

CÔNG NGHỆ CẮT VẬT LIỆU BẰNG TIA NƯỚC, TIA NƯỚC CÓ HẠT MÀI

Nguyễn Văn Tuấn*

Trường Đại học Ngô Quyền

Đỗ Ngọc Khuê

Trường Đại học Bình Dương

Tóm tắt:

Gia công cơ khí là nội dung rất quan trọng trong các ngành kinh tế xã hội, trong đó có ngành cơ khí, chế tạo máy và đời sống sinh hoạt hàng ngày. Cùng với sự phát triển của khoa học kỹ thuật, công nghệ gia công tạo phoi nói chung và công nghệ gia công cắt gọt vật liệu nói riêng đã có những bước tiến vượt bậc. Nhiều thành tựu khoa học được ứng dụng, nhiều công nghệ mới ra đời, trong đó phải kể đến công nghệ cắt vật liệu sử dụng nước áp lực cao và sử dụng nước áp lực cao có bổ sung hạt mài. Đây là công nghệ mới, mặc dù có quy trình công nghệ đơn giản, giá thành phù hợp, bảo vệ môi trường nhưng hiệu quả làm việc cao, đáp ứng yêu cầu đối với gia công hiện nay. Việc ứng dụng công nghệ gia công cắt gọt vật liệu này là nội dung cần thiết nhằm đáp ứng yêu cầu về kinh tế và góp phần không nhỏ bảo vệ môi trường.

Từ khóa: gia công cắt gọt; công nghệ cắt vật liệu; cắt vật liệu bằng tia nước; gia công cắt sử dụng tia nước có hạt mài.

DOI:

Water jet material cutting technology, water jet with abrasive particles

Abstract:

Mechanical processing is a very important aspect in various economic and social sectors, including the mechanical industry, manufacturing, and daily life. Along with the development of science and technology, chip formation technology in general and material cutting technology in particular have made significant advancements. Many scientific achievements have been applied, and many new technologies have been developed, among which is the high-pressure water cutting technology and the high-pressure water cutting technology with abrasive particles. This is a new technology, although it has a simple process, affordable cost, and environmental protection, it offers high efficiency and meets the current requirements for processing. The application of this material cutting technology is essential to meet economic demands and significantly contribute to environmental protection.

Keywords: Cutting and shaping services; material cutting technology; water jet cutting, cutting services using abrasive water jets.

1. Giới thiệu

Công nghiệp ngày càng phát triển, việc tìm ra phương pháp gia công cắt gọt vật liệu có nhiều ưu điểm hơn so với gia công truyền thống thực sự rất cần thiết. Đặc biệt ưu tiên những công nghệ gia công tạo phoi hoặc không tạo phoi nhưng phải đảm bảo độ chính xác gia công và bảo đảm cơ tính của vật liệu. Công nghệ gia công cắt gọt vật liệu sử dụng nước áp lực cao (tia nước) được xem như cuộc cách mạng, là bước đột phá đáp ứng đầy đủ các tiêu chí đặt ra, mang lại kết quả ngoài mong đợi.

Quá trình cắt gọt vật liệu sử dụng nước áp lực cao là công nghệ gia công cơ khí, dùng dòng nước có áp lực lớn để cắt các kim loại, phi kim,... thông qua một vòi phun nhỏ. Năng lượng của dòng nước rất lớn nên dễ dàng cắt đứt vật liệu theo yêu cầu.

Tùy thuộc sử dụng nước nguyên chất hoặc có pha trộn thêm hạt mài mà công nghệ này được chia làm hai loại: Quá trình cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao (Water Jet Cutting - AWJC): chỉ sử dụng nước không tạp chất. Công nghệ này được ứng dụng trong quá trình gia công cắt gọt các vật liệu có cơ tính không cao (nhựa, cao su, gỗ,...) do năng lượng dòng tia nhỏ.



Hình 1. Máy cắt dùng tia nước

Nguồn: Hiếu, Đ. Đ. (2022)

2. Công nghệ gia công cắt gọt sử dụng tia nước

2.1. Khái niệm

Quá trình cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao là công nghệ gia công cơ khí, dùng dòng nước có áp lực lớn để cắt gọt vật liệu.

