

# ĐÁNH GIÁ ĐỘ CHÍNH XÁC HÌNH HỌC VÀ HIỆU QUẢ SỬ DỤNG VẬT LIỆU KHI TẠO HÌNH CHI TIẾT CÔN RỒNG TỪ THÉP HỢP KIM ĐỘ BỀN CAO BỞI CÔNG NGHỆ WAAM

EVALUATING GEOMETRIC ACCURACY AND MATERIAL USAGE EFFICIENCY WHEN SHAPING HOLLOW-CONE PARTS FROM HIGH STRENGTH ALLOY STEEL BY WAAM TECHNOLOGY

Lê Văn Thảo<sup>1</sup>, Nguyễn Văn Cảnh<sup>2</sup>,  
Nguyễn Thùy Dương<sup>3,\*</sup>

DOI: <http://doi.org/10.57001/huiv5804.2025.063>

## TÓM TẮT

WAAM (wire arc additive manufacturing) được biết đến là một dạng công nghệ in 3D kim loại, sử dụng nguồn năng lượng hồ quang nung chảy dây kim loại và bồi đắp kim loại lỏng theo lớp để tạo thành chi tiết. WAAM có tốc độ bồi đắp vật liệu cao hơn nhiều lần so với các công nghệ in 3D kim loại khác. Vì vậy, nó được xem là phương pháp phù hợp nhất để chế tạo các chi tiết có kích thước lớn trong các lĩnh vực công nghiệp khác nhau. Trong bài báo này, chi tiết côn rỗng - một dạng cấu trúc hình học phổ biến được sử dụng trong các loại vũ khí trang bị và thiết bị bay, được chế tạo bởi công nghệ WAAM. Sau đó, độ chính xác hình học của chi tiết và hiệu quả sử dụng vật liệu khi tạo hình bởi WAAM được đánh giá. Kết quả cho thấy, công nghệ WAAM cho phép tạo hình chi tiết côn rỗng với độ chính xác hình học chấp nhận được, là bước tạo phôi có hình dạng gần với sản phẩm cuối cùng cho các bước gia công lần cuối, từ đó nâng cao hiệu quả sử dụng vật liệu. So sánh với phương pháp gia công truyền thống, công nghệ WAAM cho phép tiết kiệm đến 80% vật liệu đầu vào, giảm thiểu năng lượng tiêu thụ, công lao động, chi phí và tác động ô nhiễm môi trường.

**Từ khóa:** WAAM, in 3D kim loại, độ chính xác hình học, hiệu quả sử dụng vật liệu, chi tiết côn rỗng, thép hợp kim có độ bền cao.

## ABSTRACT

WAAM (wire arc additive manufacturing) is known as a kind of metal 3D printing technologies, using an arc energy source to melt metal wire and deposit molten metal in layers to form 3D parts. WAAM has a high speed of material deposition, many times higher than other metal 3D printing technologies. Therefore, it is considered as the most suitable method for manufacturing large-sized parts in various industrial fields. In this article, a hollow-cone part - a common geometric structure used in weapons and aircraft, was manufactured by WAAM technology. Subsequently, its geometric accuracy and the efficiency of using material when shaping by WAAM are also evaluated. The results show that the WAAM technology allows shaping hollow conical parts with acceptable geometric accuracy, creating a workpiece with a shape close to the final product for finishing operations, thereby improving the material usage efficiency. Compared with traditional machining methods, WAAM allows saving up to 80% of input materials, minimizing energy consumption, labor, costs, and environmental pollution impacts.

**Keywords:** WAAM, metal 3D printing, geometric accuracy, material usage efficiency, hollow-cone part, high strength alloy steel.

<sup>1</sup>Trung tâm Công nghệ, Học viện Kỹ thuật Quân sự

<sup>2</sup>Trung tâm nghiên cứu Công nghệ & SXTM, Trường Cơ khí - Ô tô, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

<sup>3</sup>Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

\*Email: [duong.nguyenthuy@hust.edu.vn](mailto:duong.nguyenthuy@hust.edu.vn)

Ngày nhận bài: 15/10/2024

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 22/01/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2025

## 1. GIỚI THIỆU

Công nghệ in 3D ra đời và phát triển mạnh trong những năm gần đây, cho phép chế tạo các sản phẩm có hình dạng phức tạp mà không cần sử dụng khuôn mẫu. Công nghệ in 3D tạo ra hình dạng sản phẩm gần với chi tiết được thiết kế theo nguyên lý bồi đắp vật liệu theo lớp [1]. Các bề mặt chức năng (bề mặt làm việc và lắp ghép) với yêu cầu độ chính xác cao mới cần phải gia công tinh. Do vậy, công nghệ này cho phép giảm thiểu chi phí về vật liệu sử dụng và phế liệu như phoi trong gia công cắt gọt. Hiện nay, công nghệ in 3D kim loại đã được nhiều nước phát triển trên thế giới áp dụng vào các ngành công nghiệp chế tạo như hàng không, ô tô, khuôn mẫu, quân sự, và trong lĩnh vực y tế [2, 3].

