

Nghiên cứu ảnh hưởng của một số phương pháp chế tạo phễu lót đến chiều sâu xuyên thép của lượng nổ lôm

Nguyễn Minh Tuấn^{1, 3*}, Trần Bảo Trung², Đoàn Đình Phương^{2, 3*},
Lương Văn Đương², Nguyễn Ngọc Linh², Nguyễn Văn Toàn²

¹Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng, Bộ Quốc phòng;

²Viện Khoa học vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam;

³Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

*Email: phuongdd@ims.vast.ac.vn, minh Tuan1976@gmail.com

Nhận bài: 03/9/2022; Hoàn thiện: 09/10/2022; Chấp nhận đăng: 24/10/2022; Xuất bản: 28/02/2023.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.85.2023.142-151>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày kết quả nghiên cứu về đặc tính xuyên thép của lượng nổ lôm sử dụng phễu lót đồng được chế tạo bằng 4 quy trình khác nhau: dập nguội, dập nguội kết hợp với miết, thiêu kết bột đồng bằng xung điện plasma, thiêu kết xung điện plasma kết hợp với miết. Kết quả cho thấy, kích thước hạt cấu trúc của vật liệu phễu lót đồng sau khi chế tạo có ảnh hưởng lớn đến chiều sâu xuyên thép của phễu. Công đoạn miết phễu lót đồng tạo ra các siêu hạt và tăng mật độ lệch trong cấu trúc, từ đó làm tăng chiều sâu xuyên. Theo đó, chiều sâu xuyên thép của các phễu lót đồng sau khi miết phối dập hoặc phối thiêu kết xung điện plasma là lớn nhất, đều đạt giá trị trên 80 mm. Chiều sâu xuyên thép của phễu chế tạo chỉ bằng phương pháp thiêu kết bột đồng bằng xung điện plasma cũng đạt giá trị là 70,5 mm. Phễu lót đồng chế tạo bằng phương pháp dập nguội có chiều sâu xuyên thép là thấp nhất và đạt giá trị 50 mm và không ổn định. Nghiên cứu cũng còn cho thấy sự hình thành các siêu hạt với chiều rộng từ 300 - 500 nm, chiều dài từ 1-3 μ m sau quá trình biến dạng bằng phương pháp miết.

Từ khoá: Lượng nổ lôm; Thiết bị nổ lôm; Phễu lót; Chiều sâu xuyên.

1. MỞ ĐẦU

Lượng nổ lôm là thiết bị nổ, tập trung năng lượng của khối thuốc nổ hình lôm, làm biến dạng phễu kim loại đặt trên khối thuốc nổ, tạo thành dòng kim loại ở trạng thái rắn, di chuyển với vận tốc cực cao (đến trên 10 km/giây), xuyên thủng các loại giáp thép, bê tông, đá [1, 2], ... Lượng nổ lôm được sử dụng trong nhiều lĩnh vực công nghiệp như trong ngành khai thác dầu khí, giao thông vận tải, khai khoáng hay trong lĩnh vực quốc phòng. Trong quân sự, lượng nổ lôm được ứng dụng làm đạn chống tăng, chống xe thiết giáp, phá hủy boong ke, tàu chiến hay tàu ngầm [3, 4],... Khả năng xuyên của lượng nổ lôm phụ thuộc vào nhiều thông số như kiểu thuốc nổ, hình dạng phễu và vật liệu làm phễu hay công nghệ chế tạo. Vật liệu làm phễu có vai trò rất quan trọng để tạo ra dòng vật liệu tốc độ cao xuyên phá mục tiêu. Có hai yêu cầu chính đối với vật liệu phễu lót là tỷ trọng cao và biến dạng dẻo tốt để duy trì dòng kim loại không bị ngắt quãng [1, 5, 6].

Nhiều kim loại khác nhau được sử dụng làm phễu lót trong lượng nổ lôm như Cu, Al, Ta, Zr và hợp kim của chúng [6-9]. Để tăng tỷ trọng của vật liệu làm phễu, vật liệu composit W-Cu cũng được nghiên cứu phát triển [7-11]. Tuy nhiên, xuyên suốt lịch sử phát triển của vật liệu làm phễu kim loại cho lượng nổ lôm, cho đến nay Cu vẫn là kim loại được sử dụng phổ biến nhất do khối lượng riêng tương đối cao (8,96 g/cm³) và khả năng biến dạng dẻo rất tốt của kim loại này [8]. Ngoài yếu tố về tỷ trọng, các nghiên cứu của Sun và Leus cũng chỉ ra rằng, chiều sâu đâm xuyên còn phụ thuộc vào kích thước hạt tinh thể của vật liệu làm phễu [12, 13]. Nhiều nghiên cứu khác cũng cho thấy, hiệu quả đâm xuyên của phễu kim loại có kích thước hạt tinh thể siêu mịn tốt hơn so với phễu có kích thước hạt tinh thể dạng thô [14, 15].

Có rất nhiều phương pháp chế tạo phễu lót như: dập, miết, luyện kim bột hay mạ điện [1, 16-19]. Trong đó, nổi lên 2 phương pháp tương đối mới và có khả năng ứng dụng cao là phương pháp

luyện kim bột và phương pháp miết cơ khí. Các nghiên cứu đi trước cho thấy, các phôi kim loại hay composit chế tạo bằng phương pháp luyện kim bột có hiệu quả đâm xuyên khá tốt [20-22]. Đối với phương pháp luyện kim bột, kỹ thuật thiêu kết xung điện plasma (SPS) cho thấy hiệu quả cao trong việc nâng cao độ xít chặt của vật liệu, đồng thời duy trì được kích thước hạt mịn hoặc siêu mịn do thời gian thiêu kết ngắn và vật liệu được ép một chiều trong khi thiêu kết [23, 24]. Đối với phương pháp miết, kim loại trong quá trình miết được biến dạng mạnh, hạt cấu trúc tinh thể được làm nhỏ mịn, điều này sẽ có thể nâng cao được khả năng xuyên của phôi.

