-4V bằng đá mài CBN”, bằng nghiên cứu lý thuyết kết hợp với thực nghiệm đã đưa ra được bộ thông số công nghệ tối ưu (lượng tiến dao dọc, chiều sâu cắt, chế độ bôi trơn làm mát) để góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế kỹ thuật của quá trình mài phẳng chi tiết từ vật liệu hợp kim Ti-6Al-4C bằng đá mài CBN.

Trên thế giới, việc ứng dụng công nghệ mài bằng đá mài CBN trong quá trình sản xuất và trong các lĩnh vực khoa học kỹ thuật được nhiều nhà khoa học quan tâm nghiên cứu. Xuekun Li và các cộng sự [5, 6] (2015) đã nghiên cứu về các dạng sai hỏng của đá mài CBN đơn lớp liên kết kim loại bằng phương pháp mạ điện, họ nhận thấy lực liên kết của hạt mài mạ điện là yếu tố chính quyết định chất lượng mài và tuổi thọ của đá mài, từ đó thiết lập thử nghiệm để quan sát và định lượng các

dạng sai hỏng cũng như lực liên kết lớn nhất. Tiếp theo đó, họ thiết lập mô hình phần tử hữu hạn (FEM) để phân tích định lượng và tối ưu hóa lực liên kết hạt mài CBN và được kiểm chứng thông qua các thí nghiệm về lực liên kết. Tianyu Yu và các đồng nghiệp [7] (2017) bằng phương pháp thực nghiệm kết hợp với mô hình toán học, nhóm nghiên cứu đã xác định độ mòn và tuổi bền của đá mài CBN một lớp mạ điện Nickel dựa trên thay đổi hình dáng hình học bề mặt đá sau khi mài hợp kim Inconel 718. Ngoài ra, nghiên cứu này chỉ ra rằng ứng suất trên các hạt mài do thay đổi nhiệt sinh ra lớn gấp 3-5 lần ứng suất do lực cắt cơ học sinh ra. Chen-Wei Dai và các đồng nghiệp [8] (2017) đã tiến hành khảo sát ảnh hưởng của vận tốc quay đá mài đến nhiệt độ cắt, lực cắt và công suất cắt thông qua thí nghiệm mài cao tốc hợp kim nền Nickel Inconel 718 bằng đá mài CBN thủy tinh hóa. Nhóm nghiên cứu đã tìm ra vận tốc quay của đá khi mài Inconel 718 được tối ưu là $100 \div 120 \text{ m/s}$ trong điều kiện thí nghiệm đã đưa ra. Arnab Kundu và các đồng nghiệp [9] (2018) đã phân tích và so sánh hiệu quả của việc sử dụng dung dịch làm mát là nước xà phòng kiểm theo hai cách là nhỏ giọt và phun cao tốc khi mài Titan grade 1 (Titan thương mại tinh khiết 99,2%) bằng đá mài ô-xit nhôm. Kết quả chỉ ra rằng, sử dụng vòi phun nước xà phòng sẽ tạo ra lực tiếp tuyến nhỏ, chất lượng bề mặt chấp nhận ở mức yêu cầu, và giá trị độ nhám bề mặt thấp hơn. Hanqiang Wu và các đồng nghiệp [10] (2023) đã nghiên cứu ảnh hưởng của dao động sóng siêu âm đến cơ chế và tác động đồng thời của phương pháp mài dao động có sự trợ giúp của ô-xy hóa plasma. Kết quả của bài báo đã chỉ ra rằng lực mài sẽ giảm đáng kể nếu trong quá trình mài có sự tác động của sóng siêu âm. CBN mặc dù mềm hơn kim cương nhưng ít tham gia vào các phản ứng hóa học ở nhiệt độ cao và ít bị ăn mòn kể cả khi mài các thép hợp kim. Do đó, ngày nay đá mài CBN được coi là dụng cụ

thích hợp nhất trong việc mài các vật liệu chứa sắt vì nó ổn định đến 1371°C và không phản ứng với sắt [11].