Sử dụng công nghệ này có thể tạo vết cắt nhỏ (khoảng 1mm); gia công lỗ có đường kính nhỏ nhất khoảng 1,5mm.

Quá trình này còn được biết với tên gọi công nghệ cắt gọt động lực học thủy lực.

2.2. Cấu tạo

- Hệ thống chứa nước và máy bơm: là bộ phận chứa và cung cấp nước đến cơ cấu tăng áp trước khi vào hệ thống làm việc.

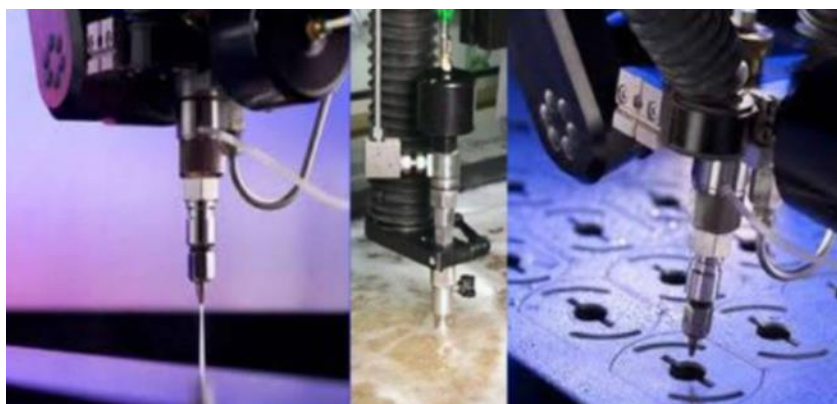
- Cơ cấu khuếch đại (tăng áp): chính là bộ khuếch đại áp suất. Dòng chất lỏng khi qua cơ cấu này, áp suất sẽ được khuếch đại lên hàng nghìn át-mốt-phe.

- Cơ cấu đầu vòi phun (đầu cắt): cơ cấu được chế tạo từ kim loại quý (kim cương hoặc đá sapphire) có đường kính rất nhỏ (0,1mm ÷ 0,4mm) dùng để định hình dòng tia.

Với kết cấu tiết diện bị thu hẹp đột ngột làm cho vận tốc dòng nước được khuếch đại rất lớn (có thể lớn hơn 2,5 lần tốc độ của âm thanh).

Đối với công nghệ gia công cắt gọt vật liệu sử dụng nước áp lực cao có bổ sung hạt mài để cắt các kim loại, phi kim có cơ tính cao, thì ngay tại đầu vòi phun các hạt mài sẽ được hút vào để trộn cùng dòng nước. Tại đây, dòng nước sẽ gia

tốc cho các hạt mài tạo thành dòng hỗn hợp có năng lượng rất lớn.



Hình 2. Đầu vòi phun

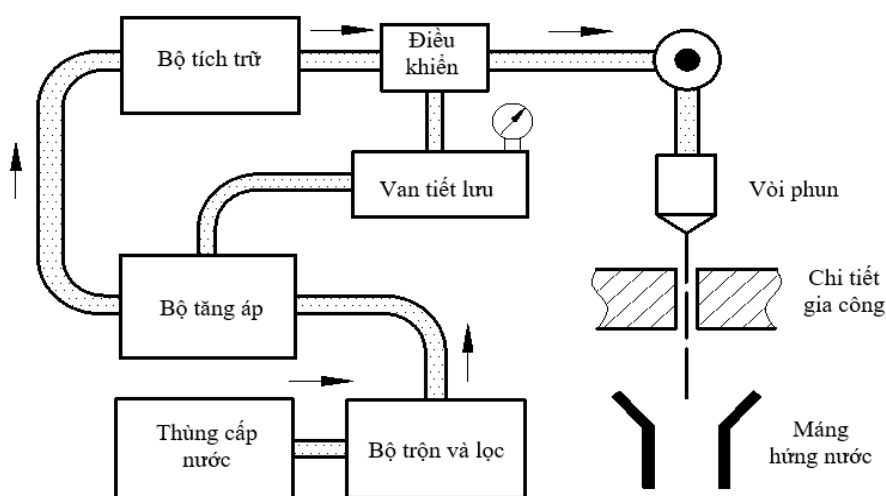
Nguồn: Lương, N. T. (2023)