Để hiểu rõ hơn về ảnh hưởng của phương pháp chế tạo đến cấu trúc, tính chất và hiệu quả hoạt động của phôi lót, trong nghiên cứu này, các phôi đồng sẽ được chế tạo bằng 4 quy trình khác nhau: dập nguội, dập nguội kết hợp với miết, thiêu kết bột đồng bằng xung điện plasma SPS, thiêu kết SPS kết hợp với miết. Cấu trúc, tính chất cơ của vật liệu và khả năng xuyên thép của 4 loại phôi lót đồng nói trên sẽ được khảo sát.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu và các phương pháp chế tạo phôi lót đồng

2.1.1. Vật liệu cho nghiên cứu và kích thước phôi lót đồng

Trong nghiên cứu này, hai loại vật liệu là đồng tấm và đồng bột được sử dụng để chế tạo phôi lót đồng bằng 2 phương pháp khác nhau. Trong đó đồng tấm là loại đồng đỏ mác C10100, với độ sạch 99,97%, dày 1,5 mm. Bột đồng dạng điện phân, có độ sạch 99,5%, kích thước hạt bột trong khoảng 44 - 74 μm . Phôi lót đồng để lắp vào lạng nỏ phục vụ nghiên cứu là một hình nón cân, có kích thước cơ bản như sau: đáy dưới 33 mm, chiều cao 25 mm, góc đỉnh 59,5° và dày 1 mm. Tất cả phôi lót sau khi chế tạo đều phải trải qua công đoạn gia công cơ khí để đạt kích thước sau cùng và độ nhám bề mặt trước khi thử nghiệm.

2.1.2. Chế tạo phôi lót đồng bằng phương pháp dập nguội

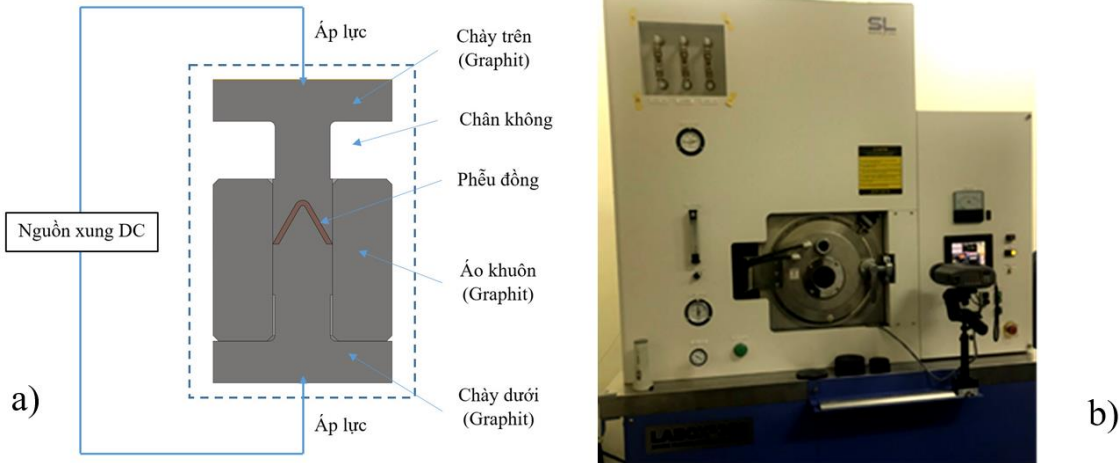
Phôi lót đồng chế tạo theo phương pháp dập nguội được dập theo 5 bước, trong đó, sau khi dập sâu lần 1, phôi dập được ủ mềm tại nhiệt độ 760 °C trong 30 phút, môi trường ủ là chân không. Tiếp theo, phôi được dập tiếp các bước 2, 3, 4, 5 để hình thành phôi lót đồng với chiều dày thành phôi là 1,5 mm. Đối với phôi lót đồng chế tạo theo phương pháp dập nguội mà không phải qua công đoạn miết để làm nhỏ mịn hạt cấu trúc, phôi lót đồng sau đó sẽ được gia công cơ khí để đạt kích thước sau cùng.

2.1.3. Chế tạo phôi lót đồng bằng phương pháp thiêu kết xung điện plasma từ bột đồng

Đầu tiên bột đồng được cân xác định khối lượng từng mẻ, đưa vào tang nghiền trộn bằng hợp kim cứng, thêm chất kết dính là 1% parafin + 10% acetone, sau đó, bột được trộn đều trong cối nghiền với bi hợp kim cứng, tỷ lệ bi:bột là 2:1, thời gian nghiền trộn là 60 phút. Sau khi nghiền trộn, bột được lấy ra, để khô tự nhiên ngoài không khí. Tiếp theo, bột đã trộn đều với chất kết dính được ép trong khuôn thép, tạo hình sơ bộ phôi lót đồng với các kích thước được tính toán với lượng dư nhất định. Phôi phôi lót đồng sau khi ép tạo hình, được đưa vào lò ống thiêu kết sơ bộ để tạo độ cứng cần thiết trước khi đưa sang công đoạn ép thiêu kết bằng xung điện plasma. Môi trường thiêu kết sơ bộ là khí hydro, nhiệt độ thiêu kết sơ bộ là 900 °C, thời gian thiêu kết sơ bộ là 60 phút. Phôi lót đồng sau khi thiêu kết sơ bộ được làm sạch ba vĩa, đưa vào khuôn graphite để ép thiêu kết trên thiết bị xung điện plasma. Thiết bị thiêu kết xung điện plasma được sử dụng trong nghiên cứu này là thiết bị SPS Labox 350 system (hãng Sinterland, Nhật Bản), đặt tại Viện Khoa học vật liệu. Nhiệt độ thiêu kết SPS là 900 °C, thời gian giữ nhiệt là 15 phút, tốc độ nâng nhiệt là 50 °C/phút, độ chân không là 6 Pa, áp lực ép là 32,36 MPa. Hình 1 dưới đây là nguyên lý thiêu kết phôi lót đồng trên thiết bị SPS và hình ảnh thiết bị nghiên cứu.