Trong các nghiên cứu thống kê gần đây cho thấy, hợp kim Titan được ứng dụng nhiều vào các sản phẩm y tế nhằm thay thế các bộ phận cơ thể người, đặc biệt là xương bởi độ bền và tính tương thích sinh học của Titan, điều này giúp chúng ta cải thiện cuộc sống ngày càng tốt hơn [12 - 15]. Bên cạnh đó, đá mài CBN là dụng cụ cắt gọt được ứng dụng cho quá trình gia công các vật liệu cứng, vật liệu khó cắt gọt, Titan là một trong số đó, rất nhiều nghiên cứu đã đưa ra các công bố về quá trình mài hợp kim Titan bằng đá mài CBN thể hiện ưu điểm vượt trội so với các dụng cụ cắt gọt khác. Ngoài ra, còn có nhiều nghiên cứu khác liên quan đến các phương pháp xử lý bề mặt để tăng cơ tính cho hợp kim Titan.

2. HỢP KIM TITAN

2.1. Đặc tính và ứng dụng

Hợp kim titan là loại vật liệu được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật khác nhau như hàng không, ô tô, động cơ, tuabin khí, hạt nhân, y sinh (làm khung và động cơ máy bay, cánh tuabin hơi nước, tên lửa, tàu biển, thiết bị hóa học và y sinh học). Chúng có các tính chất cơ lý vượt trội như tỉ số độ bền trên trọng lượng lớn, giới hạn đàn hồi cao, tính chống ăn mòn rất tốt, độ dai lớn và tính tương thích sinh học tốt. Ngoài ra, titan còn có tỉ lệ giữa độ bền và khối lượng cao nhất khi nhiệt độ lên tới 550°C . Tuy nhiên, nó cũng có những nhược điểm như dễ phản ứng hóa học với dụng cụ cắt, tính dẫn nhiệt kém, nhiệt dung riêng lớn và ứng suất hóa cứng cao làm năng suất gia công thấp và tuổi bền của dao ngắn. Tính dẫn nhiệt kém của titan khiến nhiệt độ tại vùng cắt và ứng suất nhiệt



trên lưỡi cắt tăng. Do hợp kim titan bền ở nhiệt độ cao nên nhiệt độ tăng không có lợi vì dao sẽ bị mềm nhiệt. Titan phản ứng hóa học với hầu hết vật liệu dụng cụ cắt. Phản ứng này tăng lên khi nhiệt độ tăng làm dao bị mòn và bám dính, lưỡi cắt bị bong tróc, xây xát và hình thành lẹo dao. Mặc dù lực cắt khi gia công titan xấp xỉ với thép, nhưng ứng suất trên lưỡi cắt lớn hơn nhiều. Ứng suất cơ học này và ứng suất nhiệt do ma sát giữa phoi và dao khiến mặt trước dao bị mòn lõm. Phoi khi gia công titan có dạng răng cưa làm tăng rung động khiến lưỡi cắt bị sút mẻ. Ứng suất, nhiệt độ và rung động là những nguyên nhân chính gây ra hư hỏng và làm giảm tuổi bền dụng cụ. Những yếu tố này xuất hiện nhiều hơn khi gia công những vật liệu khó cắt gọt. Do đó, vật liệu dao nào có thể chịu được ứng suất, nhiệt độ và rung động lớn thì sẽ phù hợp để gia công hợp kim titan [16]. Hợp kim titan được sử dụng phổ biến nhất là Ti-6Al-4V, chiếm đến 50% thị trường titan. Đây là hợp kim titan dạng alpha-beta chứa 6% nhôm và 4% Vanadi theo khối lượng. Nó có độ bền, độ dai và tính chống ăn mòn rất tốt. Hợp kim titan này thường được sử dụng trong công nghiệp hàng không (làm cánh máy nén khí và tuabin khí, khung máy bay), nồi áp suất và cấy ghép phẫu thuật [17].