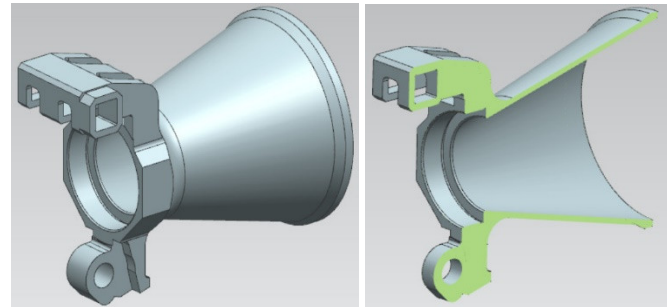
Trong số các công nghệ in 3D kim loại, công nghệ WAAM (wire arc additive manufacturing) sử dụng nguồn năng lượng hàn hồ quang nung chảy vật liệu kim loại dạng sợi và đắp vật liệu nung chảy theo lớp có khí bảo vệ để tạo thành sản phẩm [4, 5]. WAAM có tốc độ chế tạo cao hơn nhiều lần so với các công nghệ in 3D kim loại khác sử dụng bột kim loại. Vì vậy, WAAM được chú ý đến như một giải pháp hợp lý nhất để chế tạo các chi tiết có kích thước lớn với nhiều cấu trúc thành vách từ nhiều loại hợp kim khác nhau như thép, hợp kim nhôm, hợp kim titan, hợp kim niken [6, 7]. Ngoài ra, chi phí đầu tư thiết bị WAAM tương đối thấp so với các công nghệ in 3D kim loại sử dụng bột kim loại và nguồn laser.

Tuy nhiên, công nghệ WAAM đang trong giai đoạn nghiên cứu phát triển và hoàn thiện về công nghệ [8]. Các nghiên cứu trên thế giới chủ yếu tập trung vào khảo sát quá trình luyện kim của vật liệu khi chế tạo bởi công nghệ WAAM [5]; nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến cấu trúc vật liệu, đặc tính cơ học của chi tiết; hoặc đề xuất các giải pháp công nghệ để nâng cao chất lượng sản phẩm như độ chính xác hình học, giảm thiểu khuyết tật và nâng cao cơ tính vật liệu [9, 10].

Tại Việt Nam, chưa có các nghiên cứu áp dụng công nghệ WAAM vào sản xuất và sửa chữa vũ khí trang bị. Từ các kết quả nghiên cứu cơ bản tại Học viện Kỹ thuật quân sự về cấu trúc tế vi và đặc tính cơ học của vật liệu chế tạo bởi công nghệ WAAM [11-20], có thể khẳng định tính khả thi của việc sử dụng hệ thống WAAM để chế tạo, sửa chữa và phục hồi các chi tiết cơ khí nói chung và các chi tiết vũ khí, trang bị quân sự nói riêng.

Các loại súng chống tăng được biên chế trong quân đội ta hay quân đội Mỹ là các loạt súng không giật. Khi bắn đạn chuyển động về trước tạo ra động lượng của đạn và nòng nên sẽ tác dụng về sau một lực. Lực này sẽ được

cân bằng do phản lực tạo thành từ khí thuốc về sau qua loa phụt (cân bằng động lượng của đầu đạn). Hiện nay, các dạng chi tiết loa phụt - dạng cấu trúc côn rỗng (hình 1) được gia công từ phôi trụ đặc. Chi tiết được gia công theo quy trình công nghệ tiện, phay, nhiệt luyện và xử lý bề mặt. Thành của loa phụt dày khoảng 4mm. Phôi để chế tạo chi tiết loa phụt của súng SPG-9 có đường kính  $\phi 195$  và chiều dài 255mm.



Hình 1. Mô hình 3D của chi tiết loa phụt súng chống tăng

Trong trường hợp này, công nghệ WAAM có thể là một lựa chọn hợp lý về công nghệ và chi phí để thay thế phương pháp chế tạo truyền thống. Về lý thuyết, các chi tiết thành mỏng dạng loa có thể được tạo hình toàn bộ bằng công nghệ WAAM sau đó gia công lần cuối để đạt được kích thước, dung sai và độ nhẵn bóng bề mặt theo thiết kế. Vì vậy, với chi tiết loa trong hình 1, giải pháp hợp lý về mặt công nghệ và chi phí là tạo hình phần loa bằng công nghệ WAAM trên một tấm để có kích thước phù hợp. Sau đó các nguyên công tiện và phay sẽ được sử dụng để đạt độ chính xác về hình dạng và độ nhám bề mặt của sản phẩm.

Trong bài báo này, công nghệ WAAM được sử dụng để tạo hình chi tiết côn rỗng (dạng loa) trên tấm để theo bản vẽ thiết kế. Độ chính xác hình học của sản phẩm sau khi in được đánh giá và so sánh với bản vẽ thiết kế. Đồng thời, hiệu quả sử dụng vật liệu giữa phương pháp WAAM và phương pháp gia công cắt gọt được so sánh để chứng minh lợi ích của công nghệ WAAM.

## 2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP

### 2.1. Vật liệu và hệ thống WAAM

Trong nghiên cứu này, dây hàn thép HSLA (ER110S-G) với đường kính 1,2mm do Hyundai cung cấp và tấm thép carbon thấp (C45) với kích thước 200mm x 200mm x 10mm đã được sử dụng để chế tạo chi tiết. Thành phần các nguyên tố hóa học của dây hàn (ER110S-G) bao gồm 1,95%Ni; 1,90%Mo; 0,34%Cr; 0,58%Mo; 0,80%Si; 0,089%C; 0,010%P, 0,004%S và %Fe còn lại (tính bằng % khối lượng).