2.3. Nguyên lí gia công

Đầu tiên nước từ thùng cấp nước đi qua bộ trộn và lọc, sau đó qua hệ thống đường ống đến bộ khuếch đại để tăng áp đến đầu vòi phun. Van điều chỉnh lưu lượng (tiết lưu) có công dụng điều chỉnh áp lực ra của dòng tia tại vòi phun. Van tiết lưu hoạt động nhờ mạch điều khiển. Nước có áp suất lớn ($100\div 400$ Mpa)

được đưa ra khỏi vòi phun, tốc độ tia nước từ 450 - 1100m/s.

Áp suất lớn sẽ phá vỡ kết cấu vật liệu của các kim loại, phi kim mà dòng tia hướng đến. Sự phá vỡ này tạo thành vết cắt trên chi tiết và chi tiết gia công được cắt theo ý định người vận hành. Khi đó, tia nước đóng vai trò là dụng cụ cắt vật liệu, tạo ra sản phẩm.



Hình 3. Sơ đồ nguyên lí gia công sử dụng tia nước

Nguồn: Lương, N. T. (2023)

2.4. Các thông số công nghệ

Gia công cắt sử dụng tia nước đạt hiệu quả cao cần phải quan tâm đến một số thông số quan trọng như sau: khoảng cách gia công, kích thước lỗ vòi phun, áp lực tia nước và vận tốc dịch chuyển của vòi phun.

- Khoảng cách gia công là phạm vi từ chi tiết cần gia công đến đầu vòi phun.

Khoảng cách gia công phải nhỏ để tia nước hội tụ ở mức cao nhất trước khi va chạm vào bề mặt chi tiết gia công.

Theo nghiên cứu thực nghiệm, khoảng cách tối ưu nhất khoảng 3,0mm.

- Đường kính lỗ vòi phun sẽ quyết định trực tiếp đến chất lượng sản phẩm và khả năng gia công của máy.

Chiều dày của chi tiết gia công bé thì chọn vòi phun có đường kính lỗ nhỏ, áp suất phun nhỏ. Chiều dày của chi tiết cần chế tạo lớn thì chọn vòi phun có đường kính lỗ lớn hơn và áp suất cao hơn. Tóm lại, đường kính lỗ vòi phun và áp suất phun tỉ lệ thuận với chiều dày của chi tiết cần chế tạo.

- Vận tốc chạy dao thường dao động trong khoảng $0,005 \div 0,5 \text{ m/s}$ phụ thuộc tính chất vật liệu và độ dày phôi.

Quá trình cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao có thể tự động hóa bằng công nghệ CNC hoặc sử dụng cánh tay rô bốt.

Bảng 1. Chiều dày cắt và tốc độ chạy dao

Vật liệu	Chiều dày cắt (mm)	Tốc độ chạy dao (m/ph)
<i>Da</i>	2,2	20
<i>Nhựa PVC</i>	3	0,5
<i>Nhựa PS</i>	2	150
<i>Kelvar</i>	3	3
<i>Graphit</i>	2,3	5
<i>Tấm thạch cao</i>	10	6
<i>Tấm carton gợn sóng</i>	7	200
<i>Tấm giấy bột</i>	2	120
<i>Gỗ dán</i>	6	1

Nguồn: Đăng, T. H. (2018); Đệ, Đ. V. (2013)

2.5. Đặc điểm và phạm vi ứng dụng

a) Ưu điểm

- Độ bóng, độ nhẵn bề mặt vết cắt rất cao.

- Cắt được các chi tiết mỏng với chất lượng tốt; cắt theo ý định của người vận

hành, không phụ thuộc vị trí cắt trên vật thể.

- Rất dễ ứng dụng khoa học kỹ thuật tự động hóa trong quá trình vận hành.

- Chi phí thấp, độ chính xác trong chế tạo sản phẩm cao.

- Ứng dụng công nghệ thông tin trong vận hành một cách hiệu quả.

- Không ảnh hưởng nhiệt.

- Quá trình gia công ít tạo phoi nên ít lãng phí vật liệu và cắt được nhiều loại vật liệu.