Phôi lót đồng được chế tạo theo phương pháp thiêu kết bằng dòng xung plasma có kích thước phía trong cơ bản như yêu cầu, chiều dày thành phôi có thể dao động trong khoảng từ 1,6 đến

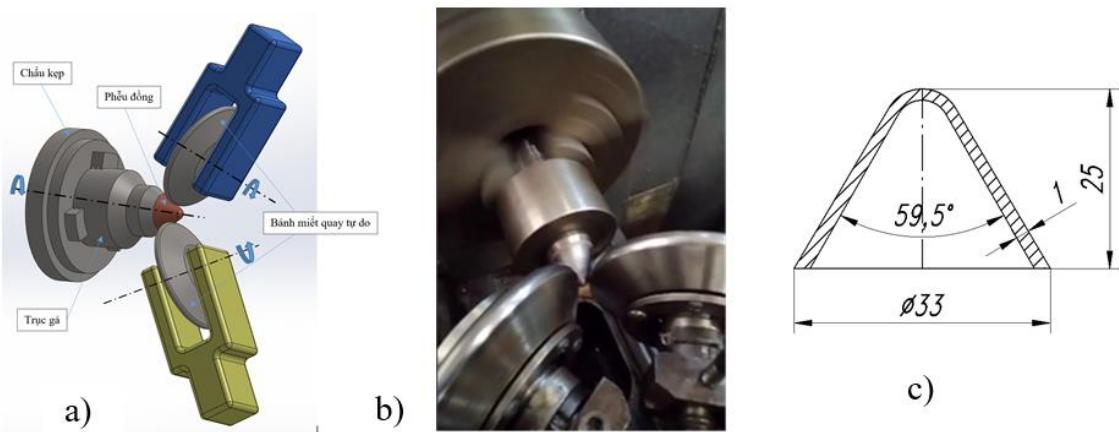
1,7 mm. Đối với phôi lót đồng không phải qua công đoạn miết để làm nhỏ mịn hạt cấu trúc, phôi lót đồng sẽ được gia công cơ khí để đạt kích thước sau cùng tương tự như đối với phôi lót đồng dập nguội.



Hình 1. Sơ đồ nguyên lý thiêu kết phôi lót đồng trên thiết bị SPS (a) và hình ảnh thiết bị (b).

2.1.4. Phương pháp miết phôi lót đồng sau dập nguội và sau thiêu kết SPS

Để làm nhỏ mịn hạt cấu trúc của vật liệu, phôi lót đồng sau dập nguội hoặc sau khi thiêu kết bằng SPS được miết trên thiết bị miết đặc chủng tại Nhà máy Z117 – Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng. Mỗi phôi lót đồng được miết qua 2 giai đoạn. Giai đoạn 1, miết làm 3 lần, mỗi lần chiều sâu miết 0,1 mm, bước tiến con lăn miết 0,2 mm/vòng quay, tốc độ quay của trục 250 vòng/phút. Sau khi miết giai đoạn 1, phôi lót đồng được ủ khử ứng suất ở nhiệt độ 150 °C trong thời gian 60 phút. Tiếp đến, phôi lót đồng được miết giai đoạn 2 với 2 lần miết, chiều sâu miết mỗi lần là 0,1 mm, bước tiến con lăn miết vẫn là 0,2 mm/vòng quay. Sơ đồ nguyên lý miết phôi lót đồng và hình ảnh miết trên thực tế được trình bày trên hình 2.



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý miết phôi lót đồng (a), hình ảnh miết mẫu trên thực tế (b) và kích thước cơ bản của phôi lót đồng sau khi gia công (c).

Phôi sau khi miết được gia công cơ khí để đạt được kích thước và độ nhám bề mặt sau cùng theo yêu cầu trước khi thử nổ.

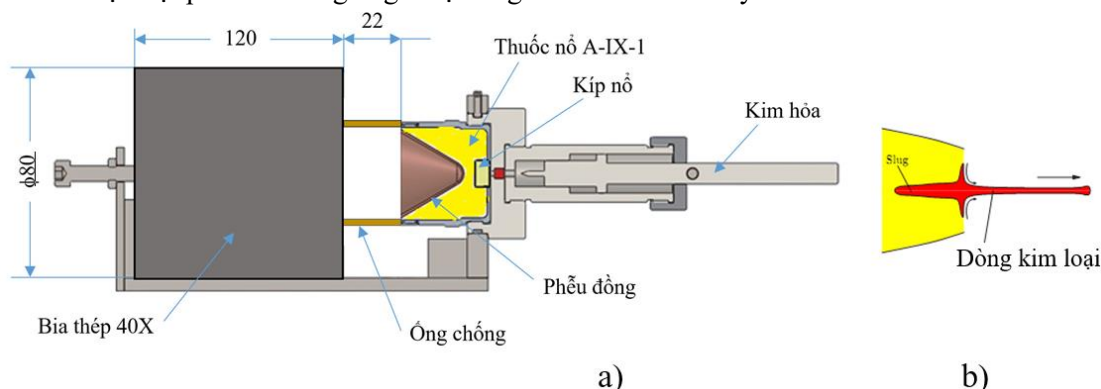
2.2. Phương pháp nghiên cứu tính chất vật liệu