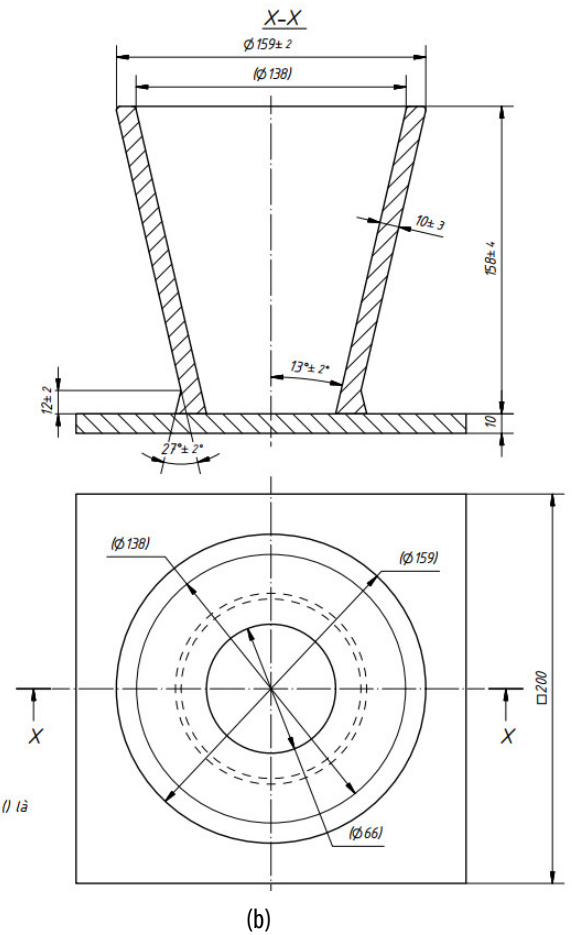
Hệ thống WAAM bao gồm nguồn hàn MIG, mỏ hàn, bộ cấp dây hàn, rô-bốt 6 bậc tự do và bộ cấp khí bảo vệ

đã được sử dụng để chế tạo các mẫu (hình 2a). Mỗi quan hệ giữa tốc độ cấp dây và dòng điện hàn trong hệ thống WAAM này xấp xỉ tuyến tính tăng dần. Hỗn hợp khí gồm argon (80%) và CO<sub>2</sub> (20%) với tốc độ dòng chảy 16 lít/phút đã được áp dụng trong quá trình WAAM.

Bản vẽ chi tiết cần in (hình 2b) được tính toán và thiết kế để đảm bảo lượng dư cho bước gia công lần cuối nhằm đạt được kích thước phần loa của chi tiết trong hình 1. Trong trường hợp này, phần loa được tạo hình trên tấm thép C45 có kích thước 200mm x 200mm x 10mm. Chiều dày của thành loa được thiết kế là 10mm, đảm bảo lượng dư để gia công thành loa dày 4mm của sản phẩm cuối cùng (hình 1).

**2.2. Bộ thông số công nghệ dùng để chế tạo chi tiết**

Các thông số công nghệ được sử dụng để chế tạo phôi cho phần loa phụ là bộ thông số công nghệ tối ưu cho quy trình WAAM thép ER110S-G, bao gồm cường độ dòng hàn I = 160A, điện áp hàn U = 19V và tốc độ dịch chuyển của mỏ hàn v = 0,3m/phút. Bộ thông số công nghệ này được xác định thông qua giải bài toán tối ưu đa mục tiêu [21], chúng đảm bảo đường hàn đơn được chế tạo có bề mặt trên nhẵn và quá trình hàn không có bắn tóe và khuyết tật (hình 3).



Hình 2. (a) Hệ thống GMAW-WAAM, (b) bản vẽ chế tạo phôi của chi tiết loa phụ



(a)