- Không bụi, không mùi và không sinh nhiệt. Môi trường gia công trong sạch.

b) Nhược điểm

- Sản phẩm chưa được sản xuất trong nước nên giá thành cao.

- Đây là công nghệ mới, cần được kiểm chứng giải quyết những vấn đề chưa phù hợp nhằm nâng cao hiệu quả và chất lượng.

c) Phạm vi ứng dụng

Quá trình cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao là công nghệ được ứng dụng trong hầu hết các ngành kinh tế hiện nay. Mặc dù mới xuất hiện, tuy nhiên nhờ tính ưu việt và thân thiện với môi trường hơn các phương pháp gia công truyền thống nên được lựa chọn sử dụng trong nhiều lĩnh vực: gia công kỹ nghệ, xây dựng, chế tạo máy, dân dụng, quân sự, đường sắt, đường bộ, đường thủy, đường không,...

Được sử dụng trong công nghiệp giúp làm sạch bề mặt sản phẩm kể cả ngành thực phẩm.

Quá trình cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao cũng được sử dụng nhiều trong kỹ thuật đào

đường hầm, nhất là khu vực núi đá và trong lòng đô thị.

Vật liệu mà quá trình cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao rất đa dạng và phong phú, nhiều chủng loại. Từ những vật liệu có cơ tính thấp như giấy, gỗ, nhựa, cao su,... đến những vật liệu có cơ tính cao như kim loại, gốm, thạch anh,... đều có thể cắt được và chiều dày cắt có thể lớn hơn 30mm.

Quá trình cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao có năng suất cao và không ảnh hưởng môi trường nên thường được ứng dụng trong quá trình chế biến thực phẩm (cắt và thái mỏng sản phẩm). Trong quá trình chế biến thực phẩm, chất lỏng sử dụng là cồn, glyxêrin hoặc dầu ăn.

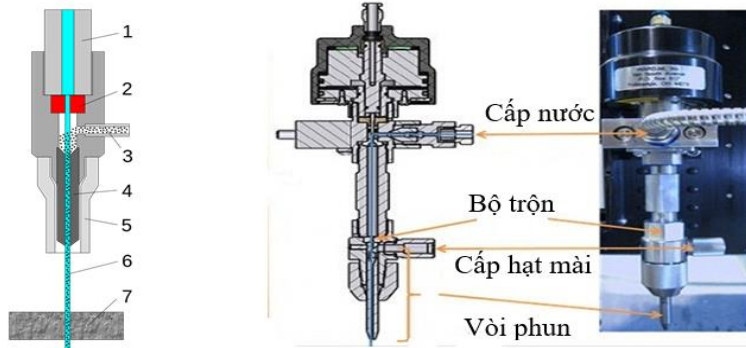
3. Công nghệ gia công cắt gọt sử dụng tia nước có hạt mài

Như đã giới thiệu, quá trình cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao chỉ được ứng dụng trong trường hợp vật liệu có cơ tính thấp (mềm).

Trường hợp những vật liệu có cơ tính cao (bê tông, thạch anh, thép,...), người ta sử dụng nước áp lực cao có bổ sung hạt mài để thay thế.

3.1. Sơ đồ cấu tạo

1. Nạp nước áp suất cao; 2. Đá quý; 3. Bột mài; 4. Ống trộn;
5. Ống bảo vệ; 6. Dòng tia hỗn hợp; 7. Vật liệu cắt



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý gia công cắt gọt sử dụng tia nước có hạt mài

Nguồn: Hiếu, Đ. Đ. (2022)

3.2. Nguyên lý gia công

Nguyên lý gia công của công nghệ này hoàn toàn tương tự quá trình gia công cắt gọt vật liệu sử dụng tia nước, chỉ khác dòng năng lượng cắt vật liệu lúc này có thêm hạt mài. Vận tốc rất cao của dòng tia khi đi qua lỗ phun sẽ tạo chân không để hút các hạt mài từ ống chứa hạt mài, sau đó hạt mài sẽ trộn với nước trong ống trộn.

Năng suất, hiệu quả của công nghệ này phụ thuộc khá nhiều vào quá trình bổ sung hạt mài trong quy trình công nghệ.