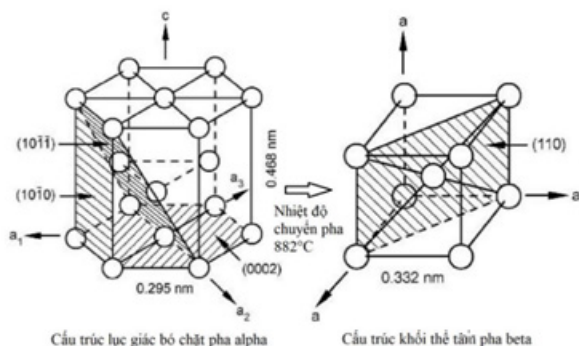
Titanium có ái lực tốt với mô liên kết của con người và mô biểu mô xương, và tính chất cơ học tuyệt vời của nó cũng phản ánh những lợi thế trong lĩnh vực y tế. Với cấu tạo tinh thể có mật độ nhỏ, chất lượng nhẹ, chống ăn mòn tốt, do đó titan đã được chấp nhận rộng rãi trong lĩnh vực làm răng giả (trồng răng). Theo các thống kê gần đây, khoảng 100 triệu bệnh nhân trên thế giới bị viêm khớp gối và khớp cánh tay mỗi năm, buộc phải thực hiện phẫu thuật thay thế và hợp kim titan là một thay thế tuyệt vời. Các báo cáo cho thấy dân số người cao tuổi tăng đáng kể ở Hoa Kỳ và các

nước kém phát triển sau năm 2010 (từ 4,9 triệu năm 2002 lên 39,7 triệu năm 2010) và hầu hết họ trên 40 tuổi đều có thể mắc các loại bệnh thoái hóa xương khớp. Vì vậy, sử dụng cấy ghép nhân tạo y sinh học để phục hồi chức năng của mô cứng bị bệnh bằng phẫu thuật cấy ghép là giải pháp tốt nhất cho người bệnh. Số liệu về phẫu thuật thay thế toàn bộ khớp ở Hoa Kỳ cho thấy đến cuối năm 2030, tổng số ca phẫu thuật thay thế sẽ tăng 174% (0,57 triệu ca) đối với thay khớp háng và 673% (3,48 triệu ca) đối với thay khớp gối so với hiện tại. So với gốm, thép không gỉ và các vật liệu khác, mô đun đàn hồi của hợp kim titan gần với xương người hơn và nó có lợi thế hơn về mô đun. Do đó, hợp kim titan được sử dụng rộng rãi trong việc điều chỉnh khớp mắt cá chân và khớp khuỷu tay. Ngoài ra, titanium còn được ứng dụng nhiều trong việc tái tạo hộp sọ, van tim nhân tạo,... [18].

2.2. Cấu trúc tinh thể

Titan có hai dạng cấu trúc tinh thể là pha alpha (hcp) và pha beta (bcc). Ở nhiệt độ bình thường, titan có cấu trúc tinh thể pha alpha dạng lục giác bó chặt (hcp). Nó trải qua biến đổi thù hình ở nhiệt độ 882°C để chuyển sang pha beta dạng khối tâm (bcc). Pha này ổn định cho đến khi titan nóng chảy ở nhiệt độ 1668°C. Hình 4 mô tả hai dạng thù hình của titan. Nhiệt độ chuyển pha (β - nhiệt độ chuyển pha) sẽ thay đổi nếu trong hợp kim có thêm các nguyên tố khác. Bổ sung nhôm (Al), Galium (Ga), ô-xy (O), Ni-tơ (N) và cacbon (C) vào titan sẽ làm tăng nhiệt độ chuyển pha của nó. Các nguyên tố này được gọi là chất ổn định pha alpha. Ngược lại, thêm các nguyên tố như Vanadi (V), Molipden (Mo), Niobium (Nb), sắt (Fe), Crôm (Cr), Niken (Ni), Mangan (Mn) và Coban (Co) làm giảm nhiệt độ chuyển pha. Do đó, chúng được gọi là chất ổn định pha beta. Các nguyên

tổ ít ảnh hưởng đến nhiệt độ chuyển pha như thiếc (Sn) và Zirconium (Zr) gọi là nguyên tố trung tính [4].



Hình 3. Các dạng tinh thể của titan tinh khiết [4].