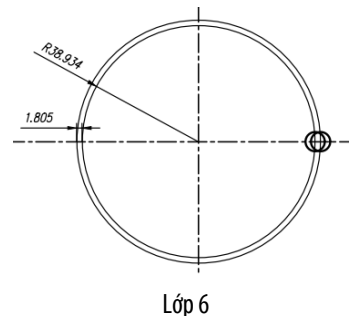
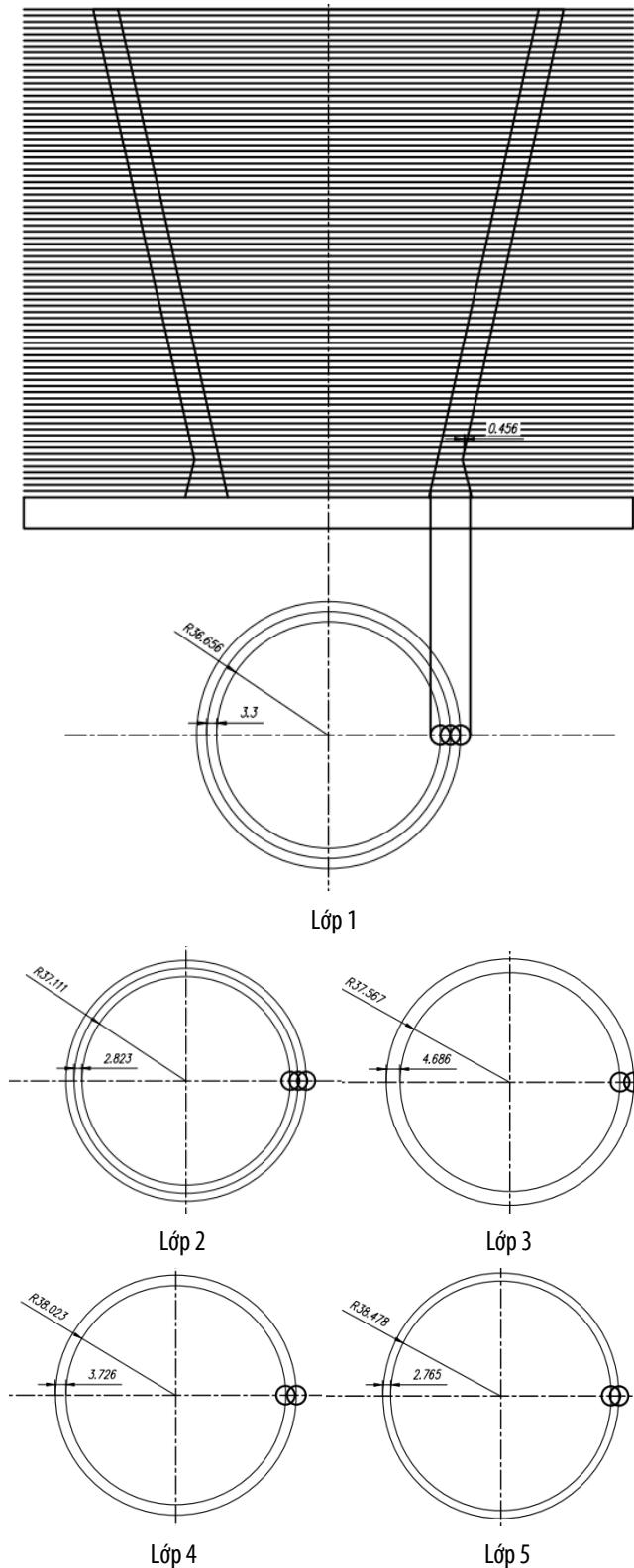
Hình 3. Phần chân chi tiết phôi được chế tạo với bộ thông số công nghệ tối ưu

**2.3. Lập trình in chi tiết**

Do hệ thống WAAM được sử dụng trong nghiên cứu là hệ thống rô bốt hàn công nghiệp, không có phần mềm chuyên dụng lập trình cho quá trình in 3D, nên chương trình in được lập trình thủ công và được tính toán dựa vào kích thước đường hàn đơn và kích thước thiết kế của phôi (hình 2b). Chương trình in chi tiết phôi loa phụ được thực hiện như sau (hình 4):

• Chi tiết loa được chia thành 79 lớp, chiều dày mỗi lớp là 2mm.

• Phần loa được phân chia ra làm hai đoạn: đoạn côn dưới có chiều cao 12mm (tương ứng với 6 lớp) và phần côn trên cao 146mm (tương ứng với 73 lớp).



Hình 4. Phương án chia lớp và lập trình cho từng lớp in

• Các lớp của phần côn chiều cao 12mm được lập trình như sau:

+ Đối với lớp 1, chiều rộng lớp là 14mm, trong khi chiều rộng của đường hàn là 6,4mm. Vì vậy cần thực hiện 3 đường hàn tròn đồng tâm; khoảng cách giữa các quỹ đạo lập trình đường hàn là 3,3mm; bán kính của quỹ đạo đường hàn bên trong là 36,66mm.

+ Lớp 2 được lập trình bởi 3 đường hàn đồng tâm. Các lớp 3 đến 6, mỗi lớp được lập trình bởi 2 đường hàn đồng tâm với các kích thước được thể hiện trên hình 4.

• Các lớp của phần côn chiều cao 146mm được lập trình dựa trên cơ sở các thông số đường hàn được lập trình ở lớp 6 (hình 4). Tuy nhiên, khi tăng chiều cao lên 2mm cho lớp kế tiếp thì khoảng cách giữa các đường hàn được lập trình giữa lớp thứ "i" và lớp thứ "i+1" là 0,456mm. Cụ thể như sau:

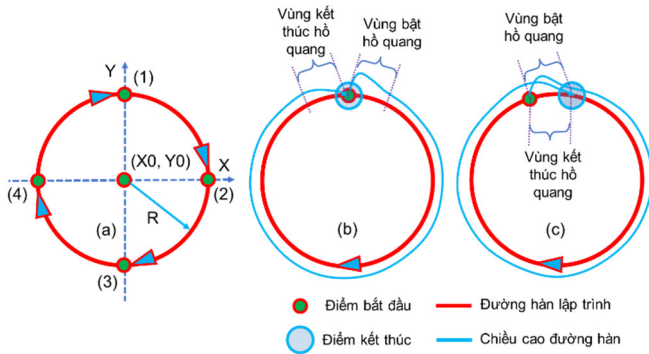
+ Lớp thứ "i" có hai đường hàn đồng tâm: bán kính đường hàn nhỏ là  $R_{Ni}$  và bán kính đường hàn lớn là:  $RL_i = R_{Ni} + 1,805$  (mm).