Trong quá trình cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao có bổ sung hạt mài; quá trình bổ sung những hạt mài vào tia nước làm ảnh hưởng không nhỏ đến việc tính toán các thông số gia công.

Các thông số công nghệ này gồm: loại, kích thước hạt mài, vận tốc dòng tia; phải được tính và điều chỉnh phù hợp trong suốt quá trình gia công.

Hiện nay, thường dùng một số loại hạt mài: nhôm oxit, silicat, kim cương,

các Oxit (Crôm, Magie, Kẽm, Sắt...). Kích thước hạt $60\mu\text{m} \div 100\mu\text{m}$.

Lượng hạt mài được đưa vào trong dòng nước khoảng $0,3\text{kg/phút}$.

Lỗ vòi phun thường có kích thước khoảng từ $0,20\text{mm} \div 0,63\text{mm}$. Kích thước này lớn hơn kích thước vòi phun trong quá trình cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao vì quá trình này tạo ra năng lượng lớn để dòng hỗn hợp chuyển động dễ hơn.

Năng lượng dòng nước trong quá trình cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao có bổ sung hạt mài giống quá trình gia công sử dụng nước áp lực cao.

Khoảng cách từ đầu vòi phun đến bề mặt vật liệu ngắn hơn (khoảng $1/4$ hay $1/2$) so với khoảng cách trong quá trình cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao.

Quá trình gia công vật liệu, khi đòi hỏi không thay đổi cơ tính vùng gia công thì lựa chọn tối ưu nhất hiện nay đó là sử dụng công nghệ cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao hoặc có bổ sung hạt mài.

Bảng 2. Một số loại hạt mài thường dùng
(Độ cứng hạt mài tăng dần từ cấp 1 đến cấp 10)

Tên hạt mài	Thành phần	Độ cứng	Trọng lượng riêng (g/cm ³)	Vật liệu gia công
Thạch anh	SiO ₂	7	2,65	Kính, thép, đá, gỗ
Đá nhám	Al ₂ O ₃ và Fe ₂ O ₃	8	3,7	Kim loại, kính, gỗ
Cacbit Silic	SiC	9	3,2	Gang, nhôm, đồng, kính
Kim cương không kết tinh	C	10	3,5	Giấy, cao su, vật liệu giòn
Kim cương kết tinh	C	10	3,5	Kim cương và các loại đá quý
Oxit Crôm	Cr ₂ O ₃	10	-	Thép, thép không gỉ
Oxit Sắt	Fe ₂ O ₃	-	5,2	Kim loại, đá, kính
Oxit Magie	MgO	4,5	5,8 – 6,9	Thép, kính
Oxit Kẽm	ZnO			
Oxit Thiếc	SnO ₂			
Cacbit Bo	B ₄ O	10	-	Các loại thép

Nguồn: Đăng, T. H. (2018); Đệ, Đ. V. (2013)

3.3. Các thông số cơ bản về công nghệ và tính chất công nghệ

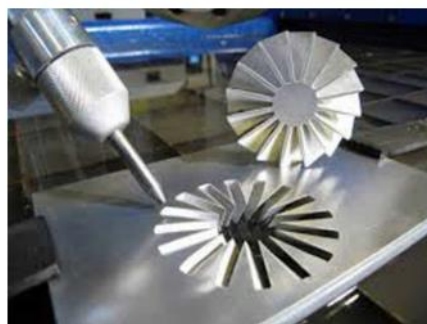
a) Các thông số cơ bản

- Áp suất tia hỗn hợp cắt từ 130÷400MPa.
- Tốc độ dòng tia lớn gấp 2,5 lần vận tốc của âm thanh (Mach 2,5).
- Đường kính tia nước, độ xa, tốc độ nạp hạt mài.
- Vận tốc chạy dao 2,54÷12,7cm/phút, vận tốc chạy dao càng lớn thì chất lượng bề mặt càng tốt.

- Thời gian đưa vật liệu (phôi) vào máy.

b) Tính chất công nghệ

- Chiều rộng vết cắt thường từ 0,075cm trở lên.
- Có thể cắt được vật liệu có chiều dày lên đến 20cm. Độ chính xác gia công phụ thuộc vào loại máy được sử dụng. Nếu sử dụng máy lớn có vòi phun phù hợp thì có thể đạt độ chính xác đến ±0,0038cm; nếu sử dụng máy trung bình thì độ chính xác có thể đạt ±0,00635cm, độ thẳng đạt 0,005cm



Hình 5. Tạo hình nghệ thuật

Nguồn: Lương, N. T. (2023)

Độ chính xác của sản phẩm sử dụng công nghệ này phụ thuộc vào nhà sản xuất; năng lực, tiêu chuẩn chế tạo, trình độ công nghệ,... của các nhà sản xuất khác nhau thì sản phẩm có độ chính xác sẽ khác nhau.

Hiện nay, quá trình cắt gọt các kim loại, phi kim,... sử dụng nước áp lực cao có bổ sung hạt mài có thể chế tạo ra những sản phẩm có độ chính xác lên đến $\pm 0,0025\text{mm}$. Sự khác nhau về sai số chế tạo chủ yếu từ kết cấu cũng như công nghệ điều khiển của từng loại máy.



Hình 6. Tạo hình các chi tiết phức tạp

Nguồn: Lương, N. T. (2023)

3.4. Đặc điểm và phạm vi ứng dụng

- Vật liệu đầu vào (phôi) đối với phương pháp cắt gọt, tạo hình sản phẩm bằng sử dụng nước áp lực cao có bổ sung hạt mài rất đa dạng. Từ các dạng vật liệu cứng như thép, hợp kim, bê tông,... đến các loại mềm hơn như nhựa, gỗ, composit,... và các vật liệu thủy tinh, gốm sứ,... cả kim loại và phi kim, vật liệu có chiều dày khác nhau.
- Đầu cắt chỉ là dạng tia không thay đổi nhưng có thể tạo ra nhiều hình dạng

khác nhau (khác hẳn so với công nghệ truyền thống phải thay đổi dụng cụ cắt khi muốn tạo hình vật liệu).

- Sai số chế tạo thấp, ít phế phẩm, bảo vệ môi trường, khu vực gia công không phát sinh nhiệt nên không ảnh hưởng cơ tính vật liệu.
- So với gia công truyền thống thì phương pháp này có lực cắt nhỏ hơn, độ nhám bề mặt chi tiết có thể tốt hơn.



Hình 7. Cắt bê tông, đá hoa cương

Nguồn: Lương, N. T. (2023)

3.5. Đặc điểm khác so với một số công nghệ truyền thống

a) Sự khác biệt so với gia công cắt gọt bằng laser

- Do tính đa dạng vật liệu gia công, nên một số vật liệu mà gia công cắt gọt bằng laser không thực hiện được thì công nghệ gia công cắt gọt vật liệu sử dụng tia nước có hạt mài làm được dễ dàng.

- Gia công cắt gọt bằng laser chỉ thực hiện trên vật liệu đồng nhất, trong khi công nghệ sử dụng nước áp lực cao thực hiện được đối với cả vật liệu là hợp kim.

- Phương pháp laser có sinh nhiệt có thể làm thay đổi độ cứng hoặc biến dạng sản phẩm, phương pháp sử dụng nước áp lực cao thì không xảy ra hiện tượng này.

- Giá thành gia công, chất lượng sản phẩm của quá trình sử dụng nước áp lực cao cắt gọt vật liệu cao hơn.

- Tia laser có sinh nhiệt, có thể xuất hiện khói độc ảnh hưởng đến môi trường; việc bảo trì khó khăn hơn phương pháp sử dụng nước áp lực cao.

- Chi tiết càng dày thì sử dụng nước áp lực cao sẽ càng mang lại hiệu quả thiết thực.