2.3. Tính gia công cắt gọt của hợp kim titan

Dựa vào các nghiên cứu thực nghiệm, người ta nhận thấy phần lớn các dụng cụ mặc dù có hiệu suất tốt khi gia công các vật liệu khác nhưng lại cho hiệu suất từ trung bình đến kém khi cắt gọt hợp kim titan. Tính khó gia công của titan là kết hợp của các đặc điểm sau [4]:

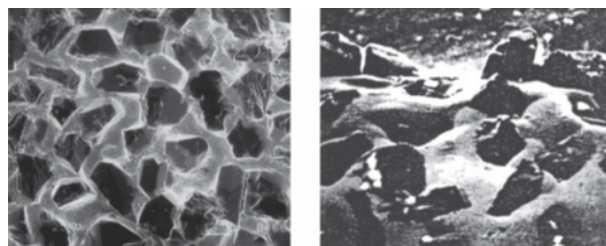
- Tính dẫn nhiệt kém;
- Dễ phản ứng hóa học;
- Mô đun đàn hồi nhỏ;
- Hiệu ứng hóa cứng.

3. ĐÁ MÀI CBN

3.1. Tổng quan về đá mài CBN

Đá mài CBN là loại đá mài mà vật liệu hạt mài là CBN. Đến năm 1994, khoảng 25% quá trình mài ở Nhật Bản, 15% ở châu Âu và 10% ở Mỹ sử dụng đá mài CBN. Do ưu điểm của hạt mài CBN nên đá mài CBN ngày càng được sử dụng rộng rãi trong lĩnh vực mài [2]. Về nhiều mặt thì hạt mài CBN và hạt mài kim cương khá giống nhau. Cả hai cùng có cấu trúc

mạng tinh thể dạng khối và tính dẫn nhiệt cao. Tuy vậy, chúng cũng có những tính chất hết sức khác biệt. Ví dụ, kim cương thiên về graphit hóa (khi nhiệt độ là 900°C) và dễ bị oxy hóa trong không khí, có phản ứng với các chi tiết gia công chứa sắt ở nhiệt độ cao. Ngược lại, CBN thì ổn định, không bị ô-xi hóa khi nhiệt độ lên tới 1300°C và có thể gia công dễ dàng các chi tiết chứa sắt. Do độ cứng rất cao và tốc độ mòn chậm nên gia công bằng đá mài CBN có khả năng đạt độ chính xác cao. Loại đá mài này đòi hỏi sửa đá rất ít và có khả năng lấy đi lượng dư đều đặn mà không cần bù mòn đá. Do tác động mài nguội (mài có bôi trơn làm mát) nên rất ít hoặc không có hư hỏng bề mặt chi tiết [4]. Trong Hình 6 là ảnh kính hiển vi điện tử quét (SEM) của (a) đá mài CBN mạ đồng và (b) đá mài CBN mạ điện. Hình vẽ cho thấy sự nhô lên rõ ràng của hạt mài so với chất kết dính, đặc biệt là đá mài mạ điện, và độ sắc phần nhô lên của hạt mài. Đặc điểm này mang lại ưu thế khi mài nguội và giúp đá mài có hệ số bóc gọt vật liệu cao.



a) b)

Hình 4. Hình ảnh SEM của đá mài CBN: Đá mài CBN mạ đồng (a) và mạ điện (b) [4]

Ở nhiệt độ trên 900°C, CBN có thể bị phân hủy do phản ứng hóa học với nước. Do đó, cần thận trọng khi sử dụng dung dịch làm mát có chứa nước khi mài bằng đá mài CBN. Các phản ứng này sẽ phá hủy nghiêm trọng hạt mài CBN và làm giảm nhanh tuổi bền đá mài [4].



3.2. Đặc tính của đá mài CBN

Đá mài CBN có một số đặc điểm vượt trội so với đá mài thông thường. Các đặc điểm này được liệt kê trong Bảng 1 và được mô tả như sau [4]:

- Tính dẫn nhiệt tốt: Đá mài CBN có tính dẫn nhiệt tốt (từ 200 đến 1300 W/mK ở nhiệt độ thường), do đó có thể nhanh chóng phân tán nhiệt khỏi vùng cắt. Tính dẫn nhiệt của cBN gần bằng kim cương, trong khi độ giãn nở nhiệt cao hơn kim cương khoảng 20%.

- Độ cứng cao: Độ cứng của hạt mài CBN ở nhiệt độ bình thường là khoảng 4500 kg/mm², bằng một nửa kim cương và gấp đôi các hạt mài thông thường. Độ cứng của CBN giảm khá nhanh ở nhiệt độ cao do cấu trúc tinh thể biến đổi thành dạng lục giác. Tuy nhiên, giá trị này vẫn cao hơn hạt mài thông thường.

- Hạt mài sắc hơn: Hạt mài CBN có lưỡi cắt sắc hơn và góc trước từ -30°C đến -60°C (trong khi hạt mài bình thường là -60°C đến -70°C), nên giảm ma sát và nhiệt độ cắt khi mài.

- Tính chống mài mòn cao: Đá mài CBN mòn chậm hơn đá mài ô-xít nhôm và silic cacbit do chúng có độ cứng cao hơn, cũng có nghĩa là hệ số mài lớn hơn. Tuy nhiên, sự khác biệt về tính chống mài mòn lớn hơn nhiều so với độ cứng. Chênh lệch độ cứng bằng 2 có thể chuyển thành chênh lệch tính chịu mài mòn từ 100 đến 1000 tùy theo vật liệu hạt mài.

- Độ bền nhiệt tốt: CBN bền nhiệt trong ni-tơ hoặc chân không đến ít nhất 1500°C. Trong không khí hoặc ô-xy, CBN tạo thành một lớp bảo vệ B₂O₃ trên bề mặt để ngăn cản quá trình ô-xy hóa tới 1300°C. Tuy nhiên, lớp này

phản ứng với nước, chính xác hơn là hơi nước ở nhiệt độ 900°C.

Bảng 1. Đặc tính của các loại hạt mài khác nhau ở nhiệt độ thường [4]

	Độ cứng Knoop, HK, (GPa)	Hệ số dẫn nhiệt (W/mK)	Khối lượng riêng (kg/m ³)	Nhiệt dung riêng (J/kgK)	Hệ số khuếch tán (mm ² /s)
Kim cương	90	600 - 2000	3520	511	333 - 1110
cBN	40 - 70	240 - 1300	3480	506	136 - 738
SiC	24	100	3210	710	44
Al ₂ O ₃	21	35	3980	765	11.5

4. KẾT LUẬN

Hiện nay, với các đặc tính vượt trội của mình, đá mài nitrit bo dạng khối (cBN), nitrit bo dạng khối đa tinh thể (PcBN) và nitrit bo dạng khối không chất kết dính (BcBN) chủ yếu được sử dụng để gia công các vật liệu khó cắt gọt như thép rèn (45-68 HRC), thép hợp kim (70 HRC), hợp kim niken và coban. Đá mài họ cBN có khả năng đạt được đồng thời hệ số bóc gọt vật liệu cao và nhám bề mặt đạt yêu cầu. Chúng có thể gia công hợp kim titan ở tốc độ cắt cao hơn nhiều so với đá mài ô-xít nhôm hoặc cacbit silic [19]. Bằng các thực nghiệm, các nhà nghiên cứu nhận thấy rằng khi có sử dụng chất làm mát và làm sạch thì đá mài kim cương mài hợp kim titan tốt nhất, tiếp đến là đá mài cBN và cuối cùng là đá mài SiC [4].❖

Ngày nhận bài: 03/01/2024

Ngày phản biện: 22/01/2024

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Hoàng Văn Điện; *Nghiên cứu quá trình mòn của đá mài và ảnh hưởng của nó đến chất lượng bề mặt chi tiết khi mài phẳng*, Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật, Đại học Bách khoa Hà Nội, 2007.
- [2]. Trần Thị Vân Nga; *Nghiên cứu chế tạo và đánh giá khả năng cắt gọt của đá mài CBN*

- liên kết kim loại bằng phương pháp mạ điện, Tạp chí Khoa học Giao thông Vận tải, Volume 58, 2017, pp. 68-74.
- [3]. Hoàng Văn Gọt, Trương Hoàng Sơn; *Phương pháp nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến chất lượng bề mặt, độ mòn đá và năng suất gia công khi mài phẳng hợp kim Ti-6Al-4V bằng đá mài CBN*, Hội nghị Khoa học và Công nghệ toàn quốc về Cơ khí lần thứ V, (2018), pp.520-527.
- [4]. Phí Trọng Hùng; *Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến chất lượng bề mặt và năng suất gia công khi mài phẳng chi tiết từ vật liệu hợp kim Ti-6Al-4V bằng đá mài CBN*, Luận án Tiến sĩ Kỹ thuật (2021), Đại học Bách khoa Hà Nội.
- [5]. Xuekun Li, Sebastian Wolf, Tianxing Zhu, Geng Zhi, Yiming (Kevin) Rong, *Modelling and analysis of the bonding mechanism of CBN grains for electroplated superabrasive tools – Part 1: Introduction and application of a novel approach for determining the bonding force and the failure modes*, Int J Adv Manuf Technol (2015) 76:2051-2058.
- [6]. Xuekun Li, Geng Zhi, Sebastian Wolf, Tianxing Zhu, Yiming (Kevin) Rong, *Modelling and analysis of the bonding mechanism of CBN grains for electroplated superabrasive tools – Part 2: Finite element modelling and experimental verification*, Int J Adv Manuf Technol (2015) 77:43-49.
- [7]. Tianyu Yu, Ashraf F. Bastawros, Abhijit Chandra, *Experimental and modeling characterization of wear and life expectancy of electroplated CBN grinding wheels*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 121, 70-80 (2017).
- [8]. Chen-Wei Dai, Wen-Feng Ding, Ye-Jun Zhu, Jiu-Hua Xu, Hai-Wu Yu, *Grinding temperature and power consumption in high speed grinding of Inconel 718 nickelbased superalloy with a vitrified CBN wheel*, Precision Engineering 52, 192-200 (2018).
- [9]. Arnab Kundu, Manish Mukhopadhyay, Sirsendu Mahata, Ayan Banerjee, *Grinding Titanium grade 1 alloy with an alumina wheel using soap water*, Bijoy Mandal and Santanu Das, 2018, Procedia Manufacturing 20, 338-343.
- [10]. Wu, H., Duan, W., Sun, L., Zeng, J., Li, S., Wang, Q., Chen, Y. (2023), *Effect of ultrasonic vibration on the machining performance and mechanism of hybrid ultrasonic vibration/plasma oxidation assisted grinding*, Journal of Manufacturing Processes, 94, 466-478.
- [11]. Xun Chen and W. Brian Rowe (9/1995), *Analysis and simulation of the grinding process – Part 1: Generation of the grinding wheel surface*, Int. J. Math. Tools Manuf. Vol. 36, No. 8, pp. 871-882 (1996).
- [12]. Zhang, L. C., & Chen, L. Y., *A review on biomedical titanium alloys: recent progress and prospect*, Advanced engineering materials (2019), 21(4), 1801215.
- [13]. Wei, G., Tan, M., Attarilar, S., Li, J., Uglov, V. V., Wang, B. & Wang, L. (2023), *An overview of surface modification, a way toward fabrication of nascent biomedical Ti-6Al-4V alloys*, Journal of Materials Research and Technology.
- [14]. Rack, H. J., & Qazi, J. I. (2006), *Titanium alloys for biomedical applications*, Materials Science and Engineering: C, 26(8), 1269-1277.
- [15]. C. N., Lima, J. H. C., Valiev, R., & Meyers, M. A. (2008), *Biomedical applications of titanium and its alloys* Elias, Jom, 60, 46-49.
- [16]. A. Shokrani, V. Dhokia, S.T. Newman (2012), *Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 57, pp. 83-101.
- [17]. S. H. Wang (2000), *Investigation in to the grinding of titanium alloys*, PhD Thesis, School of Industrial and Manufacturing Science, Cranfield University.
- [18]. <https://vn.yunchtitanium.com/info/application-of-titanium-in-medical-35491816.html>
- [19]. J. Paulo Davim (2014), *Machining of titanium alloys*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.