+ Lớp thứ "i+1" có hai đường hàn đồng tâm: bán kính của đường hàn nhỏ là  $R_{N(i+1)} = R_{Ni} + 0,456$  (mm) và bán kính đường hàn lớn là:  $RL_{(i+1)} = RL_i + 0,456$  (mm).

Đối với mỗi lớp, đường hàn được in theo thứ tự từ trong ra ngoài (tức là in đường hàn có bán kính nhỏ đến đường hàn có bán kính lớn). Mỗi đường hàn được thiết lập bởi 4 điểm, như mô tả trong hình 5a. Tọa độ các điểm được tính theo điểm gốc (X0, Y0) và bán kính R. Tuy nhiên, nếu lập trình điểm bắt đầu hàn trùng với điểm kết thúc (hình 5b) thì đường hàn tròn sẽ có khoảng trống vật liệu tại điểm bắt đầu và kết thúc do đặc trưng của đường hàn là gồ ở vùng bắt đầu hồ quang và thoải dốc xuống ở vùng kết thúc hồ quang. Như vậy, nếu quá trình đắp các lớp liên tục thì sẽ tạo nên hiện tượng bị thiếu vật liệu và có khe hở ở thành vách.

Để khắc phục hiện tượng này, đường hàn tròn cần lập trình với 5 điểm, trong đó điểm kết thúc đường hàn cần vượt quá một đoạn so với điểm bắt đầu hồ quang, như thể hiện trên hình 5c. Trong trường hợp này, phần đường

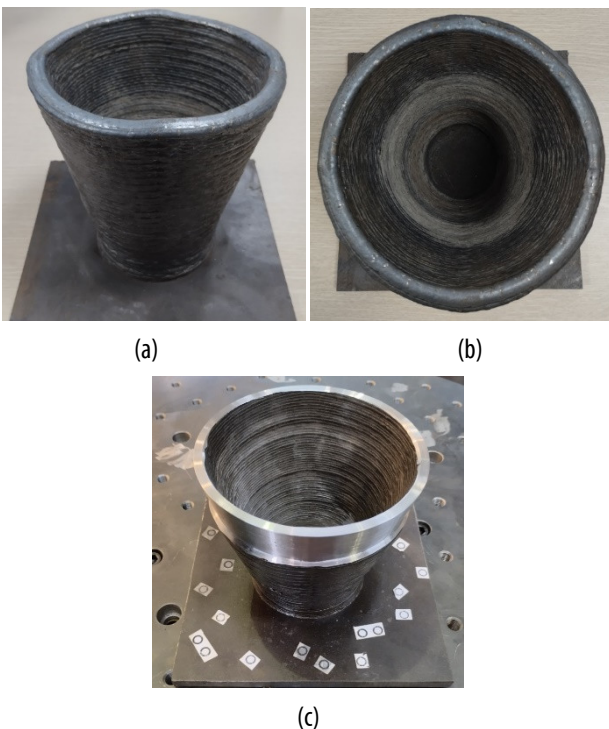
hàn lõi ở vùng bật hồ quang sẽ được “là” phẳng và bù lại cho phần dốc thoải xuống ở vùng kết thúc hồ quang. Tuy nhiên, thực tế, giải pháp này không thể hoàn toàn là phẳng được đường hàn để đảm bảo độ đồng đều về chiều cao cho toàn bộ đường hàn. Do vậy, vị trí điểm bắt đầu hồ quang được thay đổi theo tuần tự từ điểm (1) đến điểm (4) giữa 4 lớp liên tiếp.



Hình 5. Phương án lập trình các đường hàn trong mỗi lớp

### 3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

#### 3.1. Kết quả chế tạo chi tiết



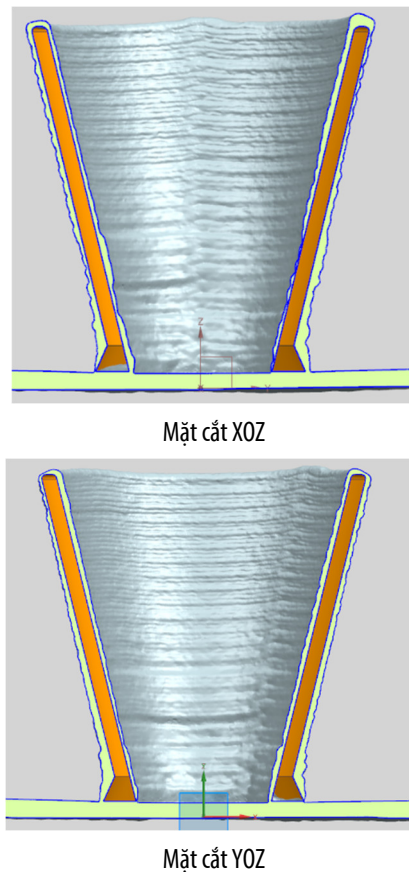
Hình 6. (a, b) Chi tiết phôi phần loa được in bởi WAAM, (c) chi tiết được tiện một phần