Bảng 3. So sánh định lượng một số công nghệ cắt vật liệu

Tính chất	Cắt tia nước	Cắt laze	Cắt tia lửa điện
Vật liệu gia công	Đa dạng	Chất lượng phụ thuộc tính đồng nhất của vật liệu	Chất lượng phụ thuộc tính đồng nhất của vật liệu
Độ chính xác	Rất cao (có thể đến 0,02mm)	Cao (đến 0,2mm)	Vừa phải (đến 1mm)
Độ dày cắt	≤ 300mm	≤ 40mm	≤ 75mm
Vùng ảnh hưởng nhiệt	Không biến dạng nhiệt	Có biến dạng nhiệt	Có biến dạng nhiệt
Tác động môi trường	Ít tạo khói, bụi nên giảm tác động môi trường	Sinh nhiệt, tạo khói độc nên tác động xấu đến môi trường	Sinh nhiệt, tạo khói độc nên tác động xấu đến môi trường
Chi phí vận hành	Cao	Thấp	Thấp

Nguồn: Hiếu, Đ. Đ. (2022); Lương, N. T. (2023)

b) So với công nghệ cắt vật liệu bằng tia lửa điện

- Tốc độ gia công sử dụng công nghệ cắt vật liệu bằng nước áp lực cao nhanh hơn.

- Vật liệu gia công sử dụng công nghệ cắt gọt, tạo hình sản phẩm bằng nước áp lực cao đa dạng hơn.

- Sử dụng quy trình cắt gọt, tạo hình bằng tia lửa điện phụ thuộc nhiều tính đồng nhất của phôi, nếu không đồng nhất thì sản phẩm sẽ thiếu tính chính xác, còn công nghệ sử dụng tia nước thì không bị ảnh hưởng bởi tính đồng nhất này.

- Quy trình cắt gọt, tạo hình bằng tia lửa điện sinh nhiệt rất lớn, công nghệ sử dụng nước áp lực cao thì không sinh nhiệt.

- Quá trình cắt gọt, tạo hình sản phẩm bằng sử dụng nước áp lực cao, những khuyết tật của vật liệu đều không ảnh hưởng đến dòng tia. Trong khi quy trình cắt gọt, tạo hình bằng tia lửa điện chịu tác động đáng kể.

4. Kết luận

Như đã trình bày, gia công cơ khí là nội dung rất quan trọng trong nhiều lĩnh vực, trong đó phải kể đến ngành cơ khí, chế tạo máy và đời sống sinh hoạt hàng

ngày. Quá trình cắt gọt, tạo hình sản phẩm bằng sử dụng nước áp lực cao và có bổ sung hạt mài là quy trình mới đưa vào sử dụng mấy năm gần đây. Quy trình công nghệ đơn giản, giá thành rẻ, thân thiện với môi trường nhưng đạt hiệu quả rất cao, rất phù hợp với gia công hiện nay nhất là trong điều kiện môi trường làm việc bị ô nhiễm và có nhiều thay đổi tiêu cực khác. Nghiên cứu, ứng dụng phương pháp cắt gọt, tạo hình sản phẩm bằng sử dụng nước áp lực cao và có bổ sung hạt mài là một việc làm thiết thực vừa bảo đảm tính kinh tế, vừa góp phần bảo vệ môi trường.

Tài liệu tham khảo

Đặng, T. H. (2018). Nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ chuyển đến chất lượng mạch cắt khi cắt bằng tia nước áp suất cao trộn hạt mài. Trường ĐH Sao đỏ.

Đệ, Đ. V. (2013). Các phương pháp gia công đặc biệt. Trường Đại học Công nghệ Thành phố Hồ Chí Minh.

Gand, V. (2014). Multi objective optimization of hot machining of 15-5PH stainless steel using grey relation analysis. Precodia metaterials Science.

Hiếu, Đ. Đ. (2022). Giáo trình cắt gọt kim loại. Trường Cao đẳng Cơ điện Hà Nội.

Kiên, N. Đ. (2022). Giáo trình CNC cơ bản. Trường Cao đẳng Cơ giới.

Long, B. T. (2013). Nguyên lý gia công vật liệu. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật Hà Nội.

Lưỡng, N. T. (2023). Giáo trình Cơ sở kỹ thuật cắt gọt kim loại. Nhà xuất bản Bách khoa Hà Nội.

Ruhamad, R. (2014). Themelly enhanced ultrasonically assisted machining of Ti alloy. Manufastuning Csience.

Thông tin bài

Ngày nhận bài: 20/3/2025

Ngày hoàn thành: 15/6/2026

Ngày đăng bài: 30/6/2026

Tác giả liên hệ: Nguyễn Văn Tuấn

Email: tuan271983@gmail.com