Cấu trúc vật liệu được nghiên cứu trên các thiết bị hiển vi quang học (Axiovert 40 MAT, Đức), hiển vi điện tử quét SEM (Hitachi S4800, Nhật Bản) và hiển vi điện tử truyền qua HR-

TEM (JEOL JEM 2100, Nhật Bản) tại Viện Khoa học vật liệu. Mẫu cho nghiên cứu được lấy từ vị trí giữa của phễu lót đồng và được mài, tẩm thực theo quy trình cho nghiên cứu trên SEM. Mẫu cho nghiên cứu trên TEM cũng được lấy từ giữa phễu lót đồng, được mài mỏng, ăn mòn điện hóa trong dung dịch chuẩn của hãng cung cấp. Khối lượng riêng của vật liệu được đo bằng phương pháp cân thủy tĩnh (AND GN202, Nhật Bản). Độ cứng của vật liệu được đo trên máy đo độ cứng tế vi (IndentaMet 1106, Buehler USA) tại Viện Khoa học vật liệu với tải trọng 0,3 kgf, thời gian giữ lực 10 giây.

2.3. Phương pháp đánh giá khả năng xuyên của phễu lót

Để đánh giá khả năng xuyên của phễu lót, hệ thống thử nghiệm nổ lôm được thiết lập như hình 3a. Lượng nổ lôm gồm thân làm bằng thép, phía trong có gắn phễu lót đồng và 38 ± 1 gam thuốc nổ A-IX-1. Phía đáy thân thép có gắn hệ kíp nổ để kích hoạt khối thuốc nổ. Bia thép được làm bằng thép 40Cr có hàm lượng C = 0,38 - 0,44%, Cr = 0,8 - 1,1%, có đường kính 80 mm và chiều dài 120 mm. Mặt đáy của phễu lót đồng đặt cách mặt bia thép một khoảng cách là 22 mm. Khoảng cách này được lấy theo kích thước chớp gió của đạn 40 mm xuyên lôm hiện đang được sử dụng để tiện so sánh. Bia thép và lượng nổ lôm được định vị cố định với nhau bằng vít phía sau bia thép, đảm bảo cho việc lượng nổ lôm và bia thép không thể dịch chuyển trong quá trình chuẩn bị nổ. Khi được kích nổ, khối thuốc nổ sẽ tạo sóng xung kích, làm biến dạng phễu lót đồng tạo thành dòng kim loại ở thể rắn, di chuyển xuyên vào bia thép với vận tốc siêu cao (hình 3b), tạo một lỗ xuyên trong bia thép. Sau mỗi một lần nổ, bia thép được lấy ra, đo chiều sâu xuyên bằng que thăm, một số bia thép sau khi nổ được cắt xẻ đôi theo chiều dọc, chính giữa lỗ xuyên để quan sát và chụp ảnh. Mỗi một loại phễu lót đồng được thử nổ hai lần, chiều sâu xuyên thép của mỗi một loại phễu lót đồng là giá trị trung bình của hai lỗ xuyên.



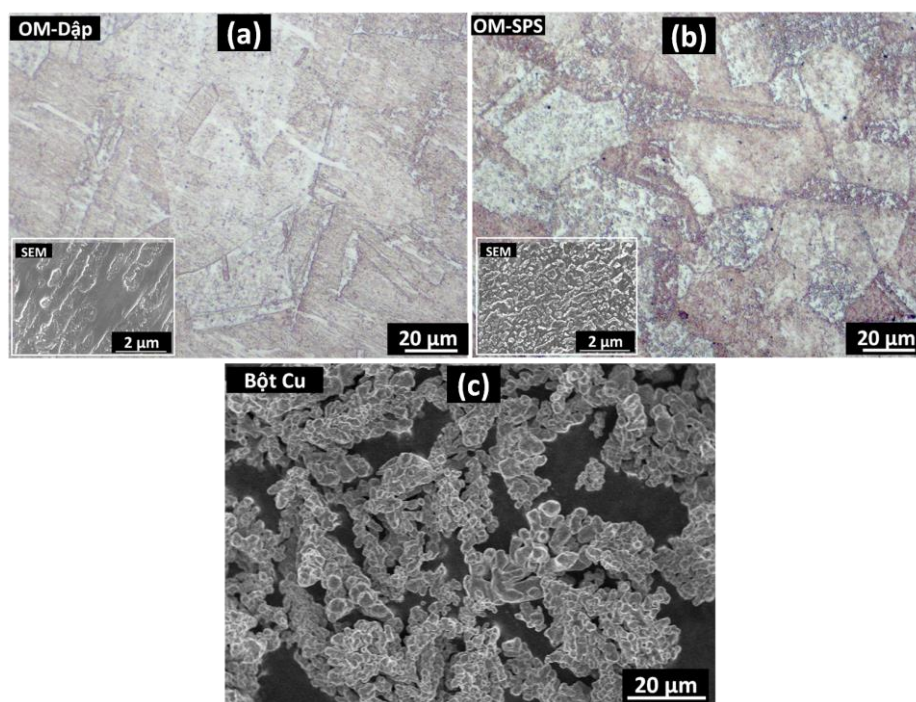
Hình 3. Sơ đồ hệ thống thử nghiệm nổ lôm a) và nguyên lý hình thành dòng kim loại b).

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Cấu trúc và tính chất đặc trưng của vật liệu phễu lót đồng chế tạo bằng phương pháp dập nguội và phương pháp thiêu kết xung điện plasma

Để quan sát kích thước hạt tinh thể của vật liệu phễu đồng được chế tạo bằng phương pháp dập nguội từ đồng tấm và phương pháp thiêu kết xung điện plasma, các mẫu được cắt ra từ các phễu, sau đó mài, đánh bóng và tẩm thực bằng dung dịch FeCl_3 (5 g) + HCl (10 mL) + H_2O (100 mL). Trên hình 4 là ảnh hiển vi quang học (OM) cấu trúc của vật liệu phễu đồng dập nguội (hình 4a) và phễu lót đồng thiêu kết SPS (hình 4b). Từ hình thấy rằng, cấu trúc của 2 loại vật liệu đều bao gồm các hạt đa tinh thể, kích thước từ vài chục đến hàng trăm μm và không có nhiều khác biệt. Tuy nhiên, khi quan sát trên kính hiển vi điện tử quét (SEM) ở độ phóng đại cao hơn vào các hạt đa tinh thể đồng cho thấy sự khác biệt rõ ràng giữa hai cấu trúc. Đối với mẫu đồng dập nguội, mỗi hạt lớn bao gồm một số hạt nhỏ nhưng kích thước khá lớn. Điều này là do mẫu đồng dập nguội được chế tạo từ phôi đồng sau quá trình đúc-cán, nên kích thước hạt sau quá trình kết tinh,

kết tinh lại thường rất lớn, tương tự như quan sát được trong các nghiên cứu trước đây [13, 18]. Ngược lại, đối với mẫu đồng SPS, mỗi hạt đa tinh thể chứa nhiều hạt với kích thước nhỏ mịn dưới 1 μm . Các siêu hạt (subgrains) kích thước nhỏ mịn trong mẫu đồng thiêu kết SPS là do kết quả di truyền từ bột đồng nguyên liệu được chế tạo bằng phương pháp điện phân. Hình 4c cho thấy, mỗi hạt bột đồng nguyên liệu dạng nhánh cây gồm nhiều hạt con phát triển theo nhiều hướng khác nhau. Khi sử dụng các hạt bột đồng này làm nguyên liệu để chế tạo phôi lót đồng bằng phương pháp thiêu kết SPS, quá trình thiêu kết được tiến hành với thời gian rất ngắn (dưới 15 phút), nên các hạt đồng chưa đủ thời gian tái kết tinh thành các hạt lớn hơn, các biên giới của các hạt con này vẫn tồn tại ở vật liệu khối sau khi thiêu kết.



Hình 4. a) và b) ảnh hiển vi quang học, ảnh SEM cấu trúc các phôi đồng sau khi dập và sau khi SPS, c) ảnh SEM bột đồng nguyên liệu để chế tạo phôi bằng phương pháp SPS.

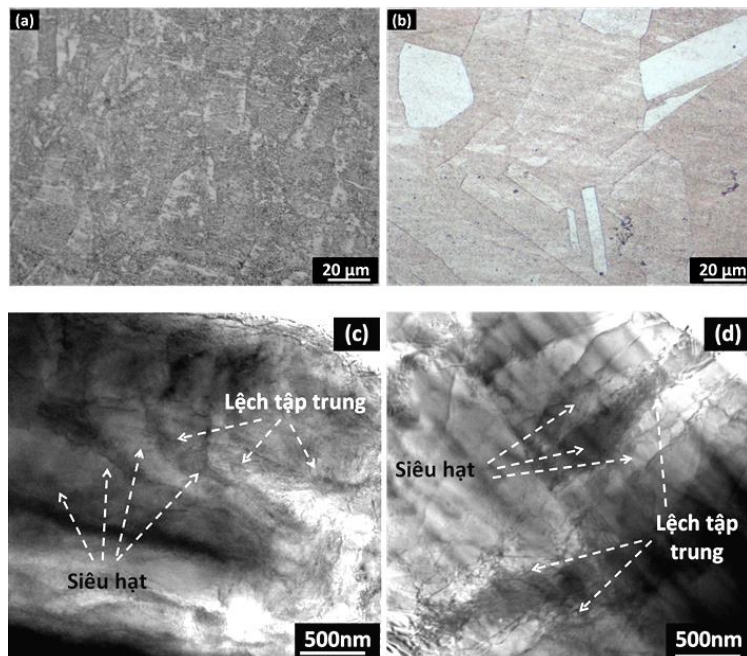
Độ cứng Vicker và khối lượng riêng của phôi đồng sau khi dập và sau khi thiêu kết SPS được trình bày tại bảng 1. Khối lượng riêng của mẫu đồng dập (ρ) đạt được trung bình là $8,95 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ tức là tương đương với tỷ trọng lý thuyết (ρ_{lt}), do mẫu được cán và sau đó được dập. Đối với mẫu đồng sau khi SPS, khối lượng riêng đạt $8,92 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$ thấp hơn so với mẫu đồng dập do được chế tạo bằng phương pháp luyện kim bột, tuy nhiên, giá trị này cũng đạt trên 99,6% so với lý thuyết, điều này cho thấy kỹ thuật thiêu kết SPS với các thông số lựa chọn trong nghiên cứu này đã tạo ra độ xít chặt gần như hoàn toàn. Mặc dù được biến dạng mạnh bằng gia công dập nguội, nhưng độ cứng tế vi của phôi đồng sau khi dập đo tại mặt ngoài là $115 \pm 1,5 \text{ HV}_{0,3}$, chỉ cao hơn 7,6% so với mẫu phôi đồng sau khi SPS là $105 \pm 1,5 \text{ HV}_{0,3}$. Điều này có thể được giải thích là do kích thước hạt tinh thể nhỏ mịn trong các hạt đa tinh thể lớn của mẫu phôi đồng chế tạo bằng phương pháp SPS so với phôi đồng chế tạo bằng phương pháp dập, như đã quan sát được trên ảnh SEM tại hình 4.

Bảng 1. Độ cứng và khối lượng riêng của mẫu phôi sau khi dập và sau khi SPS.

Mẫu	Độ cứng ($\text{HV}_{0,3}$)	ρ (g/cm^3)	ρ/ρ_{lt} (%)
Mẫu dập	$113 \pm 1,5$	$8,95 \pm 0,02$	$\sim 99,9$
Mẫu SPS	$105 \pm 1,5$	$8,89 \pm 0,03$	$\sim 99,2$

3.2. Sự thay đổi cấu trúc của vật liệu nón đồng sau khi miết

Cấu trúc của các mẫu sau khi miết được quan sát và chụp trên kính hiển vi quang học (sau khi tẩm thực) và hiển vi điện tử truyền qua như thấy trên hình 5.



Hình 5. Cấu trúc phễu lót đồng được gia chế tạo bằng phương pháp miết sau dập nguội chụp bằng kính hiển vi quang học (a) và TEM (c); cấu trúc của phễu lót đồng chế tạo bằng phương pháp miết sau SPS trên kính hiển vi quang học (b) và TEM (d).

Từ hình 5a và 5b thấy rằng, cấu trúc của các mẫu sau khi miết trên ảnh quang học không có sự thay đổi rõ ràng, cấu trúc vật liệu vẫn gồm các hạt tinh thể lớn với kích thước vài chục đến hàng trăm μm như quan sát đối với các mẫu chưa được gia công miết. Tuy nhiên, khi quan sát trên kính hiển vi điện tử truyền qua ở độ phân giải cao, hình 5c và 5d, có thể thấy cấu trúc của cả hai loại phễu sau khi miết là khá tương đồng. Quá trình gia công miết đã tạo ra sự biến dạng mạnh của các hạt và hình thành lên các siêu hạt (subgrains) với chiều rộng từ 300 đến 500 nm và chiều dài từ 1 đến 3 μm sau khi được miết, đồng thời cũng quan sát thấy sự tập trung rất lớn của các lệch mạng tại vùng biên hạt.

Kết quả đo khối lượng riêng và độ cứng Vicker các mẫu phễu sau khi miết được thể hiện trong bảng 2. Có thể thấy, sau khi được ra công miết mẫu phễu đồng chế tạo bằng phương pháp SPS đã được tăng độ xít chặt lên đến ~ 99,6% ($8,92 \pm 0,03 \text{ g/cm}^3$), tức là đạt gần với độ xít chặt theo lý thuyết. Mẫu phễu đồng chế tạo bằng phương pháp miết sau dập nguội, có khối lượng riêng hầu như không thay đổi, có giá trị $8,95 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$ tức trên 99,9%. Giá trị độ cứng của cả hai mẫu phễu sau khi miết đều tăng và gần bằng nhau, lần lượt là $119 \pm 1,5 \text{ HV}_{0,3}$ và $120 \pm 1,5 \text{ HV}_{0,3}$ tương ứng với các mẫu miết sau dập nguội và miết sau SPS. Điều này cũng phù hợp với kết quả quan sát cấu trúc tế vi trên ảnh TEM với sự hình thành của các siêu hạt với kích thước siêu mịn đi kèm với sự tập trung lớn của lệch mạng tại biên hạt là nguyên nhân làm cho độ cứng của phễu đồng tăng lên sau khi được gia công miết.

Bảng 2. Độ cứng và khối lượng riêng của mẫu phễu sau khi dập + miết và sau khi SPS + miết.

Mẫu	Độ cứng ($\text{HV}_{0,3}$)	ρ (g/cm^3)	ρ/ρ_{lt} (%)
Miết sau dập nguội	$119 \pm 1,5$	$8,95 \pm 0,02$	~99,9
Miết sau SPS	$120 \pm 1,5$	$8,92 \pm 0,03$	~99,6

3.3. Kết quả thử nổ lõm

Như phần 2 đã trình bày, mỗi một loại phễu lót đồng được thử nổ 2 lần để lấy chiều sâu xuyên trung bình. Số liệu chiều sâu xuyên được trình bày tại bảng 3.

Bảng 3. Số liệu chiều sâu xuyên đo được của các loại phễu khi thử.

TT	Loại mẫu	Chiều sâu xuyên lần thứ 1 (mm)	Chiều sâu xuyên lần thứ 2 (mm)	Chiều sâu xuyên trung bình (mm)
1	Phễu chế tạo bằng phương pháp dập nguội	45	55	50
2	Phễu chế tạo bằng phương pháp miết sau dập nguội	80	81	80,5
3	Phễu chế tạo bằng phương pháp thiêu kết SPS	71	70	70,5
4	Phễu chế tạo bằng phương pháp miết sau thiêu kết SPS	82	80	81

Từ bảng thấy rằng, chiều sâu xuyên của phễu chế tạo bằng phương pháp dập nguội là thấp nhất và không ổn định, chênh lệch trên 20%. Tiếp đến là chiều sâu xuyên của phễu chế tạo bằng phương pháp thiêu kết SPS, cao nhất là chiều sâu xuyên của phễu chế tạo bằng phương pháp dập hoặc thiêu kết SPS sau đó kết hợp với công đoạn miết để làm nhỏ mịn hạt cấu trúc. Trong đó, công đoạn miết làm tăng chiều sâu xuyên của thêm 61% so với phễu dập nguội. Điều này có thể được lý giải là do kích thước hạt cấu trúc của đồng sau khi dập nguội lớn. Tương tự, so với phễu SPS, công đoạn miết làm tăng chiều sâu xuyên thêm 14,9% so với phễu SPS ban đầu, do chiều sâu xuyên của phễu SPS đã cao hơn chiều sâu xuyên của phễu dập nguội là 41%. Kết quả cũng cho thấy, chiều sâu xuyên của cả hai loại phễu chế tạo bằng phương pháp dập nguội hay bằng phương pháp SPS sau đó được gia công làm nhỏ mịn hạt đều có giá trị tương đương nhau và đạt giá trị trên 80 mm. Hình 6 dưới đây là hình ảnh mặt cắt lỗ xuyên trên bia thép sử dụng 4 loại phễu lót.



Hình 6. Hình ảnh mặt cắt lỗ xuyên trên bia sử dụng các loại phễu lót khác nhau.

Chiều sâu xuyên của phễu lót đồng chế tạo bằng phương pháp thiêu kết SPS lớn hơn nhiều so với chiều sâu xuyên của phễu lót đồng chế tạo bằng phương pháp dập là do phễu lót đồng chế tạo bằng phương pháp thiêu kết SPS có cấu trúc được di truyền từ bột đồng nguyên liệu, với các siêu hạt nhỏ mịn khoảng 1 μm bên trong các hạt tinh thể lớn. Vì vậy, cấu trúc của đồng thiêu kết bằng SPS gồm nhiều biên hạt hơn so với cấu trúc của đồng dập. Các nghiên cứu [12-14, 25] đều chỉ ra rằng, chiều sâu xuyên tăng lên khi kích thước hạt cấu trúc của phễu kim loại giảm, hay nói cách khác là khi tỷ lệ biên giới hạt trong cấu trúc tăng lên.

Hiện tượng sau khi miết, chiều sâu xuyên của phễu lót đồng tăng lên đáng kể có thể được lý giải dựa trên kết quả phân tích sự thay đổi cấu trúc của vật liệu. Trong đó, Liu và cộng sự [26] đã đi đến kết luận, sự biến dạng của phễu lót đồng trong lượng nổ lôm tương tự như hiện tượng biến dạng siêu dẻo trong kim loại, chủ yếu dựa vào sự trượt của lệch dưới tốc độ biến dạng siêu cao (đến $10^4 \cdot s^{-1}$). Vì thế, càng tạo ra nhiều lệch trong cấu trúc kim loại trước khi biến dạng, hoặc tạo ra nhiều biên giới hạt, thì càng tạo điều kiện cho lệch có thể trượt và thúc đẩy quá trình biến dạng phễu kim loại được liên tục, làm cho phễu kim loại được biến dạng thành đồng kim loại dài hơn, không bị đứt gãy.

Từ kết quả chụp ảnh TEM đối với mẫu sau khi biến dạng bằng phương pháp miết trên hình 5c và 5d có thể thấy, sau khi miết, trong lòng các hạt cấu trúc đã hình thành các siêu hạt với mật độ lệch cao. Các siêu hạt này có kích thước chiều rộng từ 300-500 nm, dài từ 1-3 μm . Việc rất nhiều siêu hạt được hình thành trong các hạt lớn, mỗi một siêu hạt này lại có định hướng tinh thể khác nhau, làm cho một tỷ lệ nhất định siêu hạt có phương trượt của lệch trùng phương tác động của lực, điều này làm cho hạt lớn nào cũng được biến dạng. Ngược lại, cấu trúc của phễu không được miết không có các siêu hạt, các hạt lớn lại có định hướng tinh thể khác nhau, chỉ một tỷ lệ nhất định các hạt lớn có phương trượt trùng với phương tác động của lực. Vì vậy, khi biến dạng có hạt lớn được biến dạng dễ dàng, có hạt khó biến dạng, do đó sẽ dễ hình thành các vết nứt, làm cho đồng kim loại dễ bị gãy đứt. Trong khi đó, đối với phễu lót sau khi được miết, tất cả các hạt lớn đều được biến dạng, điều này sẽ hạn chế sự hình thành các vết nứt, làm cho đồng kim loại được dài hơn, làm tăng chiều sâu xuyên của phễu.

4. KẾT LUẬN

Từ kết quả nghiên cứu, một số kết luận sau đây được rút ra:

- Phương pháp chế tạo phễu lót đồng có ảnh hưởng lớn đến chiều sâu xuyên của lượng nổ lôm. Trong đó, phễu lót đồng chế tạo bằng phương pháp dập kết hợp với miết, phễu lót đồng chế tạo bằng phương pháp thiêu kết xung điện plasma kết hợp với miết cho kết quả chiều sâu xuyên là lớn nhất. Phễu lót đồng chế tạo chỉ bằng phương pháp dập có chiều sâu xuyên thấp nhất và không ổn định. Công đoạn miết phễu lót đồng sau khi dập nguội đã làm tăng chiều sâu xuyên của lượng nổ lôm lên 61% so với mẫu dập không miết.

- Phễu lót đồng chế tạo bằng phương pháp thiêu kết xung điện plasma xuyên sâu hơn 41% so với phễu lót đồng chế tạo bằng phương pháp dập nguội. Công đoạn miết phễu lót đồng sau khi thiêu kết xung điện plasma làm tăng thêm được gần 15% so với phễu không miết. Điều này mở ra khả năng chế tạo phễu lót cho lượng nổ lôm bằng phương pháp thiêu kết xung điện plasma.

- Công đoạn miết tạo ra các siêu hạt trong cấu trúc vật liệu với kích thước chiều rộng từ 300-500 nm, chiều dài từ 1 - 3 μm .

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Naeem, K., A. Hussain, and S. Abbas, "A Review of Shaped Charge Variables for its Optimum Performance". Engineering, Technology & Applied Science Research. **9**(6): p. 4917-4924, (2019).
- [2]. Borkowski, J., et al., "Application of sintered liners for explosively formed projectile charges". International Journal of Impact Engineering. **118**: p. 91-97, (2018).
- [3]. Ahmed, M. and A.Q. Malik, "A Review of Works on Shaped Charges". Engineering, Technology & Applied Science Research. **7**(5): p. 2098-2103, (2017).
- [4]. Zaki, S., et al., "Effect of liner material and explosive type on penetration effectiveness of shaped charge". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications. **233**(7): p. 1375-1383, (2018).
- [5]. Held, M., "Liners for Shaped Charges". Journal of Battlefield Technology, **4**(3), pp.1-6, (2001).
- [6]. Yi, J., et al., "Simulation Study on Expansive Jet Formation Characteristics of Polymer Liner". Materials. **12**: p. 744, (2019).

-
- [7]. Saran, S., O. Ayıstı, and M.S. Yavuz, "Experimental Investigations on Aluminum Shaped Charge Liners". *Procedia Engineering*. **58**: p. 479-486, (2013).
- [8]. Li, W.B., et al., "Effect of the liner material on the shape of dual mode penetrators". *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. **51**(3): p. 387-394, (2015).
- [9]. Walters, W., W. Gooch, and M. Burkins, "The Penetration Resistance of a Titanium Alloy against Jets from Tantalum Shaped Charge Liners". (2000).
- [10]. Elshenawy, T. and Q. Li, "Breakup Time of Zirconium Shaped Charge Jet". *Propellants*. **38**, (2013).
- [11]. Zhang, X., C. Wu, and F. Huang, "Penetration of shaped charge jets with tungsten-copper and copper liners at the same explosive-to-liner mass ratio into water". *Shock Waves*. **20**(3): p. 263-267, (2010).
- [12]. Sun, S., et al., "Comparison of Shaped Charge Jet Performance Generated by Machined and Additively Manufactured CuSn10 Liners". *Materials (Basel)*. **14**(23), (2021).
- [13]. Leus, V., Y. Khopdôngr, and R. Ceder, "Examination of shaped charge performance with ECAP produced liners". Vol. 2272. 120013, (2020).
- [14]. Petit, J., V. Jeanclaude, and C. Fressengeas, "Effects of liner grain size on shaped - Charge jet performance: A combined experimental/numerical/analytical approach". **134**, (2006). <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:2006134058>
- [15]. Li, X., et al., "Study on grain refinement of copper-based liner by vacuum gradient heat treatment process using response surface methodology". *Journal of Materials Research and Technology*. **15**: p. 2345-2354, (2021).
- [16]. Elshenawy, T., S. Soliman, and A. Hawwas, "Influence of electric current intensity on the performance of electroformed copper liner for shaped charge application". *Defence Technology*. **13**(6): p. 439-442, (2017).
- [17]. Jackowski, A. and E. Włodarczyk, "The influence of repressing liners made from sintered copper on jet formation". *Journal of Materials Processing Technology*. **171**(1): p. 21-26, (2006).
- [18]. Hoseini, S.M.J., et al., "Investigation of microstructure and mechanical properties of copper shell produced by shear spinning in different rotation directions". *Materials Research Express*. **8**(6): p. 066521, (2021).
- [19]. Zhang, M., et al., "Structure of copper shaped charge liner evolution law based on die forging process". *Journal of Physics: Conference Series*. **1507**: p. 032036, (2020).
- [20]. Zygmunt, B. and Z. Wilk, "Formation of Jets by Shaped Charges with Metal Powder Liners". *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. **33**, (2008).
- [21]. Walters, W.P., et al. "A Study of Jets From Unsintered-Powder Metal Lined Nonprecision Small-Caliber Shaped Charges". (2001).
- [22]. Zhanlei, W., et al., "Dynamic Consolidation of W-Cu Nano-Alloy and Its Performance as Liner Materials". *Rare Metal Materials and Engineering*. **43**(5): p. 1051-1055, (2014).
- [23]. Zhang, Z.-H., et al., "Ultrafine-grained copper prepared by spark plasma sintering process". *Materials Science and Engineering: A*. **476**(1): p. 201-205, (2008).
- [24]. Zhou, K., et al., "W-Cu composites reinforced by copper coated graphene prepared using infiltration sintering and spark plasma sintering: A comparative study". *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. **82**: p. 91-99, (2019).
- [25]. Welsh B.S., "High Speed Deformation and Break-Up of Shaped Charge Jets". The University of Nottingham, p. 221, (1993).
- [26]. Liu, J., et al., "Dynamic Response and Microstructure Evolution of Oxygen-Free High-Conductivity Copper Liner in Explosively Formed Projectile". *Latin American Journal of Solids and Structures*. **14**: p. 2089-2106, (2017).
-

ABSTRACT

**Influence of fabrication method of copper shaped charge liners
on the penetration depth into steel targets**

This paper presents the penetration behavior of copper shaped charge liners produced by four different techniques, including deep drawing, deep drawing followed by metal spinning, SPS sintering and SPS sintering followed by metal spinning technique. The results show that the grain size of copper liners has a strong effect on the penetration depth into steel targets. The metal spinning step led to the appearance of the subgrains and the increase of dislocation density and hence, improved the penetration depth of the copper shaped charge liner. Accordingly, the penetration depth of the shaped charge liners produced by deep drawing followed by metal spinning and SPS sintering followed by metal spinning into steel targets reached the highest values, which are about 80 mm. Meanwhile, the penetration depth of the shaped charge using SPS sintered liner is 70.5 mm. The copper liner made by deep drawing produced an unstable depth and was about 50 mm. This work also shows the formation of the subgrains with a width in the range of 300 to 500 nm and a length from 1 to 3 μm in the liners microstructure after metal spinning.

Keywords: Shaped charge; Copper liner; Penetration depth.