Trong nghiên cứu này, 01 chi tiết phôi phần loa đã được chế tạo theo chương trình trên. Trong quá trình in, chi tiết được làm mát bằng nước. Thời gian dừng giữa 2 lớp in là 60 giây. Tổng thời gian in chi tiết là 6 giờ. Kết quả sản phẩm như hình 6a và 6b. Hình 6c thể hiện chi tiết phôi sau khi tiện mặt đầu và tiện bóc lớp ngoài cùng ở phần đầu loa nhằm

khảo sát khả năng gia công vật liệu sau khi in, khuyết tật thô đại bên trong như rỗ khí và vết nứt. Kết quả cho thấy, vật liệu sau khi in hoàn toàn có thể gia công bằng phương pháp tiện thông thường. Bên trong vật liệu sau khi in cũng không thấy xuất hiện vết nứt hay rỗ khí thô đại.

#### 3.2. Đánh giá hình dạng và kích thước sản phẩm

Tổng thể, có thể thấy rằng sản phẩm in không có khuyết tật dạng vết nứt hoặc tách lớp. Các kích thước cơ bản đạt theo bản vẽ thiết kế. Hình 7 thể hiện biên dạng của chi tiết chế tạo bởi WAAM được quét 3D (màu xám) và được lồng ghép với chi tiết loa thiết kế trong trường hợp chiều dày thành nhỏ nhất là 7mm (màu cam) tại một số mặt cắt đại diện (XOZ và YOZ). Có thể nhận thấy rằng các kích thước chính của phôi thiết kế (trong trường hợp chiều dày thành nhỏ nhất là 7mm) phần lớn đều nằm bên trong biên dạng chi tiết được chế tạo.



Hình 7. Hình ảnh phôi phần loa phụt chế tạo bởi WAAM

Bảng 1 và 2 thể hiện kết quả đo một số kích thước chính của chi tiết và góc côn. Kết quả chỉ ra rằng các kích thước chính (chiều cao, đường kính miệng phôi, chiều dày thành loa và góc côn) đều nằm trong miền kích thước thiết kế (hình 2b). Cụ thể như sau:

- Chiều cao của chi tiết theo thiết kế là  $158 \pm 4$ mm, chiều cao chế tạo được là  $161,39 \pm 1,58$ mm;

- Đường kính ngoài miệng loa theo thiết kế là  $\Phi 159 \pm 2$ mm, đường kính miệng loa chế tạo được là  $\Phi 158,92 \pm 0,96$ mm;
- Chiều dày thành loa theo thiết kế là  $10 \pm 3$ mm, chiều dày miệng loa đo được là  $12,52 \pm 0,91$ mm.
- Góc côn phần loa theo thiết kế là  $13 \pm 2$  độ, góc côn bên trái và bên phải trong các mặt cắt đo được có giá trị trung bình lần lượt là  $13,53 \pm 0,42$  độ và  $13,09 \pm 0,66$  độ.

Bảng 1. Kết quả đo một số kích thước chính của chi tiết

Vị trí đo	Chiều cao (mm)	Vị trí đo	Đường kính ngoài miệng loa (mm)	Vị trí đo	Chiều dày miệng loa (mm)
1	160,43	1	159,26	1	15,05
2	160,66	2	160,12	2	12,25
3	161,05	3	159,08	3	12,03
4	163,75	4	159,98	4	12,24
5	164,19	5	157,43	5	12,27
6	159,88	6	157,61	6	12,68
7	160,75	7	158,93	7	11,96
8	159,38	8	159,74	8	12,07
9	161,49	9	159,11	9	12,49
10	162,35	10	157,95	10	12,15
Trung bình	161,39	Trung bình	158,92	Trung bình	12,52
Sai lệch chuẩn	1,58	Sai lệch chuẩn	0,96	Sai lệch chuẩn	0,91

Bảng 2. Kết quả đo góc côn của chi tiết trong các mặt cắt ngang qua trục đối xứng OZ

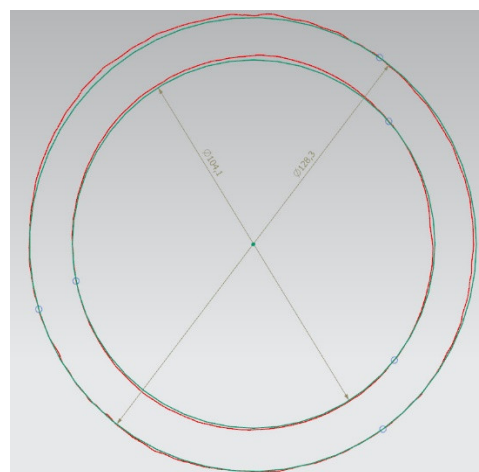
Mặt phẳng đo	Đo góc côn bên trái, $\alpha_t$ (độ)	Đo góc côn bên phải, $\alpha_p$ (độ)
XOZ	14,08	12,43
XOZ - 45°	13,47	12,64
YOZ	13,52	13,49
YOZ - 45°	13,05	13,79
Trung bình	13,53	13,09
Sai lệch chuẩn	0,42	0,66

Hình 8 thể hiện mặt cắt tiết diện ngang của chi tiết in theo các mặt phẳng song song với tấm đế tại các vị trí cách tấm đế  $h = 90$ mm,  $125$ mm và  $135$ mm. Trong đó, đường màu đỏ thể hiện biên dạng thực tế của tiết diện ngang của phôi 01, đường tròn màu xanh thể hiện đường tròn ước lượng gần với biên dạng bên ngoài và bên trong của tiết diện ngang. Có thể nhận thấy rằng, biên dạng thực tế của phôi tại các mặt cắt ngang đảm bảo độ tròn. Sai lệch so với đường tròn ước lượng nhỏ. Chiều dày thành loa (theo các tiết diện ngang) tương đối đồng đều:

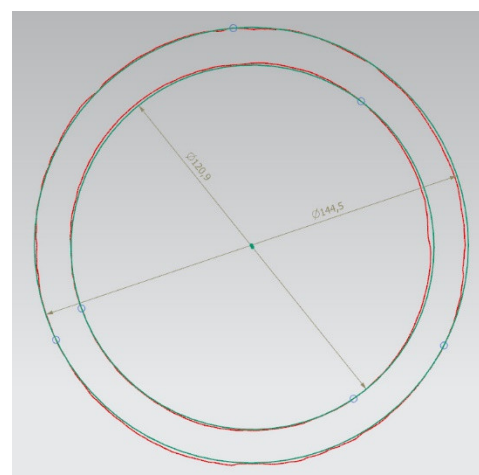
$t \approx 11,9$ mm tại vị trí  $h = 90$ mm;  $t \approx 11,8$ mm tại vị trí  $h = 125$ mm; và  $t \approx 12$ mm tại vị trí  $h = 135$ mm.

### 3.3. Đánh giá hiệu quả sử dụng vật liệu

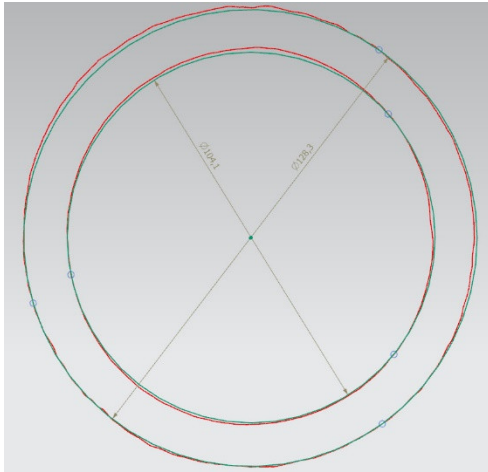
Với phương pháp chế tạo bằng gia công cắt gọt chi tiết trong hình 1, có tới khoảng 70 - 80% khối lượng vật liệu cần phải gia công cắt gọt từ phôi ban đầu để đạt được hình dạng và độ chính xác của sản phẩm, nhất là phần gia công phần loa của chi tiết từ phôi trụ đặc. Thêm vào đó, thời gian gia công, năng lượng điện tiêu thụ và các vật tư tiêu hao khác cần thiết để gia công chi tiết loa phụt là lớn. Dẫn đến giá thành sản phẩm chế tạo cao và gây ra lãng phí về vật liệu đầu vào. Trong khi đó, nhờ sử dụng công nghệ WAAM, phần loa được tạo hình gần giống với sản phẩm cuối cùng (hình 6). Do đó, sau khi in xong, chỉ cần gia công một lượng nhỏ lượng dư (khoảng 4%, hình 6c) để đạt được kích thước và độ nhám bề mặt của sản phẩm. Như vậy, có thể khẳng định rằng, WAAM cho phép tiết kiệm được đáng kể nguyên vật liệu, năng lượng, chi phí và công lao động so với phương pháp gia công truyền thống.



$h = 90$ mm,  $t \approx 11,9$ mm



$h = 125$ mm,  $t \approx 11,8$ mm



$h = 135\text{mm}$ ,  $t \approx 12\text{mm}$

Hình 8. Mặt cắt ngang của phôi 01 theo các mặt phẳng song song với tấm để tại các vị trí cách tấm để  $H = 90\text{mm}$ ,  $125\text{mm}$  và  $135\text{mm}$  (trong hình, màu đỏ là biên dạng thực tế của chi tiết, màu xanh là đường tròn gần đúng với biên dạng thực tế)

#### 4. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, công nghệ WAAM đã được sử dụng để tạo hình cho chi tiết dạng côn rỗng. Hình dạng và kích thước hình học của chi tiết sau khi in đã được đo kiểm và đánh giá. Kết quả cho thấy, chi tiết được in bởi công nghệ WAAM gần như đảm bảo các thông số hình học theo thiết kế. Bên cạnh đó vẫn còn lỗi như có đoạn bị xô lệch so với trục đối xứng của phôi và phần chân loa chưa tạo được mặt côn ngoài do sự không ổn định của đồ gá và thao tác vận hành. Tuy nhiên, các lỗi này hoàn toàn có thể khắc phục được và có thể khẳng định rằng, phương pháp WAAM hoàn toàn có thể áp dụng để chế tạo phôi cho chi tiết dạng loa, cũng như các dạng chi tiết khác. Để đảm bảo được độ ổn định và độ chính xác hình học của sản phẩm in, hệ thống công nghệ cần được hoàn thiện như đồ gá, phát triển phần mềm hỗ trợ lập trình quỹ đạo in hoặc trang bị phần mềm thương mại dùng để hỗ trợ khi lập trình quỹ đạo in.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo trong đề tài mã số B2024-BKA-10.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. W.E. Frazier, "Metal Additive Manufacturing: A Review," *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 1917-1928, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>.

[2]. N. Guo, M. Leu, "Additive manufacturing: technology, applications and research needs," *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8, 215-243, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11465-013-0248-8>.

[3]. D. Herzog, V. Seyda, E. Wycisk, C. Emmelmann, "Additive manufacturing of metals," *Acta Materialia*, 117, 371-392, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.07.019>.

[4]. S.W. Williams, F. Martina, A.C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove, "Wire + Arc Additive Manufacturing," *Materials Science and Technology*, 32, 641-647, 2016. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>.

[5]. B. Wu, Z. Pan, D. Ding, D. Cuiuri, H. Li, J. Xu, J. Norrish, "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement," *Journal of Manufacturing Processes*, 35, 127-139, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>.

[6]. B. Wu, D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, J. Han, Z. Fei, "Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V," *Journal of Materials Processing Technology*, 250, 304-312, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.037>.

[7]. D. Jafari, T.H.J. Vaneker, I. Gibson, "Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts," *Materials & Design*, 202, 109471, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109471>.

[8]. C. Xia, Z. Pan, J. Polden, H. Li, Y. Xu, S. Chen, Y. Zhang, "A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system," *Journal of Manufacturing Systems*, 57, 31-45, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.08.008>.

[9]. C.R. Cunningham, J.M. Flynn, A. Shokrani, V. Dhokia, S.T. Newman, "Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing," *Additive Manufacturing*, 22, 672-686, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>.

[10]. S. Pattanayak, S.K. Sahoo, "Gas metal arc welding based additive manufacturing -A review," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 33, 398-442, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.04.010>.

[11]. V.T. Le, "A preliminary study on gas metal arc welding-based additive manufacturing of metal parts," *Science and Technology Development Journal*, 23, 422-429, 2020. <https://doi.org/10.32508/stdj.v23i1.1714>.

[12]. V.T. Le, Q.H. Hoang, V.C. Tran, D.S. Mai, D.M. Dinh, T.K. Doan, "Effects of welding current on the shape and microstructure formation of thin-walled low-carbon parts built by wire arc additive manufacturing," *Vietnam Journal of Science and Technology*, 58, 461, 2020. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/58/4/14702>.

[13]. V.T. Le, V.T. Le, "An Investigation on the Impact of the Interpass-Cooling Time on the Metallurgy of Wire-Arc-Additive-Manufacturing SS308L Components, in 2nd Annual International Conference on Material, Machines and Methods for Sustainable Development, MMMS 2020, 12 - 15 November 2020, Nha Trang, Vietnam, 196-201, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-69610-8\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-030-69610-8_26).

[14]. V.T. Le, D.S. Mai, "Microstructural and mechanical characteristics of 308L stainless steel manufactured by gas metal arc welding-based additive manufacturing," *Materials Letters*, 271, 127791, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.127791>.

[15]. V.T. Le, D.S. Mai, T.K. Doan, Q.H. Hoang, "Prediction of welding bead geometry for wire arc additive manufacturing of SS308L walls using response surface methodology," *Transport and Communications Science Journal*, 71, 431-443, 2020. <https://doi.org/10.25073/tcsj.71.4.11>.

[16]. V.T. Le, D.S. Mai, T.K. Doan, H. Paris, "Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 24, 1015-1026, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.01.009>.

[17]. V.T. Le, D.S. Mai, Q.H. Hoang, "A study on wire and arc additive manufacturing of low-carbon steel components: process stability, microstructural and mechanical properties," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42 (2020) 480. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02567-0>.

[18]. V.T. Le, D.S. Mai, Q.H. Hoang, "Effects of cooling conditions on the shape, microstructures, and material properties of SS308L thin walls built by wire arc additive manufacturing," *Materials Letters*, 280, 128580, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128580>.

[19]. V.T. Le, H. Paris, "On the use of gas-metal-arc-welding additive manufacturing for repurposing of low-carbon steel components: microstructures and mechanical properties," *Welding in the World*, 65, 157-166, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40194-020-01005-y>.

[20]. V.T. Le, D.S. Mai, H. Paris, "Influences of the compressed dry air-based active cooling on external and internal qualities of wire-arc additive manufactured thin-walled SS308L components," *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 18-27, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.11.046>.

[21]. Van Thao Le, Dinh Si Mai, Van Thuc Dang, Duc Manh Dinh, Thi Hong Cao, Van Anh Nguyen, "Optimization of Weld Parameters in Wire and Arc-Based Directed Energy Deposition of High Strength Low Alloy Steels," *Advances in Technology Innovation*, 8, 01-11, 2023. <https://doi.org/10.46604/aiti.2023.10658>.

---

#### AUTHORS INFORMATION

**Le Van Thao<sup>1</sup>, Nguyen Van Canh<sup>2</sup>, Nguyen Thuy Duong<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Advanced Technology Center, Military Technical Academy, Vietnam

<sup>2</sup>Smart Manufacturing and Technology Research Center, School of Mechanical and Automotive Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam

<sup>3</sup>School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam