BÔ GIÁO DUC VÀ ĐÀO TAO VIÊN HÀN LÂM KHOA HOC

VÀ CÔNG NGHÊ VIÊT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ



NGUYỄN MINH TUẤN

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO NÓN XUYÊN TRONG THIẾT BỊ NỔ LÕM BẰNG ĐỒNG KIM LOẠI VÀ COMPOSITE W-Cu CÓ CẤU TRÚC SIÊU MỊN

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT LIỆU

Hà Nội - 2024

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO

VIỆN HÀN LÂM KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ VIỆT NAM

HỌC VIỆN KHOA HỌC VÀ CÔNG NGHỆ

NGUYỄN MINH TUẤN

NGHIÊN CỨU CHẾ TẠO NÓN XUYÊN TRONG THIẾT BỊ NỔ LÕM BẰNG ĐỒNG KIM LOẠI VÀ COMPOSITE W-Cu CÓ CẤU TRÚC SIÊU MỊN

Chuyên ngành: Kim loại học Mã số: 9.44.01.29

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC VẬT LIỆU

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1. PGS.TS. Đoàn Đình Phương

2. PGS.TS. Nguyễn Văn Tích

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án: "Nghiên cứu chế tạo nón xuyên trong thiết bị nổ lõm bằng đồng kim loại và composite W-Cu có cấu trúc siêu mịn" là công trình nghiên cứu của chính mình dưới sự hướng dẫn khoa học của tập thể hướng dẫn. Luận án sử dụng thông tin trích dẫn từ nhiều nguồn tham khảo khác nhau và các thông tin trích dẫn được ghi rõ nguồn gốc. Các kết quả nghiên cứu của tôi được công bố chung với các tác giả khác đã được sự nhất trí của đồng tác giả khi đưa vào luận án. Các số liệu, kết quả được trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa từng được công bố trong bất kỳ một công trình nào khác ngoài các công trình công bố của tác giả. Luận án được hoàn thành trong thời gian tôi làm nghiên cứu sinh tại Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam.

> Hà nội, ngày tháng 01 năm 2024 Tác giả luận án

> > Nguyễn Minh Tuấn

LỜI CẢM ƠN

Trước hết tôi xin bày tỏ lòng kính trọng và biết ơn sâu sắc tới PGS.TS. Đoàn Đình Phương và PGS.TS. Nguyễn Văn Tích, những người đã trực tiếp hướng dẫn và tạo điều kiện thuận lợi, giúp đỡ tôi trong suốt thời gian hoàn thành luận án này.

Tôi xin cảm ơn Bộ Giáo dục và Đào tạo, Học viện Khoa học và Công nghệ, Viện Khoa học Vật liệu, Viện Hàn lâm Khoa học và Công nghệ Việt Nam, Viện Công nghệ/Tổng cục CNQP đã tạo điều kiện thuận lợi để tôi hoàn thành luận án.

Tôi xin chân thành cảm ơn sự giúp đỡ của các cán bộ Viện Khoa học vật liệu, đặc biệt là tập thể phòng Vật liệu Kim loại tiên tiến đã giúp đỡ tôi trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Tôi xin cảm ơn sự giúp đỡ của các cán bộ Trung tâm đánh giá hư hỏng vật liệu thuộc Viện Khoa học Vật liệu, Trung tâm Đo lường, Phòng CN Đạn được thuộc Viện Công nghệ và Nhà máy Z113/Tổng cục CNQP đã giúp đỡ về đo đạc và thử nghiệm trong quá trình thực hiện luận án.

Tôi xin chân thành cảm ơn TS. Trần Bảo Trung, TS. Lương Văn Đương, TS. Phạm Văn Trình, ThS. Vũ Thăng Long, ThS. Lê Anh Quang, ThS. Nguyễn Ngọc Linh, ThS. Nguyễn Văn Toàn, KTV. Nguyễn Quang Huân những người luôn luôn bên cạnh giúp đỡ và ủng hộ tôi trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Cuối cùng, tôi xin gửi lời cảm ơn sâu sắc nhất tới gia đình tôi. Bố mẹ hai bên nội ngoại và mọi người trong gia đình, đặc biệt là vợ tôi đã luôn động viên, giúp đỡ tôi trong suốt quá trình nghiên cứu và hoàn thành luận án.

Hà nội, ngày..... tháng 01 năm 2024

Tác giả luận án

Nguyễn Minh Tuấn

MỤC LỤC

Trang

LỜI CAM ĐOANi
LỜI CẢM ƠNii
MỤC LỤCiii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHŨ VIẾT TẮTvii
DANH MỤC CÁC BẢNGviii
DANH MỤC CÁC HÌNH VỄ, ĐỎ THỊix
MỞ ĐẦU1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN4
1.1. Lịch sử hình thành và phát triển của nổ lõm4
1.2. Cấu tạo, nguyên lý hoạt động của thiết bị nổ lõm7
1.2.1. Cấu tạo thiết bị nổ lõm7
1.2.2. Nguyên lý hoạt động7
1.2.2.1. Sự hình thành dòng kim loại khi nổ lõm7
1.2.2.2. Quá trình xuyên vào mục tiêu10
1.3. Các yếu tố ảnh hưởng đến tính năng của thiết bị nổ lõm 11
1.3.1. Ảnh hưởng của các thông số nón xuyên12
1.3.2. Ảnh hưởng của thuốc nổ15
1.3.3. Ảnh hưởng của cấu trúc thiết bị nổ lõm15
1.3.4. Ảnh hưởng của tiêu cự nổ17
1.3.5. Ảnh hưởng của dung sai gia công chi tiết và quá trình lắp ghép18
1.4. Vật liệu nón xuyên
1.4.1. Ảnh hưởng của vật liệu và công nghệ chế tạo đến chiều sâu xuyên 19
1.4.1.1. Vật liệu nón xuyên là kim loại nguyên chất

1.4.1.2. Vật liệu nón xuyên là hợp kim	22
1.4.1.3. Vật liệu nón xuyên là composite (W-Cu)	23
1.4.2. Ảnh hưởng của kích thước hạt cấu trúc đến chiều sâu xuyên	26
1.5. Các phương pháp chế tạo nón kim loại	30
1.6. Các ứng dụng của thiết bị nổ lõm	31
1.7. Kết luận Chương 1	33
CHƯƠNG 2. CÁC PHƯƠNG PHÁP CHẾ TẠO VẬT LIỆU VÀ NGHIÊN CỨU	35
2.1. Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu	35
2.1.1. Đồng tấm	35
2.1.2. Bột đồng	35
2.1.3. Bột vonfram (W)	36
2.1.4. Vật tư và hóa chất khác	36
2.2. Phương pháp chế tạo mẫu nghiên cứu	36
2.2.1. Mẫu vật liệu dạng khối	36
2.2.2. Mẫu nón xuyên	39
2.3. Phương pháp nghiên cứu	43
2.3.1. Nghiên cứu cấu trúc của vật liệu	43
2.3.1.1. Phương pháp hiển vi quang học (OM) và hiển vi điện tử quét	
(SEM)	43
2.3.1.2. Phương pháp chụp ảnh TEM	44
2.3.2. Phương pháp xác định cơ lý tính của vật liệu	45
2.3.2.1. Phương pháp xác định khối lượng riêng	45
2.3.2.2. Phương pháp đo độ cứng tế vi	45
2.3.3. Phương pháp xác định khả năng đâm xuyên của vật liệu	45

2.3.3.1. Phương pháp mô phỏng sử dụng phần mềm ANSYS
AUTODYN
2.3.3.2. Phương pháp thử nghiệm nổ lõm47
2.4. Kết luận chương 2
CỦA ĐỒNG KIM LOẠI CÂU TRÚC SIÊU MỊN 49
3.1. Chế tạo nón xuyên kim loại có cấu trúc siêu mịn
3.1.1. Chế tạo nón xuyên bằng phương pháp dập nguội 49
3.1.2. Chế tạo nón xuyên bằng phương pháp thiêu kết xung plasma
3.1.3. Miết nón xuyên sau khi dập nguội và sau thiêu kết SPS
3.2. Cấu trúc và tính chất đặc trưng của vật liệu nón xuyên chế tạo bằng phương pháp dập nguội và thiêu kết xung điện plasma
3.2.1. Cấu trúc và tính chất đặc trưng của vật liệu nón xuyên chế tạo bằng phương pháp dập nguội
3.2.1.1. Cấu trúc của vật liệu nón xuyên dập nguội51
3.2.1.2. Cơ-lý tính của vật liệu nón xuyên dập nguội 53
3.2.2. Cấu trúc và tính chất đặc trưng của vật liệu nón xuyên chế tạo bằng phương thiêu kết xung điện plasma
3.2.2.1. Cấu trúc của nón xuyên chế tạo bằng phương pháp thiêu kết SPS 54
3.2.2.2. Co-lý tính của nón xuyên thiêu kết SPS 55
3.2.3. Sự thay đổi cấu trúc của vật liệu nón xuyên sau khi miết biến dạng 56
3.2.3.1. Biến đổi cấu trúc của nón xuyên chế tạo bằng phương pháp dập + miết
3.2.3.2. Nón xuyên chế tạo bằng phương pháp luyện kim bột
3.3. Kết quả thử nổ lõm của các mẫu nón xuyên chế tạo
3.4. Kết luận Chương 3

v

CHƯƠNG 4. CHẾ TẠO, TÍNH CHẤT VÀ ĐẶC TÍNH XUYÊN NỔ LÕM
CỦA ĐỒNG COMPOSITE W-CU CÂU TRÚC SIÊU MỊN67
4.1. Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng W đến khả năng xuyên của nón
xuyên bằng phần mềm mô phỏng67
4.2. Chế tạo và thử nghiệm thực tế nón kim loại bằng vật liệu composite W-Cu73
4.2.1. Ảnh hưởng của hàm lượng W đến cấu trúc và tính chất của nón W-Cu
4.2.2. Thử nghiệm thử nổ lõm đối với nón composite W-Cu
4.3. Gia công miết tạo cấu trúc siêu mịn
4.3.1 Cấu trúc tế vi mẫu nón composite Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS
4.3.2 Cấu trúc tế vi mẫu nón composite Cu50W50 sau khi miết lần 1 82
4.3.3 Cấu trúc tế vi mẫu nón composite Cu50W50 sau khi miết lần 2 84
4.3.4 Thử nghiệm nổ lõm nón composite Cu50W50 sau khi miết lần 2 89
4.4. Kết luận Chương 4
KẾT LUẬN CHUNG
ĐÓNG GÓP CỦA LUẬN ÁN97
TÀI LIỆU THAM KHẢO

vi

	,	<i>,</i>	,	~.	ź	5
DANH MI		KV HIFI	CAC	CHIT	VIFT	TAT
DANIIMŲ	CCAU	KI IIIĘU,	CAU	$\mathbf{U}\mathbf{I}\mathbf{U}$	V I L'A I	

Chữ viết tắt và ký hiệu	Tên tiếng Anh	Tên tiếng Việt	
Р		Chiều sâu xuyên	
L		Chiều dài dòng xuyên	
ρ _j		Khối lượng riêng của vật liệu nón kim loại	
ρ _t		Khối lượng riêng của vật liệu làm bia	
υ		Tốc độ đầu dòng kim loại	
HV _{0,1}		Độ cứng Vickers	
MPa	Mega Pascal	Đơn vị đo áp suất	
CNQP		Công nghiệp quốc phòng	
SLM	Selective Laser Melting	Kỹ thuật nóng chảy laze	
HEAT	High Explosive Anti-Tank	Đạn lõm chống tăng	
SPS	Spark Plasma Sintering	Thiêu kết xung điện Plasma	
XRD	X-ray diffraction	Nhiễu xạ tia X	
ECAP	Equal Channel Angular Pressing	Kỹ thuật ép qua kênh gấp khúc tiết diện không đổi	
EBSD	Electron Backscatter Diffraction	Nhiễu xạ điện tử tán xạ ngược	
ОМ	Optical microscope	Kính hiển vi quang học	
SEM	Scanning electron microscope	Kính hiển vi điện tử quét	
TEM	Transmission electron microscopy	Kính hiển vi điện tử truyền qua	

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 1. 1. Đặc tính và thứ tự ưu tiên một số loại vật liệu nón xuyên	19
Bảng 1. 2. Một số tính chất của kim loại có khả năng làm vật liệu nón xuyên	21
Bảng 3. 1. Số liệu chiều sâu xuyên đo được của các loại nón xuyên khi thử	62
Bảng 4. 1. Kích thước của các phần tử nón, lượng nổ lõm và bia thép	68
Bảng 4. 2. Tên mẫu, thành phần và khối lượng riêng lý thuyết của composite	
W-Cu	68
Bảng 4. 3. Một số tính chất của Cu sử dụng trong bài toán mô phỏng	69

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Hình 1. 1. Sơ đồ nguyên lý cấu tạo thiết bị nổ lõm7
Hình 1. 2. Sơ đồ lan truyền sóng nổ trong thiết bị nổ lõm8
Hình 1. 3. Sự biến dạng của nón xuyên và quá trình hình thành dòng xuyên8
Hình 1. 4. Các giai đoạn hình thành và chuyển động của dòng xuyên9
Hình 1. 5. Sơ đồ tác dụng giữa dòng xuyên với bia10
Hình 1. 6. Hình dạng nón xuyên và định nghĩa góc mở12
Hình 1. 7. Mối quan hệ giữa chiều sâu xuyên với góc mở13
Hình 1. 8. Mối quan hệ giữa chiều sâu xuyên với chiều dày nón xuyên14
Hình 1. 9. Sơ đồ tính toán thuốc nổ tích cực16
Hình 1. 10. Ảnh hưởng của tấm chắn sóng đến hướng lan truyền sóng nổ trong liều thuốc nổ lõm16
Hình 1. 11. Ảnh hưởng của vật liệu, khoảng cách tiêu cự đến chiều sâu xuyên20
Hình 1. 12. Ảnh hưởng của nhiệt độ thiêu kết đến tỉ trọng tương đối của mẫu25
Hình 1. 13. Tỉ trọng tương đối của mẫu W-Cu tại các hàm lượng Cu khác nhau25
Hình 1. 14. Tỉ trọng tương đối và độ cứng Vickers của mẫu vật liệu composite W-Cu tại các nhiệt độ thiêu kết khác nhau26
Hình 1. 15. Ảnh SEM cấu trúc của đồng trước và sau khi thực hiện quá trình ECAP và ủ khử ứng suất27
Hình 1. 16. Ảnh quang học mặt cắt dọc và mặt cắt ngang của mẫu nón chế tạo bằng phương pháp tiện và chế tạo bằng phương pháp thiêu kết SLM28
Hình 1. 17. Mặt cắt bia thép sau thử nghiệm nổ lượng nổ lõm sử dụng nón chế tạo bằng kỹ thuật tiện từ phôi đúc và kỹ thuật thiêu kết SLM từ bột hợp kim28
Hình 1. 18. Ảnh nhiễu xạ điện tử tán xạ ngược cấu trúc nón đồng với kích thước hạt khác nhau
Hình 1. 19. Đạn nổ lõm và súng phóng lựu đơn giản được trang bị cho lính bộ binh

Hình 1. 20. Sơ đồ cấu tạo tên lửa chống tăng Javelin FGm-148	32
Hình 1. 21. Súng nổ lõm để mở lỗ và sơ đồ nguyên lý mở lỗ trong giếng	
khoan dầu khí bằng thiết bị nổ lõm	.33
Hình 2. 1. Đồng tấm nguyên liệu	.35
Hình 2. 2. Ảnh SEM mẫu bột đồng nguyên liệu	.35
Hình 2. 3. Ảnh SEM mẫu bột Vonfram nguyên liệu	36
Hình 2. 4. Mô hình máy nghiền bi tang trống sử dụng trong nghiên cứu	37
Hình 2. 5. Sơ đồ nguyên lý ép mẫu trụ	37
Hình 2. 6. Sơ đồ nguyên lý thiêu kết mẫu đồng trên thiết bị SPS và hình ảnh	
thiết bị SPS Labox 350 tại Viện Khoa học vật liệu	.38
Hình 2. 7. Kích thước sau cùng của nón xuyên dùng cho thử nổ lõm	39
Hình 2. 8. Sơ đồ khối các đông đoạn chế tạo nón xuyên cho thử nghiệm nổ lõm	.40
Hình 2. 9. Sơ đồ nguyên lý ép tạo hình nón xuyên và nguyên lý ép thiêu kết	
SPS nón xuyên	.41
Hình 2. 10. Sơ đồ khối các công đoạn chế tạo nón xuyên bằng phương pháp	
dập nguội từ đông tâm	.41
Hình 2. 11. Sơ đồ nguyên lý miết nón xuyên, hình ảnh miết trên thực tế	.42
Hình 2. 12. Hình ảnh mẫu nón xuyên sau khi hoàn thiện	42
Hình 2. 13. Vị trí lấy mẫu để nghiên cứu cấu trúc	.43
Hình 2. 14. Vị trí cắt mẫu đo TEM	.44
Hình 2. 15. Các bước chuẩn bị mẫu khối đo TEM	.45
Hình 2. 16. Sơ đồ hệ thống thử nghiệm nổ lõm	.48
Hình 3. 1. Sơ đồ khối các công đoạn chế tạo nón xuyên theo hai phương pháp	.49
Hình 3. 2. Hình ảnh mẫu đồng tấm; khuôn dập và sản phẩm nón xuyên	49
Hình 3. 3. Giản đồ nhiệt, chân không thiêu kết SPS nón xuyên, khuôn graphit	
và hình ảnh nón xuyên sau khi thiêu kết SPS	.50
Hình 3. 4. Vị trí cắt mẫu để quan sát cấu trúc và đo độ cứng của nón xuyên	.51

Hình 3. 5. Ảnh hiển vi quang học mẫu nón xuyên dập nguội và mẫu nón xuyên dập nguội kết hợp với miết52
Hình 3. 6. Ảnh SEM mẫu nón xuyên dập nguội và mẫu nón xuyên dập nguội kết hợp với miết
Hình 3. 7. Sự thay đổi độ cứng và khối lượng riêng của mẫu nón xuyên dập và sau khi biến dạng miết53
Hình 3. 8. Ảnh OM mẫu nón xuyên thiêu kết SPS và mẫu nón xuyên thiêu kết SPS kết hợp với miết54
Hình 3. 9. Ảnh SEM mẫu nón xuyên thiêu kết SPS và mẫu nón xuyên thiêu kết SPS kết hợp với miết với độ phóng đại khác nhau
Hình 3. 10. Khối lượng riêng và độ cứng Vickers của mẫu nón xuyên thiêu kết SPS và sau khi biến dạng miết55
Hình 3. 11. Mô hình cấu trúc khi biến dạng nhỏ và biến dạng lớn57
Hình 3. 12. Ảnh TEM mẫu nón xuyên dập sau miết lần 1 và miết lần 257
Hình 3. 13. Độ cứng tế vi của mẫu nón xuyên dập và sau khi miết biến dạng tại các vị trí khác nhau
Hình 3. 14. Ảnh TEM mẫu nón xuyên thiêu kết SPS sau miết lần 1 và miết lần 260
Hình 3. 15. Độ cứng tế vi của mẫu nón xuyên thiêu kết SPS và sau khi miết biến dạng tại các vị trí khác nhau61
Hình 3. 16. Hình ảnh mặt cắt lỗ xuyên của các loại nón xuyên khác nhau
Hình 3. 17. Mô hình di truyền cấu trúc hạt từ bộ đồng điện phân sang vật liệu đồng khối chế tạo từ bột đồng bằng phương pháp thiêu kết SPS64
Hình 3. 18. Mô hình biến dạng hạt thô: trước và sau biến dạng65
Hình 3. 19. Mô hình biến dạng hạt mịn và siêu mịn: trước và sau khi biến dạng65
Hình 4. 1. Bản vẽ của nón kim loại, lượng nổ lõm và bia thép sử dụng trong bài toán mô phỏng68
Hình 4. 2. Kết quả mô phỏng với mẫu nón Cu69
Hình 4. 3. Tốc độ đầu dòng của dòng kim loại với hàm lượng W khác nhau70

Hình 4. 4. Kết quả mô phỏng với mẫu nón composite Cu70W30	70
Hình 4. 5. Kết quả mô phỏng với mẫu nón composite Cu60W40	70
Hình 4. 6. Kết quả mô phỏng với mẫu nón composite Cu50W50	71
Hình 4. 7. Kết quả mô phỏng với mẫu nón composite Cu40W60	71
Hình 4. 8. Sự phụ thuộc chiều dài dòng kim loại L, chiều sâu đâm xuyên P và	
khối lượng riêng vào hàm lượng W	71
Hình 4. 9. Giản đồ nhiễu xạ tia X mẫu composite với hàm lượng W khác nhau sau khi thiêu kết SPS	73
Hình 4. 10. Ảnh SEM cấu trúc nón composite W-Cu với hàm lượng W khác nhau	74
Hình 4. 11. Phổ tán xạ năng lượng tia X và thành phần hóa học mẫu nón Cu70W30 sau khi thiêu kết SPS	74
Hình 4. 12. Phổ tán xạ năng lượng tia X và thành phần hóa học mẫu nón Cu60W40 sau khi thiêu kết SPS	75
Hình 4. 13. Phổ tán xạ năng lượng tia X và thành phần hóa học mẫu nón Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS	75
Hình 4. 14. Phổ tán xạ năng lượng tia X và thành phần hóa học mẫu nón Cu40W60 sau khi thiêu kết SPS	75
Hình 4. 15. Khối lượng riêng và tỷ trong tương đối của mẫu nón composite CuW sau khi thiêu kết SPS với hàm lượng W khác nhau	76
Hình 4. 16. Độ cứng Vickers của nón W-Cu với hàm lượng W khác nhau	77
Hình 4. 17. Ảnh hưởng của hàm lượng W đến khối lượng nón W-Cu và độ tăng khối lượng tương đối	77
Hình 4. 18. Mặt cắt dọc theo chiều sâu đâm xuyên bia thép 40Cr thử nghiệm với các nón CuW với hàm lượng W khác nhau	78
Hình 4. 19. So sánh chiều sâu xuyên giữa thử nghiệm thực tế và mô phỏng với các nón W-Cu với hàm lượng W khác nhau	79
Hình 4. 20. Sơ đồ chế tạo nón composite Cu50W50 cấu trúc siêu mịn	80
Hình 4. 21. Các mẫu nón Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS	80

Hình 4. 22. Vị trí lấy mẫu để quan sát cấu trúc của Cu sau khi thiêu kết và gia
công tạo cấu trúc siêu hạt81
Hình 4. 23. Ảnh quang học và ảnh SEM cấu trúc mẫu nón Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS
Hình 4. 24. Ảnh quang học cấu trúc mẫu nón composite Cu50W50 sau khi miết lần 1
Hình 4. 25. Ảnh SEM cấu trúc mẫu nón Cu50W50 sau khi miết lần 183
Hình 4. 26. Ảnh TEM cấu trúc tế vi khu vực bề mặt ngoài nón sau khi gia công miết lần 1
Hình 4. 27. Ảnh quang học cấu trúc mẫu nón Cu50W50 sau khi miết lần 285
Hình 4. 28. Ảnh SEM cấu trúc tế vi khu vực bề mặt ngoài nón sau khi miết lần 285
Hình 4. 29. Ảnh TEM cấu trúc tế vi khu vực bề mặt ngoài nón sau khi gia công miết lần 2
Hình 4. 30. Khối lượng riêng của nón Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS và sau khi kết hợp miết lần 1 và lần 287
Hình 4. 31. Độ cứng tế vi khu vực nền Cu của các nón Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS, miết lần 1 và miết lần 288
Hình 4. 32. Mô mình vết đâm đo độ cứng tế vi và vết đâm độ cứng tế vi trên thực tế
Hình 4. 33. Các nón composite Cu50W50 sau khi miết lần 290
Hình 4. 34. Mặt cắt dọc theo chiều sâu đâm xuyên của bia thép sau khi thử nổ90
Hình 4. 35. Ảnh SEM bề mặt gãy sau khi thử kéo mẫu Cu và Cu50W50 chế
tạo bằng phương pháp thiêu kết SPS kết hợp gia công miết92
Hình 4. 36. So sánh chiều sâu xuyên của các nón khác nhau:

xiii

MỞ ĐẦU

Thiết bị nổ lõm (shaped charge) là cơ cấu nổ, tập trung năng lượng của khối thuốc nổ hình lõm, làm biến dạng phễu lót đặt áp vào mặt lõm của khối thuốc nổ, tạo thành dòng kim loại ở trạng thái rắn, di chuyển với vận tốc cực cao, xuyên thủng các loại giáp thép, bê tông, đá... Thiết bị nổ lõm 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, nguyên lý nổ lõm với phễu lót kim loại được ứng dụng để chế tạo các loại đạn chống tăng thiết giáp khác nhau, cỡ từ 30 đến 150 mm như: đạn pháo, súng phóng lựu, các tên lửa chống tăng có điều khiển, các phần tử đạn chùm dùng cho bom không quân và đạn pháo phản lực bắn loạt. Hiệu ứng nổ lõm còn được sử dụng trong phần chiến đấu của các loại vũ khí cỡ lớn như: tên lửa hành trình chống tàu, ngư lôi, các loại mìn chống tàu ngầm ở độ sâu lớn, các loại mìn thả trên biển và trên sông.

Khả năng xuyên của thiết bị nổ lõm phụ thuộc vào nhiều thông số như kiểu thuốc nổ, hình dạng phễu lót (nón xuyên) và vật liệu làm nón hay công nghệ chế tạo. Trong đó, vật liệu làm nón xuyên đóng một vai trò rất quan trọng để tạo ra dòng vật liệu tốc độ cao xuyên phá mục tiêu. Vì vậy, mặc dù được phát hiện vào cuối thế kỷ 19 và được nghiên cứu ứng dụng từ đầu thế kỷ 20, nhưng đến nay vật liệu làm nón xuyên vẫn được các nhà khoa học, các phòng thí nghiệm trên thế giới quan tâm nghiên cứu. Bằng chứng là hàng năm vẫn có hàng chục công trình nghiên cứu về vật liệu nón xuyên được công bố trên các tạp chí quốc tế uy tín thuộc danh mục SCIE hoặc Scopus.

Tại Việt Nam, Bộ Quốc phòng đã triển khai nhiều đề tài, nhiệm vụ nghiên cứu, chế thử, sản xuất các loại đạn chống tăng [1], [2]. Nhiều sản phẩm đã được đưa vào trang bị cho Quân đội như: Đạn B41M, PG-9, đạn xuyên lõm 40 mm... Tuy nhiên, trong quá trình chế tạo vẫn còn một số hạn chế, tồn tại như: độ xuyên thép không ổn định và không bằng so với sản phẩm cùng loại của nước ngoài. Qua phân tích xác định, nguyên nhân chủ yếu vẫn ở khâu chế tạo nón xuyên. Vì vậy, nghiên cứu sinh lựa chọn là "Nghiên cứu chế tạo nón xuyên trong thiết bị nổ lõm bằng đồng kim loại và composite W-Cu có cấu trúc siêu mịn" với mục tiêu chế tạo được nón xuyên có khả năng xuyên lớn hơn, ứng dụng trong quốc phòng.

Đối tượng của luận án

- Vật liệu đồng kim loại và vật liệu composite đồng + vônfram,

- Nón xuyên chế tạo bằng đồng và vật liệu composite đồng + vônfram.

Mục tiêu của luận án

 Chế tạo và khảo sát được cấu trúc, tính chất của vật liệu đồng kim loại và composite W-Cu có cấu trúc siêu mịn.

- Chế tạo nón xuyên từ vật vật liệu đồng, composite W-Cu cấu trúc siêu mịn và thử nghiệm nổ lõm, đánh giá đặc tính xuyên của hai loại vật liệu trên.

Nội dung của luận án

- Nghiên cứu chế tạo nón xuyên bằng đồng kim loại theo 4 phương pháp gia công khác nhau: dập nguội, dập nguội kết hợp gia công miết, luyện kim bột thiêu kết bằng SPS, luyện kim bột thiêu kết bằng SPS sau đó gia công miết. Khảo sát tính chất đặc trưng, cấu trúc và đánh giá, so sánh khả năng xuyên của 4 loại nón xuyên chế tạo được thông qua thử nổ.

- Nghiên cứu chế tạo nón xuyên từ vật liệu composite đồng + vônfram bằng phương pháp luyện kim bột thiêu kết SPS, thiêu kết SPS sau đó gia công miết. Khảo sát tính chất đặc trưng, cấu trúc và đánh giá khả năng xuyên của 2 loại nón xuyên composite chế tạo được thông qua thử nổ.

Phương pháp nghiên cứu

Một số phương pháp nghiên cứu được nghiên cứu sinh sử dụng trong quá trình thực hiện luận án là: phương pháp tổng hợp, phân tích, đánh giá; phương pháp thực nghiệm và xử lý kết quả thực nghiệm; phương pháp mô phỏng...

Trong đó, đối với các phương pháp thực nghiệm, luận án đã sử dụng các kỹ thuật chế tạo vật liệu tiên tiến hiện nay như thiêu kết xung điện plasma, miết cơ học... để chế tạo nón xuyên. Để nghiên cứu tính chất đặc trưng của vật liệu, luận án đã sử dụng các kỹ thuật như HR-TEM, SEM, XRD, hiển vi quang học, xác định độ bền kéo, độ cứng, khối lượng riêng. Đặc biệt, luận án đã sử dụng phương pháp nổ lõm để xác định khả năng xuyên của nón xuyên trên bia thép.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của luận án

- Ý nghĩa khoa học:

Luận án đã làm rõ được ảnh hưởng của các phương pháp chế tạo nón xuyên (dập nguội, dập nguội kết hợp với gia công miết, thiêu kết bột đồng bằng xung điện plasma SPS, thiêu kết SPS kết hợp với gia công miết) đến chiều sâu xuyên nổ lõm đối với nón xuyên chế tạo từ đồng kim loại. Luận án còn làm rõ được ảnh hưởng của kích thước hạt cấu trúc nón xuyên và giải thích được cơ chế tăng chiều sâu xuyên khi kích thước hạt cấu trúc của nón xuyên giảm xuống mức siêu mịn.

Luận án cũng làm rõ được ảnh hưởng của tỷ lệ W/Cu, kích thước hạt cấu trúc pha nền đồng của nón xuyên đến chiều sâu xuyên nổ lõm đối với nón xuyên chế tạo bằng composite W-Cu.

- Về mặt thực tiễn:

Các kết quả của luận án có thể làm cơ sở để phát triển công nghệ chế tạo nón xuyên nổ lõm với chiều sâu xuyên sâu hơn so với nón xuyên chế tạo bằng phương pháp truyền thống hiện nay.

Bố cục luận án

Ngoài phần mở đầu, kết luận và tài liệu tham khảo, nội dung của luận án được trình bày trong 4 Chương gồm:

- Chương 1: Tổng quan

- Chương 2: Các phương pháp chế tạo vật liệu và nghiên cứu.
- Chương 3: Chế tạo, tính chất và đặc tính xuyên nổ lõm của đồng kim loại cấu trúc siêu mịn
- Chương 4: Chế tạo, tính chất và đặc tính xuyên nổ lõm của composite W-Cu cấu trúc siêu mịn

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN

1.1. Lịch sử hình thành và phát triển của nổ lõm

Như đã trình bày ở phần mở đầu, thiết bị nổ lõm được định nghĩa là một khối thuốc nổ hình trụ, lõm ở đáy phía đối diện với ngòi nổ [3]. Nếu phần lõm của khối thuốc nổ không chứa lớp lót, nó được gọi là nổ lõm rỗng. Nếu phần lõm chứa một lớp lót được làm từ kim loại, hợp kim, thủy tinh, gốm, gỗ hoặc vật liệu khác, thiết bị được gọi là thiết bị nổ lõm định hình (sau đây gọi tắt là thiết bị nổ lõm). Hình dạng của lớp lót có thể là hình phễu (nón), hình chỏm cầu, hình parabol hoặc bất kỳ hình cung nào.

Lịch sử phát minh và phát triển thiết bị nổ lõm chỉ bắt đầu sau khi Alfred Nobel phát minh ra thuốc nổ vào năm 1867. Những thí nghiệm của Charles Munroe, một kỹ sư của Hải quân Hoa Kỳ vào năm 1888 đã đồng phát hiện ra hiện tượng nổ lõm. Ông dùng một khối thuốc nổ hình trụ, mặt đối diện với ngòi nổ ông khắc 3 chữ cái USN (United States Navy) [4]. Khi cho nổ khối thuốc nổ trên bề mặt thếp, ông nhận thấy trên bề mặt thếp in hình chữ USN từ khối thuốc nổ. Sau đó ông còn quan sát thấy, nếu khối thuốc nổ hình trụ được khoết lõm ở đầu phía đối diện ngòi nổ, chiều sâu xuyên vào thếp tăng lên. Từ đó ông đưa ra kết luận, thếp bị xuyên do khối thuốc nổ đã tập trung năng lượng theo hướng lõm của khối thuốc nổ. Một thí nghiệm được coi là dạng nổ lõm có phễu lót đầu tiên cũng do Munroe thực hiện. Ông lấy một vỏ đồ hộp, bỏ một đáy, ốp thuốc nổ xung quanh đồ hộp và phía trên đồ hộp. Đáy rỗng được hướng xuống phía dưới có đặt tấm thếp. Khi nổ, thiết bị tạo ra lỗ xuyên trên tấp thếp lót.

Sau đó, ngay từ đầu những năm 1910s các thiết bị nổ lõm tương tự được đăng ký sáng chế tại Đức, Vương quốc Anh. Trong đó đáng chú ý là tại Đức, năm 1914 Neumann đã tạo ra thiết bị nổ lõm không phễu lót, có thể xuyên sâu vào thép [5]. Từ đó, hiệu ứng Munroe được công nhận tại Hoa Kỳ và Vương quốc Anh như là nguyên lý của nổ lõm, trong khi tại Đức người ta cho rằng, nổ lõm dựa trên hiệu ứng Neumann. Dựa trên nguyên lý này, năm 1941 tại Đức đã tạo ra thiết bị nổ lõm tương đối hoàn chỉnh với khối thuốc nổ hình trụ, lõm ở đáy đối diện với ngòi nổ, được lót bằng phễu lót chế tạo từ thép, đặt ở một khoảng cách nhất đinh so với bia thép [6]. Thuốc nổ có thành phần 50% là thuốc nổ TNT và 50% là thuốc nổ cyclonite. Khi kích nổ, thiết bị đã tạo ra lỗ xuyên vào thép. Bằng thực nghiệm, đã tìm ra sự phụ thuộc của chiều sâu xuyên với khoảng cách từ mặt đáy phễu lót tới bia thép.

Tiếp theo việc phát hiện ra hiệu ứng nổ lõm, rất nhiều nghiên cứu đã được thực hiện để phát triển và hoàn thiện nhằm đưa vào ứng dụng. Tại Vương quốc Anh, nhiều nhà nghiên cứu đã đóng góp vào sự phát triển của thiết bị nổ lõm như Evans, Ubbelohde, Taylor, Tuck, Mott, Hill, Pack, và nhiều người khác [7]. Tại Hoa Kỳ là Watson, Wood, Eichelberger... đã có những đóng góp to lớn vào sự phát triển của nổ lõm. Trong đó, Wood từ Trường Đại học Johns Hopkins là người đầu tiên đã miêu tả sự hình thành dòng xuyên từ sự biến dạng của phễu lót [6].

Sự phát triển các loại vũ khí dựa trên hiệu ứng nổ lõm được đẩy mạnh trong thời gian trước và trong chiến tranh thế giới thứ II. Tại Đức, Franz Rudolf Thomanek đã nghiên cứu nhằm ứng dụng chế tạo vũ khí ngay từ năm 1938 [6]. Ông cũng là người đầu tiên đưa ra ý tưởng chế tạo vũ khí chống tăng cá nhân dựa trên hiệu ứng nổ lõm. Tại Hoa Kỳ, Mohaupt đã nghiên cứu hiệu ứng nổ lõm và đăng ký nhiều sáng chế về vấn đề này từ những năm 1930 và được các cơ quan sáng chế của Thụy Sĩ, Vương quốc Anh công nhận. Thấy được tiềm năng của nổ lõm, Vương quốc Anh đã mua bản quyền, chế tạo vũ khí dựa trên hiệu ứng này. Năm 1940, Vương quốc Anh đã trang bị vũ khí chống tăng đầu tiên trên thế giới với tên gọi mìn chống tăng 68 [8]. Tiếp theo, Hoa Kỳ cũng nhanh chóng mua bản quyền từ Mohaupt và chế tạo các loại vũ khí chống tăng 75-100 mm vào năm 1941 [6]. Sau đó, các loại mìn chống tăng được cải tiến, lấp thêm cơ cấu phóng để người lính có thể bắn đi, trở thành loại súng chống tăng với tên gọi Bazooka huyền thoại. Loại súng này được người Anh sử dụng lần đầu tiên vào năm 1941 tại Bắc Phi.

Những nghiên cứu về nổ lõm ở Đức được đẩy mạnh vào cuối chiến tranh thế giới II. Tại Đức đã phát triển ra phương pháp chụp X quang siêu nhanh, bắt được sự hình thành dòng kim loại từ sự biến dạng của phễu lót. Ngoài việc nghiên cứu cải tiến thuốc nổ, các nhà khoa học Đức đi sâu nghiên cứu về vật liệu phễu lót bằng thép, sắt thiêu kết, đồng, nhôm và kẽm. Các nghiên cứu này đã đi đến kết luận, kim loại đồng cho chiều sâu xuyên lớn nhất. Ngoài việc nghiên cứu phát triển đạn chống tăng theo nguyên lý nổ lõm, người Đức còn phát triển bom nổ lõm để tiêu diệt tàu chiến và mục tiêu trên đất liền.

Tại Hoa Kỳ, việc nghiên cứu phát triển đạn nổ lõm được tiếp tục bởi các công ty DuPont, Hunter, Dobbins, Hercules Powder, Atlas Powder, và Corning Glass. Kết quả là các loại súng chống tăng ký hiệu M1, M2A3, M3, M3A ra đời vào năm 1942. Bằng việc nghiên cứu sự biến dạng của phễu lót nhờ phương pháp chụp X quang, các nhà khoa học Hoa Kỳ đã có những hiểu biết sâu về nguyên lý nổ lõm, nguyên lý hình thành dòng xuyên [6].

Lý thuyết về nổ lõm được tiếp tục phát triển nhanh chóng trong những năm 1950s, đặc biệt trong chiến tranh Triều Tiên [6]. Những năm 1960s, các kỹ thuật mới phục vụ nghiên cứu quá trình nổ lõm được phát triển và hoàn thiện như: kỹ thuật ghi hình tốc độ cao, kỹ thuật chụp X quang tốc độ cao...[6]. Chính nhờ những kỹ thuật này đã cho phép hiểu tương đối rõ được bản chất của nổ lõm, sự biến dạng của phễu lót. Vì vậy, đã nâng cao được chiều sâu xuyên, phát triển được nhiều loại đạn có khả năng xuyên sâu hơn.

Tại Nga, giáo sư Sukharevsky là người đầu tiên nghiên cứu về hiện tượng nổ lõm ngay từ những năm 1925–1926 [6]. Ông đã chỉ ra tính hợp lí việc sử dụng nổ lõm là phương tiện phá nổ hiệu quả và thiết lập mối quan hệ giữa tác dụng xuyên của liều xuyên lõm không có phễu lót vào hình dạng của hốc nổ lõm như một yếu tố cơ bản quyết định tác dụng phá hủy. Trong các công trình của Sukharevsky, lần đầu tiên đã đưa ra những tiên đoán về bản chất vật lý của hiệu ứng xuyên lõm, chúng sau này là cơ sở lý thuyết trong các công trình của A. Beliaev khi nghiên cứu hiệu ứng va chạm trong không gian của các sóng xung kích và của G. I. Pokrop, người đã thiết lập những công thức giải tích cơ bản xác định ra mối tương giao giữa các thông số của các dòng khí xuyên lõm [9].

Các kết quả nghiên cứu thực nghiệm và lý thuyết hiện tượng xuyên lõm cho phép chế tạo ra các mẫu trang bị kỹ thuật quân sự trong những năm chiến tranh Vệ quốc vĩ đại. Các nhà khoa học xô viết M. A. Lavrenchep, G. I. Pokrovxki là những nhà quán quân trong việc xây dựng nên lý thuyết khí động lực học nổ lõm. Vào năm 1942, đã xuất hiện đạn pháo xuyên lõm 76,2 mm sản xuất trong nước, còn năm 1944 đã đưa vào trang bị lựu đạn chống tăng xuyên lõm uy lực mạnh (RPG - 6) (độ xuyên thép 100 mm) và đạn pháo chống tăng xuyên lõm 122 mm (độ xuyên thếp 100 - 120 mm) [10].

Ngày nay, đạn lõm được sử dụng rộng rãi trong các súng và tên lửa chống tăng, cho phép xuyên thép với chiều dày lên tới hơn 1000 mm. Nguyên lý nổ lõm còn được ứng dụng trong ngư lôi chống tàu ngầm, tàu mặt nước, trong đạn chống máy bay, tên lửa...

Tại Việt Nam, nguyên lý nổ lõm được GS.VS. Trần Đại Nghĩa ứng dụng để chế tạo súng Bazooka Việt Nam năm 1947, tức là chỉ sau 6 năm khi loại súng này được Anh, Hoa Kỳ phát triển. Nhờ đó, Quân đội Nhân dân Việt Nam đã có loại vũ khí hiện đại để đánh thắng thực dân Pháp. Sau này, chúng ta còn sản xuất được súng và đạn chống tăng B40, B41 nổi tiếng trong thời kỳ chống Mỹ.

1.2. Cấu tạo, nguyên lý hoạt động của thiết bị nổ lõm

1.2.1. Cấu tạo thiết bị nổ lõm

Hình 1.1 là sơ đồ cấu tạo một thiết bị nổ lõm, bao gồm 4 chi tiết chính: (1) nón xuyên, (2) thuốc nổ, (3) vỏ và (4) kíp nổ. Trong đó, nón xuyên có nhiều hình dạng khác nhau, tùy thuộc vào mục đích như: hình nón (để xuyên thép), hình chỏm cầu (tạo lỗ rộng) hoặc hình loa kèn (tạo ống). Tại Việt Nam, thiết bị nổ lõm được ứng dụng chủ yếu trong quân sự làm đạn chống tăng B40 và B41. Nón xuyên của các loại đạn này có hình nón để tạo hiệu ứng xuyên sâu vào thép.



Hình 1. 1. Sơ đồ nguyên lý cấu tạo thiết bị nổ lõm1.2.2. Nguyên lý hoạt động

1.2.2.1. Sự hình thành dòng kim loại khi nổ lõm

Khi kích hoạt thiết bị nổ lõm, sóng nổ sẽ lan truyền trong thuốc nổ qua thời gian t_1 , t_2 , t_3 ...đến các mặt cắt tương ứng I, II, III ... với vận tốc có thể đạt tới từ 5,0 – 8,0 km/giây, tùy thuộc loại thuốc nổ [11]. Càng xa kíp nổ, mặt sóng nổ càng được nắn thẳng và trở nên phẳng hơn (hình 1.2).



Hình 1. 2. Sơ đồ lan truyền sóng nổ trong thiết bị nổ lõm [6]

1- Kíp nổ; 2- Thuốc nổ; 3- Nón xuyên kim loại.

Sóng nổ tạo áp lực với độ lớn trong khoảng từ 20 đến 2000 GPa lên bề mặt nón xuyên, được coi như áp lực của một chất lỏng không dãn nở, không nhớt lên nón xuyên [12]. Áp lực này làm cho nón xuyên bị biến dạng với vận tốc khoảng từ 5km.s⁻¹ đến 15km.s⁻¹ [3]. Dưới tác động của sóng nổ, nón xuyên bắt đầu bị biến dạng từ đỉnh nón hướng đến đáy nón xuyên, hình thành dòng kim loại xuyên. Hình 1.3 minh họa sự biến dạng của nón xuyên và sự hình thành dòng xuyên khi thiết bị nổ lõm được kích nổ.



xuyên đã có dạng hình kiếm

Hình 1. 3. Sự biến dạng của nón xuyên và quá trình hình thành dòng xuyên [3].

Sư hình thành dòng xuyên khi được kích nổ là một quá trình phức tạp, diễn ra với vân tốc siêu nhanh. Để đơn giản hóa, chúng ta có thể hiểu sau khoảng 9-10 micro giây, nón xuyên bi biến dang thành hình dang như thanh kiếm, với lưỡi kiếm chiếm khoảng 20% trong lượng nón xuyên, phần còn lại của nón xuyên hình thành nên chuôi kiếm. Tốc đô chuyển đông của đỉnh dòng xuyên phu thuộc vào hình dang, kích thước, kim loại làm nón xuyên, chất lương thuốc nổ và một loạt các yếu tố khác. Do tốc đô nén ép các phần của nón xuyên khác nhau, càng về sau càng nhỏ đi do lương thuốc nổ ít đi, nên tốc đô của đỉnh dòng kim loại (lưỡi kiếm) sẽ cao hơn tốc độ dịch chuyển của lớp kim loại phía ngoài nón xuyên, tạo nên gradient tốc độ của dòng xuyên. Theo Shekhar [13] tốc độ của phần đầu có thể đạt 10 km/giây, tốc độ phần sau khoảng 1,0 km/giây. Do có gradien tốc độ của đầu dòng xuyên với phần cán của dòng xuyên, nên dòng xuyên trên đường bay tự kéo dài ra. Trong khoảng thời gian 25÷30 micro giây dòng xuyên có thể kéo dài đến giới hạn. Khi tiếp tục kéo dài, đô dẻo của kim loại sẽ bị vượt quá và luồng xuyên bị phá huỷ thành các phần riêng biêt, tao nên sư đứt quãng của dòng. Như vây, trong quá trình hình thành và bắn ra, dòng xuyên luôn được vuốt dài [14]. Quá trình này kết thúc khi đô dẻo của kim loại không còn đáp ứng khả năng vuốt dài dòng và bi đứt quãng như trong hình 1.4.



Hình 1. 4. Các giai đoạn hình thành và chuyển động của dòng xuyên [14]
a) Sự bắt đầu hình thành dòng khi nén ép nón xuyên; b) Sự dãn dòng do tồn tại gradien vận tốc; c) Sự đứt dòng thành các đoạn ở một thời điểm nhất định.

1.2.2.2. Quá trình xuyên vào mục tiêu

Dòng xuyên kim loại có vận tốc rất lớn (5 ÷ 10 km/giây), vì vậy có năng lượng rất cao, tạo ra một áp lực đến hàng triệu atmotphe khi tác động lên một diện tích hẹp của bia thép. Vì vậy, khi đi tới bia, dòng xuyên tạo nên một vùng năng lượng tập trung cực kỳ lớn xung quanh điểm tác động. Các lực tác động này vượt xa so với lực liên kết giữa các nguyên tử của bia thép, làm cho độ bền bia thép trở nên không đáng kể, làm vỡ vụn vật liệu bia thép quanh vùng tác động và đẩy các hạt bụi thép này về phía sau, tạo lỗ rõng xuyên vào bia. Khi đó độ bền của bia thép coi như không ảnh hưởng đến khả năng xuyên, chỉ có khối lượng riêng là ảnh hưởng [15, 16].

Khi phần đầu dòng xuyên va chạm vào bia, dòng xuyên và bia cùng bị phá huỷ, một phần dòng xuyên và bia bị dồn lại, lỗ hổng mở rộng ra, đường kính của lỗ vượt quá đường kính của dòng. Do các phần tử của dòng va chạm và chuyển động tới bia thép ngày càng nhiều nên lỗ xuyên sâu dần. Dòng xuyên vào bia thép càng sâu thì số lượng kim loại bắn ra càng ít. Các phần tử kim loại dòng và bia thép lưu lại càng nhiều ở xung quanh thành lỗ. Cuối cùng, kim loại không thể văng ra được và bị nén ép trong lỗ, do đó đường kính của lỗ nhỏ dần khi lỗ càng sâu (hình 1.5).



Hình 1. 5. Sơ đồ tác dụng giữa dòng xuyên với bia [11]
1-Dòng xuyên; 2- Thuốc nổ; 3- Nón xuyên; 4- Kim loại dòng xuyên và thành thép bị bắn ra; 5- bia thép.

Thực chất sự xâm nhập của dòng kim loại tập trung vào bia thép xảy ra theo sơ đồ "chảy vào", có nghĩa là quá trình xâm nhập của dòng tập trung vào bia thép tương tự như sự tương tác của các chất lỏng, các tác động xảy ra theo các quy luật thuỷ động. Bia thép bị phá huỷ bởi sự bắn phá liên tục trong điều kiện áp suất cực kỳ cao của dòng xuyên có năng lượng cực kỳ lớn. Với năng lượng và áp suất cao, vận tốc chuyển động lớn, dòng xuyên làm bắn vỡ các phần tử kim loại tạo thành một dòng kim loại (bao gồm các mảnh kim loại rất nhỏ). Khoảng 10÷20% năng lượng của dòng xuyên dùng để phá vỡ liên kết kim loại, phần còn lại để thắng lực cản quán tính của các vụn kim loại [11].

Thực tế có thể coi sự phá huỷ bia thép của dòng tập trung là sự bắn phá của một dòng chất lỏng lý tưởng không chịu nén cực kỳ mạnh vào một chất lỏng lý tưởng sột sệt.

Trước đây, khi quan sát bề mặt lỗ xuyên, một số ý kiến cho rằng hiện tượng xuyên thép của nổ lõm là quá trình tập trung nhiệt lượng của thuốc nổ rồi làm nóng chảy bản thép, đây là quan điểm sai lầm. Các thiết bị đo đạc hiện đại đã cho phép đo nhiệt độ của dòng xuyên cho thấy, nhiệt độ tại đỉnh dòng xuyên khoảng 600÷900^oC, nhiệt độ tại chuôi dòng từ 300÷500^oC, trong khi nhiệt độ nóng chảy của bia thép là 1530 °C [17]. Mặt khác thời gian tác dụng vào bia thép cực kỳ ngắn. Với điều kiện như vậy, dù cho dòng xuyên có nhiệt độ rất cao cũng không thể làm nóng chảy và phá vỡ mối liên kết phân tử kim loại của bia thép.

1.3. Các yếu tố ảnh hưởng đến tính năng của thiết bị nổ lõm

Tính năng quan trọng nhất của thiết bị nổ lõm là khả năng xuyên sâu của thiết bị. Có rất nhiều yếu tố ảnh hưởng đến chiều sâu xuyên, việc nghiên cứu chúng có ý nghĩa hết sức cần thiết, làm cơ sở để thiết kế và chế tạo các thiết bị có uy lực lớn trong điều kiện nhất định cho phép. Ở đây, ta thấy các yếu tố về kết cấu là quan trọng nhất vì có thể điều chỉnh uy lực thông qua các yếu tố này. Vì vậy, trong phần tổng quan của luận án sẽ trình bày các yếu tố về kết cấu đạn ảnh hưởng đến uy lực xuyên lõm. Xét một cách định tính, từ sự hình thành và quá trình xuyên vào mục tiêu của dòng xuyên, chiều sâu xuyên phụ thuộc vào chiều dài, vận tốc và mật độ càng cao thì khả năng xuyên sâu vào thép càng lớn. Tất cả các yếu tố ảnh hưởng đến ba đại lượng này đều có ảnh hưởng đến uy lực xuyên lõm. Với cách suy luận như vậy, các yếu tố về kết cấu ảnn hưởng đến khả năng xuyên của đạn xuyên lõm sẽ được đề cập và xem xét.

1.3.1. Ảnh hưởng của các thông số nón xuyên

Hình dạng nón xuyên:

Nón xuyên thường có dạng hình nón, hình loa kèn và hình chỏm cầu được thể hiện như hình 1.6. (trong đó: h là chiều cao nón xuyên; α là góc mở; Φ d là đường kính miệng nón; α_m là góc mở ở miệng nón; α_d là góc mở ở đỉnh nón).



Hình 1. 6. Hình dạng nón xuyên và định nghĩa góc mở

Trong thực tế thường dùng nón xuyên có dạng hình nón hoặc hình loa kèn. Do góc mở thay đổi nhiều hơn hẳn so với các loại nón khác, nên nón hình loa kèn đảm bảo độ chênh vận tốc giữa đỉnh và đuôi dòng lớn hơn, dẫn đến độ vuốt dài dòng lớn và chiều dài dòng xuyên lớn hơn.

Trong cùng một điều kiện về chiều cao, bề dày, bán kính thiết diện đỉnh, thiết diện miệng nón và vật liệu như nhau, sự thay đổi góc mở càng lớn sẽ dẫn đến:

 Vận tốc đỉnh dòng và đuôi dòng càng lệch nhau, do đó khả năng vuốt dài dòng càng lớn, dòng xuyên càng dài;

 Khối lượng nón càng lớn, khối lượng dòng càng lớn, dòng càng bền và khả năng vuốt dài dòng càng tăng.

Như vậy, việc thay đổi góc mở càng lớn làm cho chiều dài dòng thu được càng lớn và do đó uy lực xuyên càng lớn. Nón xuyên hình loa kèn có góc mở thay đổi nhiều hơn hẳn so với các loại nón khác, vì vậy, trong cùng điều kiện như đã đưa ra, nón xuyên loa kèn cho uy lực xuyên lớn nhất, tiếp đến là nón côn và nón xuyên hình chỏm cầu. Tuy nhiên, thực nghiệm cho thấy, nón xuyên loa kèn chỉ chiếm ưu thế hơn các loại nón xuyên khác khi có tỷ số h/d_m lớn hơn 1,3 (với h là chiều cao nón, d_m là đường kính miệng nón) [17].

Trong thực tế, nón xuyên hình nón thường được sử dụng vì công nghệ sản xuất đơn giản, khả năng xuyên của nó không kém nhiều so với nón xuyên hình loa kèn và đặc biệt không bị hạn chế bởi các điều kiện trên.

Góc mở:

Khi giảm góc mở α , thì:

 Vận tốc dòng tăng, đường sinh nón xuyên tăng (đối với nón cùng chiều cao) dẫn đến chiều dài dòng tăng.

- Giảm khối lượng kim loại tạo dòng, giảm khả năng vuốt dài dòng, dẫn đến giảm độ bền dòng.

Thực tế tồn tại một góc mở tối ưu và với góc mở này độ xuyên sâu lớn nhất (hình 1.7).



Hình 1. 7. Mối quan hệ giữa chiều sâu xuyên với góc mở [17].

Đối với đạn xuyên lõm quay thì $2\alpha = 50...60^{\circ}$, còn đối với đạn lõm ổn định bằng cánh $2\alpha = 24... 30^{\circ}$. Ta thấy đạn ổn định bằng cánh có góc mở nón xuyên tối ru nhỏ hơn so với đạn quay vì dòng xuyên của chúng không chịu tác động của chuyển động quay nên chúng bền hơn.

Độ dày:

Khi tăng chiều dày nón, ta thấy:

- Tăng khối lượng nón và do đó tăng khối lượng và độ bền dòng,
- Giảm vận tốc nén ép nón và vận tốc dòng.

Thực tế cho thấy tồn tại độ dày tối ưu, với độ dày này của nón dòng xuyên sẽ có khả năng xuyên sâu lớn nhất (hình 1.8). Hiện nay trong trang bị thường dùng các nón xuyên có bề dày thay đổi, bề dày thành nón tăng dần từ đỉnh đến miệng nón.

Để tăng khả năng xuyên cho dòng xuyên, hiện nay người ta thường giảm góc mở [18]. Điều này dẫn đến tăng khối lượng thuốc nổ, tăng vận tốc dòng nhưng lại giảm khối lượng dòng và giảm độ bền dòng, vì thế hiệu quả tăng khả năng xuyên không được nhiều. Để khắc phục hiện tượng giảm độ bền, người ta tìm cách đưa thêm một lượng kim loại vào dòng. Như vậy với bề dày tăng dần từ đỉnh đến miệng nón ta thấy sau mỗi phân tố nón xuyên, dòng xuyên được bổ sung thêm một khối lượng kim loại khắc phục hiện tượng giảm độ bền dòng do tăng vận tốc và do được bổ sung kim loại vào chuôi dòng nên độ chênh lệch vận tốc giữa đỉnh và đuôi dòng tăng lên, tăng độ vuốt dài dòng và cuối cùng tăng khả năng xuyên của dòng.





Đặc tính cơ học của vật liệu ảnh hưởng đến dòng xuyên và khả năng xuyên như sau:

 Độ dẻo: vật liệu càng dẻo thì khả năng vuốt dài dòng càng lớn, dòng xuyên càng dài, khả năng xuyên của dòng càng lớn.

- Mật độ: vật liệu có mật độ càng cao thì khả năng xuyên sâu của dòng càng lớn.

- Độ bền: khi bắn, thông thường đạn chịu lực một lực quán tính trục rất lớn, vì thế rất có thể các chi tiết bị biến dạng không bảo toàn được hình dạng kết cấu theo yêu cầu. Do đó, nón xuyên trong các loại đạn pháo không làm bằng vật liệu chì (Pb), mặc dù chì có khối lượng riêng và độ dẻo lớn hơn nhiều so với vật liệu đồng và thép, nhưng độ bền thấp, dễ bị biến dạng làm thay đổi hình dạng, kết cấu nón xuyên.

1.3.2. Ảnh hưởng của thuốc nổ

Tốc độ nổ, mật độ, kích thước và hình dạng khối thuốc có ảnh hưởng đến tác dụng xuyên của dòng [18]. Khi khối thuốc nổ có tốc độ nổ lớn, mật độ cao thì vận tốc nén ép nón tăng, dẫn đến vận tốc dòng tăng và tăng khả năng xuyên thép của dòng. Do đó, để tăng khả năng xuyên của dòng thường sử dụng các loại thuốc nổ có tốc độ nổ lớn và khả năng nén ép cao như: hỗn hợp TNT với hécxôgen (TΓ), hécxôgen thuần hoá (A-IX-1), ốctôgen thuần hoá.

Các kích thước đường kính và chiều dài khối thuốc ảnh hưởng đến khối lượng thuốc nổ tích cực và do đó ảnh hưởng đến tốc độ nén ép, tốc độ dòng xuyên. Tăng đường kính khối thuốc thì khối lượng thuốc nổ tích cực tăng lên. Tuy nhiên, nếu tăng quá nhiều sẽ làm giảm độ vuốt dài dòng và trong điều kiện tiêu cự khối thuốc không đổi thì dòng xuyên sẽ không kịp dãn dài và tác dụng dòng xuyên sẽ giảm. Chiều dài khối thuốc phải bảo đảm chiều dài hiệu dụng lớn nhất và thường gấp 2,5 đến 3,0 lần đường kính khối thuốc.

1.3.3. Ảnh hưởng của cấu trúc thiết bị nổ lõm

Các đặc tính kết cấu của thiết bị lõm ảnh hưởng đến tác dụng xuyên thường là: hình dáng lòng đạn, tấm chắn sóng.

Hình dáng lòng đạn.

Hình dáng lòng đạn ảnh hưởng trực tiếp đến hình dạng ngoài, khối lượng thuốc nổ và tốc độ nén ép nón xuyên. Hiện nay, người ta thường thiết kế lòng đạn có dạng trụ, trụ - côn và côn. Lòng đạn hình trụ có khả năng chứa nhiều thuốc nổ vì thế khối lượng, vận tốc nén ép nón tăng và cuối cùng tăng khả năng xuyên thép. Lòng đạn hình trụ - côn và côn so với lòng đạn hình trụ có khả năng chứa ít thuốc nổ hơn do vậy khả ăng xuyên thép của dòng xuyên thấp hơn. Thực tế cho thấy khả năng xuyên của dòng xuyên trong trường hợp lòng đạn hình trụ-côn hoặc côn giảm không nhiều (<11%) so với trường hợp lòng đạn hình trụ, nhưng bù lại nó làm tăng hiệu quả sử dụng thuốc nổ (tăng tỷ số giữa thuốc nổ tích cực với thuốc nổ toàn phần), giảm được khối lượng thuốc nổ và giảm khối lượng bộ phận lõm. Hình 1.9



Hình 1. 9. Sơ đồ tính toán thuốc nổ tích cực [18].

Phần côn phía sau tuy có làm giảm khối lượng thuốc nổ và làm giảm vận tốc nén ép nón xuyên, giảm khả năng xuyên của dòng nhưng tính chung thì tỷ số khối lượng thuốc nổ tích cực với khối lượng thuốc nổ toàn phần tăng hơn và hiệu quả sử dụng thuốc nổ tăng. Khối thuốc nổ tích cực là lượng thuốc nổ sau khi được kích nổ toàn bộ uy lực của nó (năng lượng, sản phẩm nổ...) đều tác dụng trực tiếp lên phễu lót, tạo nên năng lượng nén ép nón để hình thành dòng xuyên.

Tấm chắn sóng

Để làm phẳng và cân bằng hướng tác dụng của sóng xung kích khi nổ trong khối thuốc nổ lõm với mục đích tăng khối lượng thuốc nổ tích cực, người ta dùng tấm chắn sóng (hình 1.10).

Thiết bị nổ lõm có tấm chắn sóng sẽ tạo ra dòng xuyên có khả năng xuyên lớn hơn hẳn các thiết bị nổ lõm cùng loại. Ưu thế của tấm chắn sóng rõ rệt nhất chỉ khi khoảng cách giữa tấm chắn sóng với điểm kích nổ không nhỏ hơn 5mm, bề dày tấm chắn sóng không nhỏ hơn 20mm và bán kính tấm chắn sóng phù hợp với khoẳng cách giữa tấm chắn sóng với đỉnh nón và góc mở [18]. Ngoài những tác dụng trên, tấm chắn sóng còn cho phép giảm độ dài và khối lượng khối thuốc nổ. Tấm chắn sóng thường làm từ nhựa tổng hợp hoặc các chất khác phù hợp với môi trường thuốc nổ.



Hình 1. 10. Ånh hưởng của tấm chắn sóng đến hướng lan truyền sóng nổ trong liều thuốc nổ lõm [18].

Từ hình 1.10 cho thấy, khi có tấm chắn sóng (hình 1.10b và 1.10c), hướng lan truyền của sóng nổ trong khối thuốc nổ tới bề mặt của nón có phương gần với pháp tuyến bề mặt của nón xuyên, do đó khả năng nén ép của sản phẩm nổ lên nón xuyên tốt hơn hẳn so với trường hợp không có tấm chắn sóng (hình 1.10a).

1.3.4. Ảnh hưởng của tiêu cự nổ

Để đảm bảo hiệu quả tác dụng lớn nhất của dòng xuyên khi đạn nổ ổn định và hoàn toàn, thì khoảng cách từ miệng nón đến bản thép (đích) phải bảo đảm khoảng cách có lợi nhất (tiêu cự nổ). Trong điều kiện bắn khoảng cách đó phụ thuộc vào kết cấu đầu đạn (công nghệ lắp ghép bộ phận lõm trong lòng đạn), khả năng chịu tải va đập (độ bền) của thân vỏ đầu đạn và thời gian tác dụng của hệ thống kích nổ.

Tiêu cự nổ.

Khoảng cách từ miệng nón đến điểm mà dòng xuyên hình thành hoàn toàn được gọi là khoảng cách tối ưu hay là tiêu cự nổ. Nếu khoảng cách từ miệng nón đến bản thép khi xuyên lớn hơn tiêu cự nổ, thì dòng xuyên bị kéo dài quá giới hạn và có thể bị đứt. Ngược lại, nếu nhỏ hơn tiêu cự nổ thì dòng xuyên chưa hình thành hoàn toàn, chưa được kéo dài tới độ dài tối ưu, nên cả hai trường hợp này tác dụng của dòng xuyên đều giảm. Hiện nay, chưa có phương pháp tính toán để xác định tiêu cự nổ một cách chính xác và đầy đủ nhất. Tiêu cự nổ được xác định gần đúng bằng công thức thực nghiệm [18]:

$$F \approx 0.5h + 0.9d \tag{1.1}$$

trong đó: h- chiều cao của nón xuyên; d - đường kính ngoài nón xuyên;

Theo tiêu cự nổ người ta xác định độ dài phần mũi đạn cần thiết H theo biểu thức:

$$H = F + v_c t \tag{1.2}$$

trong đó: F – tiêu cự nổ; v_c - vận tốc chạm của đầu đạn vào bản thép; t - thời gian từ lúc đạn chạm bản thép đến lúc hình thành dòng xuyên

Bề dày và độ bền thân vỏ đầu đạn

Thân vỏ đầu đạn phải đủ bền để tránh bị phá hủy và biến dạng lớn khi va chạm vào bản thép, bảo đảm tiêu cự trước khi nén ép nón xuyên, đồng thời bảo đảm đủ thời gian để sản phẩm nổ nén ép lên nón. Khi bề dày và độ bền thân vỏ đầu đạn tăng thì sẽ nâng cao hiệu quả sử dụng thuốc nổ, tăng xung lượng nổ nén ép lên nón và tăng được khả năng xuyên. Nhưng khi đường kính không đổi nếu tăng bề dày thân vỏ đầu đạn sẽ làm giảm đường kính khối thuốc nổ và khối lượng thuốc nổ làm giảm khả năng xuyên của dòng xuyên. Mặt khác, khi độ bền thân vỏ đầu đạn quá lớn thì năng lượng khối thuốc nổ phải tiêu hao lớn hơn để phá vỡ thân vỏ làm giảm năng lượng nén ép lên nón, giảm vận tốc nén ép nón và cuối cùng giảm tác dụng xuyên của dòng. Vì thế bề dày và độ bền thân vỏ đầu đạn được lựa chọn cho phù hợp với từng loại kết cấu bộ phận lõm.

1.3.5. Ảnh hưởng của dung sai gia công chi tiết và quá trình lắp ghép

Các chi tiết của thiết bị lõm phải được lắp ghép một cách hoàn chỉnh, đủ bền, đủ kín để sản phẩm nổ không lọt ra ngoài qua các khe hở làm giảm tác dụng nén ép lên phễu và phải được lắp đối xứng qua trục đạn đảm bảo năng lượng được tập trung một cách lớn nhất tại trục đạn. Nếu tồn tại khe hở giữa mặt tiếp xúc giữa thuốc nổ với nón xuyên thì sản phẩm nổ truyền lan qua đó sẽ bị hẫng, quá trình nén ép sẽ không đều, dòng xuyên sẽ không thẳng, dẫn đến tác dụng xuyên của dòng giảm. Do đó, việc gia công các chi tiết và công nghệ lắp ghép các bộ phận, đặc biệt là thiết bị lõm đòi hỏi độ chính xác rất cao.

Như vậy, từ các kết luận trên, chúng ta có thể biết được chiều hướng thay đổi uy lực xuyên của đầu đạn lõm khi thay đổi một yếu tố nào đó. Tuy nhiên, sự ảnh hưởng của các yếu tố đó là ít hay nhiều, mối tương quan cụ thể của chúng với chiều sâu xuyên như thế nào sẽ cần phải tiếp tục nghiên cứu.

1.4. Vật liệu nón xuyên

Có rất nhiều vật liệu khác nhau đã được thử nghiệm ứng dụng làm nón xuyên. Tuy nhiên đồng là vật liệu đầu tiên được sử dụng do có khối lượng riêng khá cao và khả năng biến dạng dẻo tốt [19]. Đã biết, khối lượng riêng và khả năng biến dạng dẻo của nón xuyên ảnh hưởng đến chiều sâu xuyên của thiết bị nổ lõm theo công thức sau [3, 20-22]:

$$P = L * (\lambda * \rho_{n \acute{o}n xuy \acute{e}n} / \rho_{bia})^{1/2}$$
(1.3)

trong đó: *P*: chiều sâu xuyên; *L*: chiều dài dòng xuyên (phụ thuộc vào khả năng biến dạng dẻo của vật liệu nón xuyên); λ : hệ số có giá trị từ 1 đến 2; ρ : khối lượng riêng.

Từ công thức (1.3) thấy rằng, chiều sâu xuyên của nón xuyên tỷ lệ thuận với chiều dài dòng xuyên L và tỷ lệ căn bậc hai với khối lượng riêng của vật liệu nón xuyên. Các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, với một lượng thuốc nổ nhất định, nếu tăng khối lượng riêng của nón xuyên, sẽ làm giảm vận tốc của dòng kim loại, từ đó cũng giảm động năng của dòng xuyên và giảm chiều sâu xuyên. Chính vì thế cần có sự cân bằng nhất định giữa khối lượng riêng của nón xuyên với vận tốc dòng xuyên [23]. Đối với việc tăng chiều dài L, các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào lựa chọn vật liệu có khả năng biến dạng dẻo tốt và làm nhỏ mịn hạt để tăng khả năng biến dạng dẻo, kéo dài dòng xuyên. Sau đây luận án sẽ tổng quan những kết quả nghiên cứu trên thế giới về vật liệu nón xuyên theo hai hướng: (i) ảnh hưởng của cấu trúc vật liệu đến khả năng kéo dài dòng xuyên.

1.4.1. Ảnh hưởng của vật liệu và công nghệ chế tạo đến chiều sâu xuyên

Như trên đã trình bày, chiều sâu xuyên tỷ lệ với căn bậc hai của khối lượng riêng của nón xuyên. Tuy nhiên, việc lựa chọn vật liệu nón xuyên không những chỉ dựa vào khối lượng riêng của vật liệu nón xuyên, mà còn dựa vào khả năng biến dạng dẻo của vật liệu nón xuyên để tạo ra dòng L dài nhất. Theo Manfred Held [24] thì vận tốc biến dạng của nón xuyên phải nhỏ hơn vận tốc của sóng xung kích lan truyền trong vật liệu nón xuyên (sóng xung kích do cháy thuốc nổ gây ra).

Vật liệu	Al	Ni	Cu	Мо	Та	U	W
Khối lượng riêng (kg/dm ³)	2,7	8,8	8,9	10,0	16,6	18,5	19,4
Vận tốc âm thanh lan truyền (km/giây)	5,4	4,4	4,3	4,9	2,4	2,5	4,0
Vận tốc tối đa dòng xuyên (km/giây)	12,3	10,1	9,8	11,3	5,4	5,7	9,2
(Vận tốc dòng xuyên tối đa) x (tỷ trọng) ^{1/2}	20,2	30,0	29,2	35,7	22,0	22,0	40,5
Thứ tự ưu tiên lựa chọn để đạt chiều sâu xuyên lớn nhất	7	3	4	2	6	5	1

Bảng 1. 1. Đặc tính và thứ tự ưu tiên một số loại vật liệu nón xuyên [24].

Nguyên tắc sơ bộ cho thấy, vận tốc dòng xuyên tối đa có thể đạt được chỉ gấp 2,34 lần vận tốc âm thanh lan truyền trong vật liệu nón xuyên [24]. Từ đây thấy rằng, một số vật liệu tuy có khối lượng riêng cao, nhưng có vận tốc lan truyền âm thanh thấp hơn, làm cho vận tốc chuyển động của dòng xuyên thấp hơn. Bảng 1.1 dưới đây trình bày đặc tính một số loại vật liệu nón xuyên và thứ tự ưu tiên lựa chọn dựa trên sự kết hợp giữa tỷ trọng và vận tốc dòng xuyên.

Tuy bảng trên không chính xác hoàn toàn, nhưng ít nhất cũng cho thấy, ngoài đồng là vật liệu được lựa chọn đầu tiên do có khối lượng riêng khá cao và có tính biến dạng dẻo tốt thì Mo và W là những vật liệu tiềm năng.

1.4.1.1. Vật liệu nón xuyên là kim loại nguyên chất

Theo những nguyên tắc về khối lượng riêng và khả năng biến dạng dẻo thì đồng kim loại thường được lựa chọn làm vật liệu nón xuyên [19, 20, 25]. Ngày nay, đối với nón xuyên bằng Cu thì độ xuyên thép đã đạt được đến 8, thậm chí 10 lần so với đường kính của nón. Đối với nón xuyên được làm bằng vàng khả năng xuyên sâu hơn 47% so với nón xuyên làm bằng đồng trên cùng một loại bia. Tuy nhiên nón xuyên được làm bằng vàng giá thành cao hơn nhiều lần so với nón xuyên bằng đồng.



Hình 1. 11. Ảnh hưởng của vật liệu, khoảng cách tiêu cự đến chiều sâu xuyên [19, 20, 25]. Trên hình 1.11 trình bày ảnh hưởng của vật liệu làm nón xuyên, khoảng cách tiêu cự đến chiều sâu xuyên (tính theo hệ số của đường kính nón xuyên)

Bảng 1.2 dưới đây cho thấy tính chất một số kim loại có thể làm vật liệu nón xuyên so với đồng. Cũng đã biết, những kim loại có cấu trúc tinh thể lập phương tâm mặt (FCC) có khả năng biến dạng dẻo tốt hơn kim loại có cấu trúc tinh thể lập

phương tâm khối (BCC) [20]. Vì vậy, vônfram, tantan, uranium nghèo không được lựa chọn làm vật liệu nón xuyên vì khả năng biến dạng dẻo kém. Kim loại chì mặc dù có khối lượng riêng cao hơn, có khả năng biến dạng dẻo tốt (cấu trúc FCC), nhưng không được lựa chọn là do nhiệt độ chảy thấp (327⁰C), nên khi hình thành dòng xuyên sẽ ở thể lỏng và làm giảm tác dụng xuyên.

	Cu	Pt	W	Au	U	Та	Pb	Ag
Khối lượng riêng	8.9	21.4	19.3	19.3	18.9	16.6	11.3	10.5
$\sqrt{\frac{\rho_{\rho_{cu}}}{\rho_{cu}}}$	1	1.55	1.47	1.47	1.46	1.37	1.13	1.09
Cấu trúc tinh thể	FCC	FCC	BCC	FCC	НСР	BCC	FCC	FCC
Nhiệt độ nóng chảy °C	1083	1772	3410	1064	1132	2996	327	962

Bảng 1. 2. Một số tính chất của kim loại có khả năng làm vật liệu nón xuyên.

Do đồng là vật liệu được lựa chọn ngay từ khi phát minh ra nổ lõm và còn được dùng phổ biến cho đến ngày nay, nên hầu như những nghiên cứu liên quan đến nổ lõm đều sử dụng nón xuyên bằng đồng [26].

J.F.Liu và cộng sự [25] kết hợp mô phỏng và thực nghiệm đã nghiên cứu biến đổi cấu trúc và các thông số nhiệt động của dòng xuyên hình thành từ nón xuyên. Trong đó cho thấy, nhiệt độ dòng xuyên là 747K, tức là bằng khoảng 0,55 nhiệt độ chảy của đồng. Kích thước hạt cấu trúc của vật liệu dòng xuyên sau khi đã nguội xuống nhiệt độ phòng là khoảng 10 μm, giảm khoảng 6 lần so với kích thước hạt ban đầu của nón xuyên là 63,12 μm. Chuyển động của lệch mạng được tin là nguyên nhân chính gây ra hiện tượng làm nhỏ mịn hạt cấu trúc của dòng xuyên.
Đối với kim loại khác, Park [27] nghiên cứu sự thay đổi của cấu trúc vật liệu nón xuyên chế tạo bằng Ta trước và sau khi xuyên sâu vào thép. Nghiên cứu bằng mô phỏng và thực nghiệm cho thấy, sau khi xuyên vào thép, kích thước hạt cấu trúc của Ta tăng mạnh, được cho là do ma sát làm tăng nhiệt độ của dòng xuyên, dẫn đến hiện tượng kết tinh lại. Lichtenberger Cowan và các cộng sự [28, 29] đã nghiên cứu thử nghiệm Mo như là vật liệu cho nón xuyên. Trong khi đó cũng nhóm nghiên cứu do Cowan đứng đầu [30] cũng đã thử nghiệm W cho vật liệu nón xuyên. Các kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng, các kim loại có khối lượng riêng cao như Mo, W cho chiều sâu xuyên sâu hơn.

Ngoài ra, nhôm (Al), Titan (Ti), Zirconi (Zr), Urani (U), Bạc (Ag)... cũng đã được nhắc đến như là những kim loại đã được nghiên cứu thử nghiệm dùng cho nón xuyên của lượng nổ lõm [19, 26, 31-33]. Wen-long Xu và các đồng nghiệp [34] đã sử dụng kim loại Ni và Mo làm vật liệu nón xuyên hình phễu lồi (bore-center annular shaped charge). Tác giả đi đến kết luận, nón xuyên làm bằng Mo có độ xuyên sâu hơn so với nón xuyên bằng Cu và Ni lần lượt là 10,0% và 21,3%. Tuy nhiên, khi so sánh với kim loại đồng, các nghiên cứu đều so sánh với Cu không được biến dạng làm nhỏ mịn hạt. Vì vậy, mặc dù các kim loại sở hữu khối lượng riêng lớn như Mo, W, Zr, U, nhưng lại rất khó biến dạng làm nhỏ mịn hạt như Cu, vì vậy những nghiên cứu này không đi vào ứng dụng được.

1.4.1.2. Vật liệu nón xuyên là hợp kim

Ngoài các thử nghiệm đối với kim loại nguyên chất, nhiều nghiên cứu trên thế giới cũng đã tập trung vào phát triển hợp kim dùng cho nón xuyên [35-42]. Hợp kim W-Cu-Ni được nhóm của Ruijun [43] nghiên cứu, trong khi Lee [44] sử dụng hợp kim Cu-20%Pb cho vật liệu nón xuyên của thiết bị nổ lõm dùng trong ngành dầu khí. Hợp kim Cu-20%Pb được cho là đã tạo ra lỗ xuyên rộng hơn là nón xuyên nguyên chất, điều này thích hợp với việc khai thác mỏ. Do các kim loại Mo, Ta và W có khối lượng riêng lớn, tốc độ truyền âm thanh tương đối tốt, nên ngoài việc sử dụng những kim loại nguyên chất này cho nón xuyên, nhóm của Hu [45] còn phát triển một số loại hợp kim trên cơ sở 3 nguyên tố này thử nghiệm làm vật liệu nón xuyên.

Miao Sun và các cộng sự [46] đã nghiên cứu hai loại hợp kim là Ni-Al và Cu-Ni-Al thử nghiệm làm nón xuyên hoạt tính cho nổ lõm. Nghiên cứu cho thấy hợp kim Cu-Ni-Al có chiều sâu xuyên lớn hơn hợp kim Ni-Al là 42%. Brauer [47] đã đăng ký patent tại Hoa Kỳ về vật liệu cho nón xuyên bằng hợp kim Cu với các nguyên tố thứ hai như: Ni, Si, Al, P, Mn, Fe, Bi, Sb. Trong đó cấu trúc của hợp kim gồm 2 pha chính là nền Cu và pha thứ hai được phân bố riêng và đều trong pha nền. Pha thứ hai phải có nhiệt độ nóng chảy thấp hơn nhiệt độ của nón xuyên khi kích nổ để tránh cho sự hình thành các vết nứt làm cho nón xuyên bị đứt đoạn sóm khi biến dạng.

Ping Cui [48] đã nghiên cứu hợp kim vô định hình nền Zr làm vật liệu nón xuyên. Nghiên cứu đã chỉ ra tiêu cự tối ưu đối với vật liệu hợp kim Zr vô định hình, nhưng đồng thời cũng cho thấy hợp kim vô định hình nền Zr có chiều sâu xuyên nhỏ hơn đồng kim loại.

Theo Walters [49], tại Phòng thí nghiệm quân sự (Hoa Kỳ) các hệ hợp kim sau đây đã được thử nghiệm làm nón xuyên nổ lõm: (i) hợp kim nhiều pha gồm Cu-Al, Cu – Sn, Cu – Zn, thép không gỉ 304; (ii) hợp kim tạo dung dịch rắn gồm Cu – Ni; (iii) hợp kim tạo cùng tinh gồm Pb- Sn và Cu-Ag... Các nghiên cứu đều nhận thấy, hợp kim nhiều pha có chiều sâu xuyên thấp nhất, hợp kim tạo dung dịch rắn có tốt hơn hợp kim nhiều pha nhưng tính dẻo vẫn không bằng kim loại nguyên chất, trong khi hợp kim cùng tinh thì cho kết quả không ổn định.

1.4.1.3. Vật liệu nón xuyên là composite (W-Cu)

Như đã thảo luận ở trên, chiều sâu đâm xuyên của lượng nổ lõm phụ thuộc vào khối lượng riêng của nón xuyên, chiều dài dòng kim loại trong đó chiều dài dòng kim loại phụ thuộc vào khả năng biến dạng dẻo của lượng nổ lõm. Do vậy để tăng chiều sâu đâm xuyên cần tăng khối lượng riêng đồng thời vẫn duy trì được khả năng biến dạng dẻo cao của vật liệu làm phễu. Các vật liệu có khối lượng riêng lớn như Mo, W hay Zr có khối lượng riêng lớn nhưng khả năng biến dạng dẻo thấp, ngược lại các vật liệu như Al, Sn có khả năng biến dạng dẻo tốt nhưng khối lượng riêng thấp nên chúng hầu như không cải thiện được chiều sâu đâm xuyên, thậm chí còn làm giảm hơn. Các nghiên cứu sau đó tập trung sử dụng vật liệu composite nền Cu với các vật liệu có khối lượng riêng cao như W, Mo... để vừa nâng cao khối lượng riêng và đồng thời vẫn duy trì được tính dẻo tốt của nền Cu [50-58]. Các nghiên cứu sử dụng nón composite Cu-W hay Cu-Mo được tiến hành vào những năm cuối thập niên 90 của thế kỷ 20 [59, 60].

Wang và cộng sự, [61] đã chế tạo nón composite Cu-W (80Cu-20W) sử dụng công nghê thấm với một lượng nhỏ niken (0,5%) và quan sát thấy chiều sâu đâm xuyên tăng 30% và nhận định rằng điều này là do khối lượng riêng của nón composite cao hon so với nón đồng. Tương tự, Bogdan và Zenon [62] đã chế tao nón composite Cu-W sử dung bột đồng điện phân. Nghiên cứu cho thấy, dù vân tốc đầu dòng kim loại thấp hơn nhưng chiều sâu đâm xuyên vẫn lớn hơn do mật độ nón tăng lên (~ 12,5 g/cm³). Trong một nghiên cứu khác tiến hành bởi Elshenawy [63], nón composite Cu-W được chế tao bằng kỹ thuật ép một chiều từ hỗn hợp bột Cu-W và so sánh với nón Cu chế tạo bằng kỹ thuật dập sâu từ đồng tấm. Nghiên cứu này cũng cho thấy, chiều sâu đâm xuyên lớn hơn so với khi sử dụng nón đồng, ngoài ra hố xuyên tao ra cũng sach hơn và không bi tắc bởi vật liêu nón như trong trường hợp sử dụng nón đồng. Trong công trình nghiên cứu của Zhao và cộng sự [64] đã chỉ ra rằng, việc bổ sung Zn và Ni vào lớp nón composite W–Cu làm giảm chiều sâu đâm xuyên nhưng làm tăng diên tích xuyên phá trên bia. Điều này được Zhao cho là do sự tiêu tán năng lượng theo phương ngang của dòng kim loại tăng lên. Việc bổ sung Ni trong hợp kim W–Cu làm tăng điểm nóng chảy của pha nền kim loại, do đó làm giảm tác dụng bôi trơn của nền kim loại trong quá trình xuyên phá. Ngoài ra, Zhao cho rằng việc bổ sung Zn làm tăng cường đô liên kết giữa các hạt W và nền kim loại, do đó trong quá trình xuyên phá, các hạt W trong tia W–Cu– Ni bị biến dạng nghiêm trọng so với các hạt trong dòng W–Cu. Yan và các đồng nghiệp đã tiến hành chế tao nón composite nhiều lớp từ vật liêu W/Ta và W/TiN/Ta và cho thấy cơ tính của nón đã được cải thiện rõ rệt. Thêm vào đó, thử nghiệm lượng nổ lõm cũng cho thấy vật liệu composite này có tiềm năng cao để chế tạo lương nổ lõm [65].

Li và cộng sự [66] đã nghiên cứu chế tạo vật liệu composite Cu-20%W bằng phương pháp thiêu kết dòng xung plasma. Kết quả phân tích ảnh TEM cho thấy các hạt W phân bố đều trong nền kim loại đồng. Khi nhiệt độ thiêu kết SPS tăng, hàm lượng pha Cu lỏng tăng lên làm cho quá trình sắp xếp lại hạt W và điền đầy vào các lỗ xốp. Tỉ trọng tương đối và độ cứng của mẫu Cu-W đạt lần lượt là 94,87 % và 1,18 GPa tại nhiệt độ thiêu kết SPS 950 °C.

Trên hình 1.12 thể hiện ảnh hưởng của nhiệt độ thiêu kết đến tỉ trọng tương đối của mẫu vật liệu composite Cu-20%W (a) và ảnh TEM phân bố hạt W (b).





Pillari và cộng sự [67] nghiên cứu chế tạo W-Cu bằng phương pháp nghiền bi năng lượng cao (tốc độ nghiền hỗn hợp bột là 300 vòng/phút, thời gian nghiền 5 giờ) kết hợp phương pháp thiêu kết dòng xung plasma (nhiệt độ thiêu kết thiêu kết SPS 900 °C, áp lực ép 50 MPa, thời gian 10 phút). Khi hàm lượng Cu tăng từ 20 lên 80 %, tỉ trọng tương đối tăng tương ứng từ 85,4 % lên 95,7 % (Hình 1.13). Trong khi đó, độ cứng và mô đun đàn hồi của mẫu chế tạo lại giảm khi hàm lượng Cu tăng lên.





Liu và nhóm nghiên cứu [68] đã tiến hành chế tạo vật liệu composite W-Cu từ hỗn hợp bột siêu mịn với hàm lượng Cu thay đổi là 5, 20 và 40 % (theo khối lượng). Trong nghiên cứu này, nhiệt độ thiêu kết được khảo sát tại 1100, 1150 và 1200 °C với thời gian thiêu kết 3 giờ trong môi trường khí hoàn nguyên H₂ (20 mL/phút).





Từ hình 1.14 cho thấy, khi nhiệt độ thiêu kết tăng thì tỉ trọng tương đối và độ cứng Vickers của mẫu tăng lên và đạt giá trị cao nhất tại nhiệt độ thiêu kết 1250 °C. Với mẫu có hàm lượng Cu thấp (5%), tỉ trọng tương đối và độ cứng đạt giá trị tốt nhất so với các mẫu tại các hàm lượng Cu là 20 và 40 %.

Chaubey và cộng sự [69] đã chế tạo mẫu khối W/Cu gồm 7 lớp với hàm lượng thay đổi (100 W, 80W-20Cu, 60W-40Cu, 50W-50Cu, 40W-60Cu, 20W-80Cu, 100Cu, theo khối lượng) bằng phương pháp dòng xung plasma. Mẫu thiêu kết SPS tại nhiệt độ 1050 °C đạt kết quả tốt nhất về tỉ trọng tương đối (90,5%) và độ cứng (239 HV).

Qua phân tích các nghiên cứu đã được thực hiện trong những năm gần đây, có thể thấy vật liệu composite W-Cu vẫn đang được nghiên cứu phát triển và mở rộng các ứng dụng. Đặc biệt là trong chế tạo nón xuyên cho lượng nổ lõm do tăng được chiều sâu đâm xuyên. Ngoài ra, các nghiên cứu đã cho thấy, hàm lượng Cu hoặc W được thay đổi tùy thuộc vào mục đích ứng dụng của vật liệu chế tạo.

1.4.2. Ảnh hưởng của kích thước hạt cấu trúc đến chiều sâu xuyên

Ngoài ảnh hưởng quan trọng của khối lượng riêng và khả năng biến dạng dẻo của vật liệu nón kim loại, các nghiên cứu về cấu trúc của vật liệu làm nón kim loại đều cho thấy kích thước hạt tinh thể của pha kim loại hay của các hạt gia cường trong nón chế tạo từ composite đều ảnh hưởng đến chiều sâu đâm xuyên của lượng nổ lõm. Nhiều nghiên cứu làm nhỏ kích thước hạt được tiến hành bao gồm cả thực nghiệm và mô phỏng nhằm dự đoán hoặc thử nghiệm thực tế ảnh hưởng của kích thước hạt đến hiệu suất quá trình xuyên phá của lượng nổ lõm.

Leus và các cộng sự đã sử dụng phương pháp ép qua kênh gấp khúc tiết diện không đổi (ECAP) để tạo cấu trúc hạt siêu mịn cho nón đồng kim loại [70]. Trong đó, khuôn ECAP được thiết kế với góc gấp khúc là $\alpha = 90^{\circ}$ và quá trình ép được tiến hành ở nhiệt độ phòng sử dụng chất bôi trơn là grafit, sau khi ép, mẫu được ủ ở 150°C để khử ứng suất dư. Trên hình 1.15 là ảnh SEM cấu trúc của đồng trước và sau khi thực hiện quá trình ECAP và ủ khử ứng suất. Có thể quan sát rõ ràng sau khi tiến hành ECAP đã tạo được cấu trúc hạt siêu mịn so với mẫu không được thực hiện ECAP. Kết quả thử nghiệm lượng nổ lõm với nón đồng được chế tạo từ phôi trước và sau khi ECAP cho thấy chiều sâu đâm xuyên được cải thiện rõ rệt và có thể tăng hơn 15,5% so với mẫu không được ECAP.



Hình 1. 15. Ånh SEM cấu trúc của đồng trước và sau khi thực hiện quá trình ECAP và ủ khử ứng suất [70].

Trong nghiên cứu của Sun và các đồng nghiệp khi nghiên cứu chế tạo các nón hợp kim CuSn₁₀ bằng hai phương pháp, đi từ phôi đúc hợp kim CuSn₁₀ và từ bột hợp kim của chúng sau đó thiêu kết. Đối với phương pháp đi từ phôi đúc, các nón hợp kim được tiện trực tiếp từ phôi để đạt được kích thước theo thiết kế. Đối với phương pháp luyện kim bột, bột hợp kim được thiêu kết bằng kỹ thuật nóng chảy laze lựa chọn để hình thành nón hợp kim (SLM, Selective Laser Melting). Bột hợp kim được trộn giữa hai loại kích thước 15 và 53µm. Quy trình thiêu kết SLM, được thực hiện sử dụng laser sợi quang có bước sóng 1070 nm. Kích thước điểm laser trên bề mặt của bột là khoảng 100 µm. Khí argon được sử dụng làm khí bảo vệ trong quá trình chế tạo để ngăn chặn sự oxy hóa mẫu. Công suất của tia laser được sử dụng là 290 W, với tốc độ quét 1000 mm/s. Bằng phương pháp này Sun đã tạo ra cấu trúc hạt mịn với kích thước hạt từ 15-53µm trong khi kích thước hạt tinh thể của nón CuSn₁₀ chế tạo bằng kỹ thuật tiện từ phôi đúc nằm trong khoảng 200 đến 600µm như thấy trên ảnh quang học hình 1.16 [71].



Hình 1. 16. Ảnh quang học mặt cắt dọc và mặt cắt ngang của (a), (b) mẫu nón
CuSn₁₀ chế tạo bằng phương pháp tiện và (c), (d) chế tạo bằng phương pháp thiêu kết nóng chảy laze lựa chọn trong nghiên cứu của Sun và đồng nghiệp [71].



Hình 1. 17. Mặt cắt bia thép sau thử nghiệm nổ lượng nổ lõm sử dụng nón CuSn₁₀ chế tạo bằng a) kỹ thuật tiện từ phôi đúc và b) kỹ thuật thiêu kết SLM từ bột hợp kim [71]

Trên hình 1.17 [71] là kết quả thử nghiệm nổ cũng cho thấy chiều sâu đâm xuyên của lượng nổ lõm sử dụng nón CuSn₁₀ chế tạo bằng kỹ thuật SLM đạt 214mm cao hơn cho với mẫu sử dụng nón chế tạo bằng kỹ thuật tiện từ phôi đúc đạt 168mm.

Trong nghiên cứu được thực hiện bởi Lichtenberger và cộng sự [72], nhóm đã tiến hành chế tạo nón đồng với kích thước hạt khác nhau là 20 và 90 micron, được thử nghiệm xuyên vào thép các bon thấp cũng cho thấy chiều sâu đâm xuyên tốt hơn được ghi nhận cho lớp lót kích thước hạt nhỏ hơn. Ảnh hưởng của cấu trúc vật liệu nón xuyên đến hiệu suất đâm xuyên cũng được báo cáo bởi Petit và cộng sự, và cho rằng hiệu suất đâm xuyên tăng lên ở kích thước hạt giảm là do cải thiện độ nhám bề mặt trong quá trình nổ [73]. Yao và đồng nghiệp chế tạo nón đồng hình phễu với góc côn 60° và đường kính miệng nón là 54mm bằng kỹ thuật ép qua kênh gấp khúc và cán nguội ở nhiệt độ phòng và sau đó ram ở nhiệt độ và thời gian khác nhau để được các nón đồng với kích thước hạt đồng sau khi chế tạo tương ứng là d = 0.5 ± 0.3 ; 1.7 ± 1.2 ; 3.6 ± 2.5 và 20.2 ± 7.8 µm như thấy trên ảnh EBSD (nhiễu xạ điện tử tán xạ ngược), hình 1.18 [74].



Hình 1. 18. Ånh nhiễu xạ điện tử tán xạ ngược cấu trúc nón đồng với kích thước hạt khác nhau (A) 0.5 ± 0.3 ; (B) 1.7 ± 1.2 ; (C) 3.6 ± 2.5 và (D) 20.2 ± 7.8 µm [74].

Tuy nhiên kết quả thử nghiệm nổ cho thấy chiều sâu đâm xuyên đạt được lớn nhất với kích thước hạt trung bình $3,6 \pm 2,5 \ \mu m$ cao hơn so với mẫu sử dụng kích thước hạt thô $20,2 \pm 7,8 \ \mu m$ khoảng 23,6% nhưng với kích thước hạt nhỏ hơn lại không cho chiều sâu đâm xuyên tăng hơn và được giải thích là do ảnh hưởng của

thời gian nổ. Điều này cho thấy nhiều vấn đề cần được làm sáng tỏ hơn về ảnh hưởng của kích thước hạt và các vấn đề lý thuyết và thực nghiệm khác liên quan đến hiệu suất của lượng nổ lõm.

Nhiều nghiên cứu vẫn đang tiếp tục được tiến hành, đặc biệt liên quan đến tạo cấu trúc hạt mịn và siêu mịn của nón kim loại và composite [75, 76]. Trong đó nhiều nghiên cứu tập trung vào các hiệu ứng cấu trúc vi mô của kích thước hạt trước và sau khi gia công. Kết quả cho thấy, kích thước hạt đồng sau gia công nhỏ hơn so với vật liệu lớp lót ban đầu, đồng thời còn thấy rằng, cấu trúc nón trải qua quá trình tái kết tinh động trong quá trình biến dạng ở tốc độ cao [77-80]. Schmidt và cộng sự [68] đã quan sát thấy sự khác biệt trong biến dạng kích thước hạt ở cả tốc độ biến dạng cao và thấp bằng cách sử dụng phương pháp kiểm tra va đập và xoắn. Về cơ bản có thể thấy, ngoài khối lượng riêng và khả năng biến dạng dẻo thì cấu trúc của vật liệu nón kim loại có ảnh hưởng lớn tới khả năng đâm xuyên của lượng nổ lõm. Và hầu hết các nghiên cứu hiện nay đều tập trung vào ảnh hưởng của cấu trúc vật liệu đến hiệu suất sử dụng của lượng nổ lõm.

1.5. Các phương pháp chế tạo nón kim loại

Hiện nay, các phương pháp chủ yếu để chế tạo nón kim loại bao gồm dập và cán đi từ vật liệu kim loại và hợp kim dạng khối. Nhược điểm của phương pháp này là kích thước hạt cấu trúc của vật liệu lớn. Do đó, các phương pháp biến dạng dẻo hoặc xử lý nhiệt thường được kết hợp để làm nhỏ mịn hạt cấu trúc. Phương pháp luyện kim bột được bắt đầu sử dụng để chế tạo nón kim loại từ đầu những năm 2000, sau đó được nghiên cứu và sử dụng phổ biến trong chế tạo các nón bằng nhiều vật liệu kim loại, hợp kim và composite khác nhau [62, 81-83]. Phương pháp luyện kim bột cho thấy các ưu điểm đặc biệt khi chế tạo các nón composite kim loại có các thành phần là kim loại có nhiệt độ nóng chảy và khối lượng riêng khác nhau [63, 84, 85]. Các nghiên cứu đi trước cho thấy các nón kim loại, hợp kim hay composite chế tạo bằng phương pháp này có hiệu quả đâm xuyên khá tốt [82, 86, 87]. Ngoài ra, sử dụng phương pháp luyện kim bột cũng dễ dạng điều khiển kích thước hạt của vật liệu thông qua điều khiển quá trình nghiền hay thiêu kết sản phẩm.

Tuy nhiên, phương pháp luyện kim bột cũng có nhược điểm là khó đạt được độ xít chặt hoàn toàn sau khi thiêu kết dẫn đến hiệu quả đâm xuyên của lượng nổ lõm bị giảm xuống. Vì vậy hiện nay, một số phương pháp thiêu kết tiên tiến được áp dụng để nâng cao độ xít chặt của sản phẩm như thiêu kết bằng sóng vi ba, ép nóng hay thiêu kết dòng xung plasma (SPS) [88-91] [92-98]. Trong đó, kỹ thuật thiêu kết dòng xung plasma 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 có thể nhanh chóng nâng nhiệt đến nhiệt độ thiêu kết đồng thời kết hợp với sự tác động của lực ép một chiều. Do đó, thiêu kết SPS rất có tiềm năng trong việc điều khiển cấu trúc, độ xít chặt và do đó nâng cao được hiệu quả làm việc của các nón kim loại trong chế tạo lượng nổ lõm [91, 99].

1.6. Các ứng dụng của thiết bị nổ lõm.

Hiệu ứng nổ lõm được ứng dụng rất rộng rãi trong các vũ khí, trang bị nhẹ của lục quân: trong kíp nổ, bom, mìn, lựu đạn và đặc biệt là trong các loại đạn pháo, tên lửa... Một ứng dụng điển hình của hiệu ứng nổ lõm trong vũ khí thô sơ là bom ba càng, đã được các chiến sỹ của ta sử dụng trong kháng chiến chống Pháp để tiêu diệt xe tăng, xe bọc thép của thực dân Pháp, khi mà chưa có súng, pháo chống tăng. Chỉ với một lượng thuốc nổ không lớn, nhờ hiệu ứng nổ lõm, bom ba càng có thể tiêu diệt được xe tăng của địch mà với đạn dược thông thường không thể làm nổi. Tuy nhiên, do sự thô sơ của nó mà các chiến sỹ cảm tử đã phải hy sinh chính mạng sống của mình. Chỉ đến khi súng pháo chống tăng ra đời, ứng dụng hiệu ứng nổ lõm mới phát huy tác dụng một cách tối đa. Nổ lõm có thể nói là loại đạn rất phổ biến ngày nay được sử dụng trong các súng phóng lựu để chống tăng và xe bọc thép,...



Hình 1. 19. Đạn nổ lõm và súng phóng lựu đơn giản được trang bị cho lính bộ binh [100, 101].

Trên hình 1.19 là hình ảnh một dạng súng phóng lựu và đạn nổ lõm được sử dụng cho lính bộ binh [100, 101]. Các quốc gia có nền quân sự phát triển mạnh thì súng phóng lựu sử dụng đạn nổ lõm cũng rất phát triển. Ngoài ra, tất cả các tên lửa chống tăng hiện nay đều sử dụng nguyên lý nổ lõm để xuyên phá xe tăng. Hình 1.20 là sơ đồ cấu tạo của tên lửa chống tăng nổi tiếng Javelin [102].



Hình 1. 20. Sơ đồ cấu tạo tên lửa chống tăng Javelin FGM-148 nổi tiếng hiện nay, tên lửa được trang bị 2 khối nổ lõm, "Khối nổ 1" để phá giáp phản ứng nổ trên xe tăng, "Khối nổ 2" để xuyên vỏ xe tăng [102].

Việc sử dụng khối nổ lõm khi cắt thân vỏ các tàu mặt nước và tàu ngầm tỏ ra rất hiệu quả, cũng như các trang bị nặng và được bọc thép mỏng khi tiêu hủy chúng. Các khối nổ lõm cũng được sử dụng để tiêu hủy đạn dược và động cơ tên lửa nhiên liệu rắn. Việc mở vỏ và chia tách thân vỏ đạn nhờ khối nổ lõm do đó có thể áp dụng khi tiêu hủy đạn dược cỡ lớn. Trở ngại chủ yếu trong việc ứng dụng rộng rãi công nghệ này là khả năng mồi nổ cao của luồng xuyên lõm, do đó việc nghiên cứu công nghệ nổ tiêu hủy, về bản chất chính là sự chọn lựa các đặc trưng của khối nổ lõm và sơ đồ tác dụng lên đạn đảm bảo việc mở thân vỏ an toàn, không tạo ra sự kích thích chất nhồi trong đó về chế độ chuyển hóa nổ. Cho đến hiện giờ, công nghệ cắt nổ đã được phát triển cho các bom không quân nổ phá – mảnh có khối lượng từ 110 kg và lớn hơn, các loại đạn pháo binh nổ phá – mảnh cỡ 100 ...152 mm và cho một số loại mìn hải quân.

Khối nổ lõm là phương tiện hữu hiệu để phá hủy các loại đất đá phi tiêu chuẩn rắn và bền kiểu như đá granite, đá cẩm thạch, để gia công (cắt) các tấm, phiến từ các vật liệu này, cũng như để nghiền nát các khối kim loại nặng nề khi nhận được kim loại thứ cấp. Khi tiến hành các công việc nổ trên các mỏ lộ thiên có đến 25% số đất đá bị phá hủy tạo ra cái gọi là "vật phi tiêu chuẩn" – những cục đất

đá mỏ không nằm trong cửa nạp của máy đào đá. Việc sử dụng các khối nổ lõm tạo ra khả năng trực tiếp phá hủy (nghiền vụn) đất đá thành các cục có kích thước cần thiết mà không cần thực hiện các công việc khoan lỗ nổ mìn với tỷ suất tiêu hao thuốc nổ không lớn hơn 0,01... 0.1 kg/m³. Việc sử dụng liều nổ cho phép phá hủy các tảng đá granit có kích thước 3,4...3,9 m³ thành các cục có thể tích 0,2m³.

Ngoài ra, nổ lõm còn ứng dụng trong ngành khai thác dầu khí để mở lỗ cho dầu và khí chảy vào lỗ khoan từ các khe đá. Trên hình 1.21 thể hiện thiết bị khoan dựa trên công nghệ nổ lõm được áp dụng trong ngành dầu khí và là một công trình nghiên cứu đã được ứng dụng trong nước [103].



.*Hình 1. 21.* Súng nổ lõm để mở lỗ (hình trái) và sơ đồ nguyên lý mở lỗ (hình phải) trong giếng khoan dầu khí bằng thiết bị nổ lõm [103].

1.7. Kết luận Chương 1

Lượng nổ lõm là một thiết bị công phá được sử dụng phổ biến trong lĩnh vực quân sự như đanh nổ lõm các loại súng, pháo chống tăng, chống xe bọc thép... Ngoài ra, hiện nay lượng nổ lõm còn được sử dụng phổ biến trong các ngành giao thông, khai thác đá, khai thác mỏ hay khai thác dầu khí. Nguyên lý cơ bản của lượng nổ lõm là tập trung năng lượng của khối thuốc nổ để làm cho nón kim loại (là một chi tiết trong lượng nổ lõm) biến dạng với tốc độ rất cao tạo ra dòng kim loại trạng thái rắn di chuyển với vẫn tốc rất lớn để xuyên, phá mục tiêu. Khả năng xuyên phá của lượng nổ lõm phụ vào nhiều yếu tố như thiết kế, lượng thuốc nổ và khối lượng riêng, khả năng biến dạng dẻo cũng như cấu trúc của vật liệu làm nón kim - Tăng khối lượng riêng và khả năng biến dạng dẻo của vật liệu nón kim loại có khả năng làm tăng khả năng xuyên phá của lượng nổ lõm, tuy nhiên khi khối lượng riêng tăng quá cao sẽ làm giảm vận tốc của dòng kim loại và do đó sẽ làm giảm chiều sâu đâm xuyên. Đồng là vật liệu được ứng dụng phổ biến nhất để chế tạo nón kim loại do khối lượng riêng tương đối cao và khả năng biến dạng dẻo rất tốt. Để nâng cao hiệu suất của lượng nổ lõm, composite nền đồng với các kim loại khác như W hay Mo đang được nghiên cứu và phát triển nhằm tối ưu hóa giữa khối lượng riêng dẻo của vật liệu.

- Cấu trúc của vật liệu nón kim loại có ảnh hưởng quan trọng đến hiệu suất làm việc của lượng nổ lõm. Nói chung với cùng khối vật liệu chế tạo nón, kích thước hạt càng nhỏ thì hiệu suất của lượng nổ lõm càng cao (chiều sâu đâm xuyên càng lớn).

 Để có cấu trúc hạt mịn có thể sử dụng các phương pháp xử lý như thiêu kết nhanh, nhiệt luyện hay biến dạng dẻo như miết hay cán.

- Từ những phân tích về tổng quan các công trình nghiên cứu trong, ngoài nước về lịch sử thiết bị nổ lõm và các yếu tố ảnh hưởng đến khả năng xuyên sâu, đề xuất hướng nghiên cứu của luận án trong đó tập trung vào nghiên cứu về vật liệu và công nghệ chế tạo nón xuyên cụ thể như sau:

+ Đối với vật liệu đồng: Nghiên cứu chế tạo bằng phương pháp luyên kim bột từ bột đồng, phương pháp dập nguội từ đồng tấm và nghiên cứu biến dạng làm nhỏ mịn hạt cấu trúc bằng phương pháp miết cơ học, nghiên cứu ảnh hưởng của kích thước hạt cấu trúc lên tính chất xuyên của nón xuyên.

+ Đối với vật liệu composite W-Cu: nghiên cứu tối ưu thành phần W/Cu, nghiên cứu chế tạo nón xuyên từ W/Cu composite bằng phương pháp luyện kim bột và nghiên cứu biến dạng làm nhỏ mịn hạt cấu trúc bằng phương pháp miết cơ học, nghiên cứu ảnh hưởng của kích thước hạt cấu trúc lên tính chất xuyên của nón xuyên.

CHƯƠNG 2. CÁC PHƯƠNG PHÁP CHẾ TẠO VẬT LIỆU VÀ NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu sử dụng trong nghiên cứu

2.1.1. Đồng tấm

Đồng tấm được sử dụng trong luận án là loại đồng đỏ mác C10100 (hình 2.1), với độ sạch 99,97 %, chiều dày 1,5 mm, được sử dụng để chế tạo nón xuyên bằng 2 phương pháp khác nhau là dập nguội và miết sau dập nguội.



Hình 2. 1. Đồng tấm nguyên liệu.

2.1.2. Bột đồng

Bột đồng được chế tạo bằng phương pháp điện phân, có dạng nhánh cây và có độ sạch 99,5%, kích thước hạt bột trong khoảng 44-74 µm. Hình 2.2 là ảnh SEM của bột đồng nguyên liệu dạng nhánh cây.



Hình 2. 2. Ảnh SEM mẫu bột đồng nguyên liệu.

Trước mỗi đợt thí nghiệm, bột đồng nguyên liệu được lấy mẫu và phân tích thành phần hóa học bằng phương pháp phổ tán xạ năng lượng tia X. Nếu hàm lượng

ôxy trong bột đồng lớn hơn 1,0%, bột đồng sẽ được hoàn nguyên lại trong lò điện trở ống tại nhiệt độ 300 °C, môi trường khí H₂ trong 1,5 giờ để đảm bảo độ sạch.

2.1.3. Bột vonfram (W)

Bột W có độ tinh khiết là 99,9%, hình dạng giả cầu, kích thước hạt trong khoảng 44-74 µm, được trộn với bột Cu tạo thành hỗn hợp bột Cu-W dùng để chế tạo nón xuyên composite có kích thước theo yêu cầu của sản phẩm. Trước mỗi đợt thí nghiệm, bột vonfram nguyên liệu được lấy mẫu, phân tích thành phần hóa học bằng phương pháp phổ tán xạ năng lượng tia X. Nếu hàm lượng ôxy trong bột vonfram lớn hơn 1,0 %, bột vonfram sẽ được hoàn nguyên lại trong lò điện trở ống tại nhiệt độ 950 °C, môi trường khí H₂ trong 2 giờ để đảm bảo độ sạch. Hình 2.3 là ảnh SEM của bột W nguyên liệu.



Hình 2. 3. Ảnh SEM mẫu bột Vonfram nguyên liệu.

2.1.4. Vật tư và hóa chất khác

- Khí: có 2 loại khí được sử dụng trong luận án: khí hydro (H₂) với độ sạch 99,99 % dùng để làm khí hoàn nguyên và khí argon (Ar) với độ sạch 99,99 % dùng làm khí bảo vệ.

 Các vật tư và hóa chất khác được sử dụng trong quá trình chế tạo mẫu và làm sạch mẫu bao gồm: Cồn, aceton, n-hexan, paraffin...

2.2. Phương pháp chế tạo mẫu nghiên cứu

2.2.1. Mẫu vật liệu dạng khối

Mẫu vật liệu dạng khối dùng để phân tích tính chất cơ, khối lượng riêng và thành phần hóa học. Mẫu được chế tạo theo phương pháp luyện kim bột, bao gồm cả mẫu 100% đồng kim loại và mẫu composite W-Cu. Mẫu được chế tạo theo các

công đoạn kế tiếp nhau lần lượt là: nghiền trộn, ép tạo hình, thiêu kết sơ bộ, thiêu kết bằng xung điện plasma.

- Công đoạn nghiền trộn:

Đầu tiên bột Cu (đối với mẫu 100% Cu) hoặc bột W và Cu (đối với mẫu composite W-Cu) được cân xác định khối lượng từng mẻ, đưa vào tang nghiền và thêm 1% paraffin làm chất kết dính. Sau đó, bột được trộn đều trong cối nghiền sử dụng tang nghiền và bi là hợp kim cứng W-Co, tỷ lệ bi/bột là 2/1, thời gian nghiền trộn là 1 giờ đối với bột 100% Cu và 48 giờ với bột composite W-Cu. Sau khi nghiền trộn, bột được lấy ra, để khô tự nhiên ngoài không khí hoặc sấy trong tủ sấy chân không.



Hình 2. 4. Mô hình máy nghiền bi tang trống sử dụng trong nghiên cứu - *Công đoạn ép:*



Hình 2. 5. Sơ đồ nguyên lý ép mẫu trụ.

Trên hình 2.5 là sơ đồ nguyên lý ép mẫu trụ. Bột đồng và hỗn hợp bột Cu-W sau khi sấy khô được ép trong khuôn kim loại hình trụ đường kính Φ10 mm, áp lực ép 6 MPa, với khối lượng bột ép là 5g trên máy ép thủy lực 10 tấn. Mục đích của công đoạn này là để tạo ra hình mẫu nghiên cứu và tạo độ bền cần thiết trước khi tiến hành thiêu kết.

- Công đoạn thiêu kết:

Phôi sau khi ép tạo hình, được đưa vào lò ống thiêu kết sơ bộ để tạo độ bền cần thiết trước khi đưa sang công đoạn thiêu kết bằng xung điện plasma. Môi trường thiêu kết sơ bộ là khí hoàn nguyên hydro với nhiệt độ thiêu kết sơ bộ tại 930°C, thời gian thiêu kết sơ bộ là 120 phút.

Phôi sau khi thiêu kết sơ bộ được làm sạch ba via, đưa vào khuôn graphit để ép thiêu kết trên thiết bị xung điện plasma (SPS). 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 và áp lực ép là 32,36 MPa. Hình 2.6 dưới đây là sơ đồ nguyên lý thiêu kết mẫu đồng trên thiết bị SPS và hình ảnh thiết bị SPS.



Hình 2. 6. Sơ đồ nguyên lý thiêu kết mẫu đồng trên thiết bị SPS (hình trái) và hình ảnh thiết bị SPS Labox 350 tại Viện Khoa học vật liệu (hình phải).

2.2.2. Mẫu nón xuyên

Mẫu nón xuyên dùng để thử nghiệm nổ lõm xác định chiều sâu xuyên được sử dụng là mẫu nón xuyên dùng cho đạn xuyên lõm 40mm có kích thước sau cùng như hình 2.7 dưới đây.





Nón xuyên bằng composite W-Cu được chế tạo hoàn toàn theo phương pháp luyện kim bột, sử dụng kỹ thuật thiêu kết bằng xung plasma. Nón xuyên bằng 100% đồng kim loại được chế tạo theo cả 2 phương pháp: dập nguội và luyện kim bột.

Vì kích thước nón xuyên trên hình 2.7 là kích thước sau cùng, do đó phôi nón xuyên phải đảm bảo có độ dư nhất định cho công đoạn miết, gia công cơ khí chính xác.

Đối với mẫu nón xuyên được chế tạo theo phương pháp luyện kim bột, các bước chế tạo tương tự như các bước chế tạo mẫu khối đã được mô tả tại Mục 2.2.1. Điều khác biệt ở đây là khuôn ép tạo hình và khuôn thiêu kết SPS được thiết kế theo kích thước nón xuyên tại hình 2.7 cộng thêm lượng dư gia công.

Toàn bộ các bước được trình bày trên hình 2.8. Trong đó, nón xuyên sau khi thiêu kết bằng xung điện plasma có thể được gia công biến dạng dẻo bằng kỹ thuật miết cơ khí để tạo cấu trúc siêu mịn.



Hình 2. 8. Sơ đồ khối các công đoạn chế tạo nón xuyên cho thử nghiệm nổ lõm.

Hình 2.9 là sơ đồ nguyên lý ép tạo hình phôi nón xuyên và ép thiêu kết theo phương pháp SPS. Quá trình ép tạo hình phôi nón xuyên được thực hiện trên máy ép trục vít 60T đặt tại Viện Công nghệ - Tổng cục CNQP.

40



Hình 2. 9. Sơ đồ nguyên lý ép tạo hình nón xuyên (hình trái) và nguyên lý ép thiêu kết SPS nón xuyên (hình phải).

Để so sánh, nón xuyên bằng 100% Cu kim loại ngoài việc chế tạo từ bột Cu theo phương pháp luyện kim bột, còn được chế tạo theo phương pháp dập nguội từ đồng tấm. Đối với việc chế tạo nón xuyên bằng phương pháp dập nguội, đồng tấm mác C10100 đã được sử dụng. Hình 2.10 trình bày sơ đồ khối các công đoạn chế tạo nón xuyên bằng phương pháp dập nguội.



Hình 2. 10. Sơ đồ khối các công đoạn chế tạo nón xuyên bằng phương pháp dập nguội từ đồng tấm.

Theo đó, nón xuyên được dập nguội theo 3 bước, trong đó sau mỗi lần dập, phôi dập được ủ mềm tại nhiệt độ 640 °C trong 30 phút, môi trường ủ là chân không. Sau khi dập xong phôi được ủ để khử ứng suất ở nhiệt độ 280 °C trong 30 phút, sau đó làm nguội. Quá trình dập được thực hiện trên máy dập WETORI-160T đặt tại nhà máy Z183 - Tổng cục CNQP.

Để làm nhỏ mịn hạt cấu trúc của vật liệu, nón xuyên sau dập nguội hoặc sau khi thiêu kết SPS được miết trên thiết bị miết đặc chủng tại Nhà máy Z117 – Tổng cục CNQP. Mỗi nón xuyên 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. Góc tiếp xúc của bánh miết vuông góc với đường sinh của nón xuyên. Sau khi miết giai đoạn 1, nón xuyên được ủ để khử ứng suất ở nhiệt độ 150 °C trong thời gian 60 phút. Tiếp đến, nón xuyên 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 nón xuyên và hình ảnh miết trên thực tế được trình bày trên Hình 2.11.





Các mẫu nón xuyên sau khi miết được gia công tinh để đảm bảo đúng kích thước theo yêu cầu bản vẽ tại hình 2.7. Trong đó đặc biệt lưu ý cần đảm bảo độ chính xác về hình học và độ nhám bề mặt. Hình ảnh mẫu nón xuyên hoàn thiện được trình bày trên hình 2.12.



Hình 2. 12. Hình ảnh mẫu nón xuyên sau khi hoàn thiện.

2.3. Phương pháp nghiên cứu

2.3.1. Nghiên cứu cấu trúc của vật liệu

2.3.1.1. Phương pháp hiển vi quang học (OM) và hiển vi điện tử quét (SEM)

Vị trí lấy mẫu nghiên cứu được chọn như trên hình 2.13 bằng phương pháp cắt dây vì tại vị trí đó không có nhiều khác biệt về độ cứng và khối lượng riêng so với 5 vị trí khác nhau theo chiều dọc từ đỉnh đến miệng nón mà nghiên cứu sinh đã khảo sát trong quá trình nghiên cứu. Do vậy để nghiên cứu cấu trúc của vật liệu chế tạo nón xuyên bằng các phương pháp khác nhau, nghiên cứu sinh lựa chọn vị trí giữa của các nón làm mẫu đại diện. Sau đó mẫu được mài, tẩm thực bằng dung dịch FeCl₃ (5g) + HCl (10mL) + H₂O (100mL). Cấu trúc của 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), tất cả các thiết bị này được đặt tại Viện Khoa học vật liệu.



Hình 2. 13. Vị trí lấy mẫu để nghiên cứu cấu trúc

Trên hình 2.13 thể hiện vị trí và hướng lấy mẫu để nghiên cứu cấu trúc bằng hiển vi quang học và SEM. Mẫu được cắt theo tiết diện ngang của nón xuyên tại vị trí giữa của mẫu nón có kích thước (10x10) mm rồi làm sạch ba via. Để thuận tiện cho quá trình mài và đánh bóng, các mẫu sẽ được đúc cùng nhựa epoxy lỏng, sau đó để đóng rắn tự nhiên trong 24 giờ. Các mẫu sau đó được mài bề mặt trên giấy ráp có kích thước từ thô P400 đến mịn P1200. Sau cùng, bề mặt được đánh bóng trên vải nỉ bằng dung dịch chứa Cr₂O₃ để quan sát trên kính hiển vi quang học và hiển vi điện tử quét.

2.3.1.2. Phương pháp chụp ảnh TEM

Kính hiển vi điện tử truyền qua (Transmission Electron Microscopy -TEM) là thiết bị sử dụng chùm điện tử có năng lượng cao chiếu xuyên qua mẫu mỏng và sử dụng các thấu kính điện từ để tạo ảnh với độ phóng đại lớn, ảnh có thể tạo ra trên màn huỳnh quang, hay trên film quang học, hay ghi nhận bằng các máy chụp kỹ thuật số.

Mẫu được cắt từ nón xuyên với đường kính Φ 3 mm và chiều dày 0,5 mm bằng thiết bị cắt dây tia lửa điện. Vị trí lựa chọn mẫu để phân tích cấu trúc trên thiết bị TEM được đưa ra trên hình 2.14.



Hình 2. 14. Vị trí cắt mẫu đo TEM.

Mẫu sau đó được gắn lên trụ thép có kích thước $\Phi 10x5$ mm bằng keo epoxy để mài mỏng trên giấy ráp có kích thước từ thô P400 đến mịn P1200. Mẫu sau khi mài mỏng được kiểm tra sơ bộ trên kính quang học. Nếu độ mỏng đạt yêu cầu (0,01 mm), mẫu sẽ được rung siêu âm trong dung dịch aceton với thời gian 10 phút để làm sạch lớp keo dính epoxy và các tạp chất khác. Sau đó, mẫu tiếp tục được ăn mòn điện hóa trong dung dịch H₃PO₄ (Electrolite D2) trên thiết bị TenuPol-5 (Struers, USA) để đảm bảo chùm điện tử có thể xuyên qua được mẫu.

Các mẫu sau khi đánh bóng bằng ăn mòn điện hóa, được rung siêu âm với thời gian 5 phút trong dung dịch cồn để loại bỏ các tạp chất bám trên bề mặt mẫu. Cuối cùng, mẫu để khô ngoài không khí và mang đi phân tích cấu trúc trên thiết bị hiển vi điển tử truyền qua HR-TEM (JEOL JEM 2100, Nhật Bản). Các bước chuẩn bị mẫu được trình bày tại sơ đồ trên hình 2.15 dưới đây.



Hình 2. 15. Các bước chuẩn bị mẫu khối đo TEM.

2.3.2. Phương pháp xác định cơ lý tính của vật liệu

2.3.2.1. Phương pháp xác định khối lượng riêng

Khối lượng riêng của mẫu nón xuyên được đo bằng phương pháp Archimedes trên thiết bị AND GR-202 của Nhật Bản đặt tại Viện Khoa học vật liệu. Các mẫu được làm sạch bề mặt trước khi đo và được đo trong nước cất tại nhiệt độ phòng (25°C). Khối lượng riêng của mẫu được xác định bởi công thức (2.1):

$$\gamma = \frac{m_{kk}}{m_{kk} - m_{H_20}}$$
(2.1)

Trong đó: γ: Khối lượng riêng (g/cm³)

- m_{kk}: khối lượng của mẫu khi cân trong không khí (g)
- m_{H2O}: khối lượng của mẫu khi cân trong nước (g)

2.3.2.2. Phương pháp đo độ cứng tế vi

Độ cứng tế vi của mẫu nón xuyên được đo trên máy đo độ cứng tế vi (IndentaMet 1106, Buehler USA) tại Viện Khoa học vật liệu. Để đánh giá kết quả đo độ cứng chính xác, các mẫu được thực hiện 5 phép đo tại các vị trí khác nhau trên bề mặt mẫu. Các thông số của phép đo như sau: tải trọng 0,3 kgf đối với các mẫu đồng và 0,2 kgf với các mẫu composite Cu-W, thời gian giữ lực 10 giây. Giá trị độ cứng và mô đun đàn hồi trong luận án là giá trị trung bình của 5 phép đo với sai số của phép đo 2 %.

2.3.3. Phương pháp xác định khả năng đâm xuyên của vật liệu

2.3.3.1. Phương pháp mô phỏng sử dụng phần mềm ANSYS AUTODYN.

a. Giới thiệu phần mềm ANSYS AUTODYN

AUTODYN là một mô đun phân tích dựa trên phương pháp phần tử hữu hạn được tích hợp trong ANSYS Workbench, chuyên dụng để giải các bài toán động lực học phi tuyến đối với mô hình vật rắn, dòng chảy hay khí. Khả năng nổi trội của AUTODYN là:

- Tính toán phần tử hữu hạn đối với bài toán động lực học kết cấu (FE)

- Tính toán các bài toán động lực học dòng chảy tức thời (CFD)

- Tính toán các bài toán biến dạng lớn với vận tốc cao hay các bài toán phá hủy nhanh (SPH)

- Tính toán các bài toán tương tác giữa nhiều trường vật lý (FE–CFD–SPH)

- Hỗ trợ nhiều loại mô hình vật liệu kể cả mô hình nhiệt động học

- Hỗ trợ chức năng tính toán song song và chia sẻ bộ nhớ

Đặc biệt, AUTODYN còn hỗ trợ mô hình vật liệu nổ và thư viện một số loại thuốc nổ. Do đó AUTODYN rất phù hợp để mô phỏng các bài toán về nổ. Trong luận án này sử dụng phần mềm AUTODYN để mô phỏng quá trình hình thành dòng xuyên và xác định vận tốc đầu dòng, chiều sâu xuyên của vật liệu đồng kim loại và composite Cu-W với các thành phần khác nhau được thể hiện qua tỷ trọng của chúng.

b. Phương pháp giải bài toán

Để mô phỏng số quá trình hình thành của dòng xuyên trên modul ANSYS AUTODYN sử dụng giả thuyết như sau:

- Để đơn giản hóa quá trình tính toán, sử dụng mô hình 2D đối xứng qua trục OX;

- Không xét tới tương tác của sản phẩm nổ và vỏ tại biên vùng tính toán;

- Điều kiện biên: biên hở, sử dụng điều kiện biên Flow_out;

- Phương pháp kích nổ: kích nổ bằng điểm nổ;

- Phương pháp chia lưới và cách xác định vận tốc nén ép nón xuyên:

- Lưới sử dụng là Euler, với kích thước lưới 0,8 mm x 0,8 mm.

c. Các bước thực hành mô phỏng

Bước 1: Tạo file lưu dữ liệu và chọn kiểu bài toán mô phỏng.

Bước 2: Xây dựng mô hình vật liệu và các thông số của vật liệu. (vật liệu được chọn trong thư viện của phần mềm phù hợp với mô hình vật liệu xây dựng của bài toán, hoặc tạo mới mô hình vật liệu).

Bước 3: Chọn điều kiện biên

Bước 4: Xây dựng mô hình hình học (chọn kiểu phần tử, kiểu lưới, xây dựng mô hình hình học...) Công việc này được tiến hành trực tiếp trong môi trường làm việc của Ansys AutoDyn -2D. Ở đây sử dụng lưới Euler cho thân vỏ, nón xuyên, thuốc nổ và không khí.

Bước 5: Đặt điều kiện đầu, điều kiện tương tác. Đặt các điều kiện đầu như kích nổ, điều kiện dừng, các giá trị kết quả cần thể hiện....

Bước 6: Tiến hành giải, lấy kết quả và phân tích.

d. Lựa chọn mô hình nghiên cứu

Kết cấu đạn thực tế gồm nhiều bộ phận, chi tiết. Trong phạm vi luận án, để đơn giản hóa bài toán khảo sát, nhưng vẫn không giảm tính tổng quát, xem xét thiết bị nổ lõm có kết cấu gồm 03 phần tử chính gồm: thân vỏ, thuốc nổ và nón xuyên. Để tiện theo dõi, phần lựa chọn các thông số của mô hình sẽ được trình bày trực tiếp tại Mục 4.1 Chương 4.

2.3.3.2. Phương pháp thử nghiệm nổ lõm

Để đánh giá khả năng xuyên của nón xuyên, hệ thống thử nghiệm nổ lõm được thiết lập như hình 2.16. Thiết bị nổ lõm gồm thân làm bằng thép, phía trong có gắn nón xuyên 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 40X có hàm lượng C = 0,38-0,44%, Cr = 0,8-1,1%, đường kính 80 mm và chiều dài 120 mm. Mặt đáy của nón xuyên đặt cách mặt bia thép một khoảng cách là 22mm. Bia thép và thiết bị nổ lõm được định vị cố định với nhau bằng vít phía sau bia thép, đảm bảo cho việc khối nổ lõm 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 đồng tạo thành dòng kim loại ở thể rắn, di chuyển xuyên vào bia thép với vận tốc siêu cao, tạo một lỗ xuyên trong bia thép. Sau mỗi một lần nổ, bia thép được lấy ra, cắt xẻ đôi theo chiều dọc, chính giữa lỗ xuyên để quan sát, chụp ảnh và đo chiều sâu xuyên. Mỗi một loại nón xuyên được thử nổ hai lần, chiều sâu xuyên thép của mỗi một loại nón xuyên là giá trị trung bình của hai lỗ xuyên.



Hình 2. 16. Sơ đồ hệ thống thử nghiệm nổ lõm.

2.4. Kết luận Chương 2

Chương 2 mô tả về vật tư thí nghiệm, các phương pháp và quy trình tạo mẫu cho nghiên cứu, cũng như các phương pháp và thiết bị nghiên cứu. Trong đó:

Xây dựng được quy trình chế tạo mẫu nón xuyên bằng 2 phương pháp: (i)
 dập nguội từ vật liệu đồng tấm; (ii) thiêu kết SPS từ bột đồng hoặc hỗn hợp bột Cu W, sau đó kết hợp với miết biến dạng dẻo.

 Sử dụng các phương pháp phân tích cấu trúc bằng hiển vi quang học, SEM, TEM, phương pháp đo độ cứng tế vi, khối lượng riêng, độ bền kéo để xác định tính chất đặc trưng của vật liệu.

- Nghiên cứu ứng dụng được phần mềm ANSYS AUTODYN để dự đoán vận tốc dòng xuyên, chiều dài dòng xuyên và chiều sâu xuyên thép của vật liệu.

- Xây dựng và chế tạo được thiết bị nổ lõm để xác định chiều sâu xuyên của vật liệu.

CHƯƠNG 3. CHẾ TẠO, TÍNH CHẤT VÀ ĐẶC TÍNH XUYÊN NỖ LÕM CỦA ĐỒNG KIM LOẠI CẤU TRÚC SIÊU MỊN

3.1. Chế tạo nón xuyên kim loại có cấu trúc siêu mịn.

Để chế tạo nón xuyên kim loại, luận án sử dụng hai phương pháp sau đây: (i) Chế tạo nón xuyên kim loại từ đồng tấm bằng phương pháp dập nguội; (ii) Chế tạo nón xuyên kim loại từ bột đồng bằng phương pháp thiêu kết dòng xung plasma. Sơ đồ khối các công đoạn chế tạo nón xuyên theo cả hai phương pháp được trình bày tại hình 3.1.



Hình 3. 1. Sơ đồ khối các công đoạn chế tạo nón xuyên theo hai phương pháp.*3.1.1. Chế tạo nón xuyên bằng phương pháp dập nguội.*





Trên hình 3.2 là hình ảnh chế tạo nón xuyên bằng phương pháp dập nguội. Quy trình chế tạo nón xuyên từ đồng tấm bằng phương pháp dập nguội đã được mô tả trong Mục 2.2.2, Chương 2. Sau khi dập nguội, đối với nón xuyên mà không phải qua công đoạn miết để làm nhỏ mịn hạt cấu trúc, nón xuyên sẽ được gia công cơ khí để đạt kích thước sau cùng của nón xuyên được trình bày tại hình 2.7.

3.1.2. Chế tạo nón xuyên bằng phương pháp thiêu kết xung điện plasma.

Nón xuyên chế tạo bằng phương pháp luyện kim bột sử dụng kỹ thuật thiêu kết bằng xung điện plasma được mô tả tại Mục 2.2.2 Chương 2. Bột đồng nguyên liệu sử dụng là bột đồng điện phân kích thước hạt bột trong khoảng 44-74 µm. Giản đồ nhiệt và chân không tại công đoạn thiêu kết SPS được trình bày tại hình 3.3. Sau khi thiêu kết xung điện plasma, đối với nón xuyên mà không phải qua công đoạn miết để làm nhỏ mịn hạt cấu trúc, nón xuyên sẽ được gia công cơ khí để đạt kích thước sau cùng của nón xuyên được trình bày tại hình 2.7.



Hình 3. 3. Giản đồ nhiệt, chân không thiêu kết SPS nón xuyên (a), Khuôn graphit (b) và hình ảnh nón xuyên sau khi thiêu kết SPS (c).

3.1.3. Miết nón xuyên sau khi dập nguội và sau thiêu kết SPS.

Để có vật liệu nón xuyên với cấu trúc hạt nhỏ mịn, nón xuyên sau dập nguội hoặc sau khi thiêu kết bằng SPS được gia công miết trên thiết bị miết đặc chủng tại Nhà máy Z117 – Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng. Nguyên lý miết được mô tả tại Mục 2.2.2, Chương 2.

3.2. Cấu trúc và tính chất đặc trưng của vật liệu nón xuyên chế tạo bằng phương pháp dập nguội và thiêu kết xung điện plasma

Để quan sát cấu trúc và cơ tính của vật liệu nón 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 nón, sau đó mài, đánh bóng và tẩm thực theo quy trình được mô tả tại Mục 2.2.3, Chương 2. Để xác định sự thay đổi độ cứng sau mỗi lần miết, mặt mẫu được ký hiệu từ vị trí 1 đến vị trí 5 (tương ứng từ mặt trong của nón ra mặt ngoài của nón) sẽ được thực hiện đo độ cứng Vickers tại các vị trị trên. Hình 3.4 thể hiện vị trí mẫu cắt được lựa chọn.



Hình 3. 4. Vị trí cắt mẫu để quan sát cấu trúc và đo độ cứng của nón xuyên.

3.2.1. Cấu trúc và tính chất đặc trưng của vật liệu nón xuyên chế tạo bằng phương pháp dập nguội.

3.2.1.1. Cấu trúc của vật liệu nón xuyên dập nguội.

Quan sát ảnh hiển vi quang học (OM) cấu trúc của mẫu nón xuyên dập nguội và mẫu nón xuyên dập nguội kết hợp với miết sau khi tẩm thực như được thấy trên hình 3.5. Đối với mẫu đồng dập nguội, cấu trúc gồm các hạt đa tinh thể có kích thước từ vài chục đến hàng trăm µm, hình dạng đa cạnh với kích thước khác nhau (Hình 3.5a). Tuy nhiên, khi quan sát trên mẫu đồng dập nguội kết hợp với miết (hình 3.5b) có thể thấy, các hạt cấu trúc có xu hướng phát triển kích thước theo một chiều và giảm kích thước chiều còn lại. Ngoài ra, trong mẫu đồng sau miết này, có sự xuất hiện của các hạt nhỏ nằm trong các hạt lớn có kích thước tương đối mịn. Để

có thể quan sát rõ hơn, các mẫu đồng sẽ được quan sát trên ảnh hiển vi điện tử quét SEM với độ phóng đại cao hơn (2K và 20K) được trình bày trên hình 3.6.



Hình 3. 5. Ảnh hiển vi quang học mẫu nón xuyên dập nguội (a) và mẫu nón xuyên dập nguội kết hợp với miết (b)



Hình 3. 6. Ảnh SEM mẫu nón xuyên dập nguội (a-c) và mẫu nón xuyên dập nguội kết hợp với miết (b-d) với độ phóng đại khác nhau

Từ kết quả phân tích ảnh OM và SEM trên hình 3.5 và 3.6 có thể thấy, hai mẫu nón xuyên dập nguội và dập nguội kết hợp với miết có sự khác nhau về cấu trúc. Mẫu đồng dập nguội có cấu trúc đa tinh thể, bao gồm các hạt có kích thước lớn và nhỏ. Điều này là do mẫu đồng dập nguội được chế tạo qua quá trình đúc-cán, nên kích thước hạt cấu trúc sau quá trình kết tinh, kết tinh lại thường rất lớn, tương tự như quan sát được trong các nghiên cứu trước đây [70, 76, 104]. Ngược lại, với mẫu

đồng dập nguội kết hợp với miết biến dạng, trong mỗi hạt đa tinh thể chứa nhiều hạt nhỏ mịn với kích thước dưới 1 µm tạo ra các siêu hạt (subgrains). Kết quả này tương tự như kết quả đã được thực hiện bởi Hoseini và nhóm nghiên cứu [76] khi nghiên cứu cấu trúc và tính chất cơ của kim loại đồng C11000 biến dạng bằng phương pháp miết theo các hướng quay khác nhau (shear spining). Kết quả đã chỉ ra, sau quá trình miết biến dạng, hình dạng hạt đồng sẽ tạo thành các tấm dẹt dài và làm nhỏ mịn kích thước hạt.

3.2.1.2. Cơ-lý tính của vật liệu nón xuyên dập nguội.

Kết quả đo độ cứng và khối lượng riêng của mẫu nón xuyên dập và biến dạng miết được trình bày trên hình 3.7.



Hình 3. 7. Sự thay đổi độ cứng và khối lượng riêng của mẫu nón xuyên dập và sau khi biến dạng miết

Kết quả cho thấy, với phương pháp dập, độ cứng của mẫu thu được 114,3 HV, sau khi mẫu được miết lần 1 độ cứng tăng lên 116,6 HV và tiếp tục tăng lên và đạt giá trị 119,4 HV đối với miết lần 2. Kết quả này được cho là do quá trình miết đã tạo được cấu trúc siêu hạt nhỏ mịn bên trong các hạt lớn sau khi gia công miết, dẫn đến tăng biên hạt và cải thiện cơ tính của vật liệu.

Trong khi đó, khối lượng riêng của mẫu đồng gần như không thay đổi, có giá trị 8,95 g/cm³, xấp xỉ khối lượng riêng theo lý thuyết (8,96 g/cm³, mật độ xít chặt trên 99%) trong suốt quá trình biến dạng. Điều này là do việc sử dụng phôi đồng tấm chế tạo bằng phương pháp đúc và cán có độ xít chặt gần như hoàn toàn. Do

vậy, quá trình biến dạng bằng phương pháp miết không làm tăng khối lượng riêng hay mật độ xít chặt cho mẫu nón xuyên.

3.2.2. Cấu trúc và tính chất đặc trưng của vật liệu nón xuyên chế tạo bằng phương thiêu kết xung điện plasma.

3.2.2.1. Cấu trúc của nón xuyên chế tạo bằng phương pháp thiêu kết SPS.

Trước hết, các mẫu nón xuyên thiêu kết SPS và mẫu thiêu kết SPS kết hợp với gia công miết được quan sát trên kính hiển vi quang học (hình 3.8). Tương tự như đối với mẫu nón xuyên chế tạo bằng phương pháp dập nguội, cấu trúc của mẫu chế tạo bằng thiêu kết SPS cũng là các hạt đa tinh thể. Còn với mẫu đồng thiêu kết SPS kết hợp với miết có cấu trúc gồm các hạt có dạng dẹt và dài.



Hình 3. 8. Ảnh OM mẫu nón xuyên thiêu kết SPS (a) và mẫu nón xuyên thiêu kết SPS kết hợp với miết (b).

Tuy nhiên, do ảnh hiển vi quang học có độ phóng đại thấp nên rất khó có thể quan sát được các hạt nhỏ bên trong. Do đó, quan sát cấu trúc bề mặt của các mẫu nón xuyên sẽ được thực hiện trên thiết bị hiển vi điện tử quét (SEM), được chỉ ra trên hình 3.9. Kết quả quan sát trên SEM cho thấy, các mẫu đồng thiêu kết SPS (Hình 3.9a-c) có các hạt đa tinh thể với hình dạng đa cạnh, bên trong các hạt lớn có chứa các hạt nhỏ mịn. Ngoài ra, quan sát trên bề mặt mẫu này còn thấy sự xuất hiện của các lỗ xốp, điều này chứng tỏ rằng mẫu nón xuyên sau thiêu kết SPS vẫn chưa đạt được mật độ xít chặt hoàn toàn. Với các mẫu nón xuyên thiêu kết SPS kết hợp với miết, các hạt cấu trúc có hình dạng dẹt dài, giống như trên ảnh hiển vi quang học (Hình 3.8). Tuy nhiên, quan sát trên ảnh SEM (Hình 3.9b-d) dễ dàng nhận thấy bên trong các hạt lớn dẹt có các hạt nhỏ mịn, tương tự như quan sát các mẫu đồng chế tạo bằng phương pháp dập kết hợp với miết (Hình 3.6c-d).



Hình 3. 9. Ảnh SEM mẫu nón xuyên thiêu kết SPS (a-c) và mẫu nón xuyên thiêu kết SPS kết hợp với miết (b-d) với độ phóng đại khác nhau

3.2.2.2. Cơ-lý tính của nón xuyên thiêu kết SPS.



Hình 3. 10. Khối lượng riêng và độ cứng Vickers của mẫu nón xuyên thiêu kết SPS và sau khi biến dạng miết.

Trên hình 3.10 trình bày kết quả đo độ cứng Vickers và khối lượng riêng các mẫu đồng thiêu kết SPS và sau miết lần 1 và miết lần 2. Kết quả đo độ cứng

Vickers của mẫu nón xuyên thu được giống xu hướng kết quả đo khối lượng riêng, giá trị độ cứng tăng sau các lần miết biến dạng. Cụ thể, mẫu nón xuyên sau khi thiêu kết SPS có độ cứng 105,9 HV, tăng lên 112,1 HV sau khi miết lần 1 và 118,4 HV sau miết lần 2. Sự tăng độ cứng sau khi miết biến dạng có thể là do sự nhỏ mịn kích thước hạt hay việc tăng mật độ xịt chặt của mẫu nón xuyên sau khi miết. Kết quả đã chỉ ra, khi tăng số lần miết thì độ cứng của mẫu tăng lên và giá trị độ cứng sau khi miết đã tăng 13,22 % so với giá trị độ cứng của mẫu trước khi chưa miết biến dạng. Thêm vào đó, sự đồng đều về độ cứng tế vi sau khi miết được cải thiện rõ rệt.

Đối với khối lượng riêng của mẫu nón xuyên thiêu kết SPS được xác định là 8,89 g/cm³, sau khi miết lần 1 và lần 2 khối lượng riêng của mẫu tăng lên lần lượt là 8,91 và 8,92 g/cm³. Hay nói cách khác, mật độ xít chặt của mẫu sau khi thiêu kết SPS đạt 99,2 % và sau khi miết lần 1 và lần 2 tăng lên lần lượt là 99,4% và 99,6 %. Kết quả này phù hợp với kết quả đã chỉ ra trên ảnh SEM (Hình 3.9), mẫu sau khi thiêu kết sPS vẫn còn tồn tại một số lỗ xốp do quá trình thiêu kết chưa đạt độ xít chặt hoàn toàn, sau mỗi lần miết biến dạng, các lỗ xốp dần được triệt tiêu dẫn đến độ xít chặt tăng lên.

3.2.3. Sự thay đổi cấu trúc của vật liệu nón xuyên sau khi miết biến dạng.

Sự thay đổi tổ chức của vật liệu kim loại trong quá trình biến dạng dẻo đã được nghiên cứu rộng rãi từ nhiều thập kỷ trước. Xue và công sự [105] đã nghiên cứu cơ chế làm mịn cấu trúc đồng bằng kỹ thuật ép qua kênh gấp khúc tiết diện không đổi (Equal Channel Angular Pressing, ECAP) với tốc độ biến dạng 6,53 mm/s đối với vật liệu đồng thanh có đường kính 9,5 mm và chiều dài 50 mm. Kết quả ảnh TEM cho thấy cấu trúc nhỏ mịn của vật liệu được tạo ra như sau: ban đầu lệch được phân bố ngẫu nhiên, sau đó tích tụ biên lệch, tiếp theo là tạo cấu trúc tấm dẹt dài. Đặc điểm của cấu trúc tấm dẹt dài có biên lệch góc thấp (<15 °).

Trong một nghiên cứu khác của Wang [106] đã chỉ ra kích thước hạt cấu trúc của hợp kim nhôm 3003 giảm xuống sau mỗi lần miết. Cụ thể, kích thước hạt của mẫu giảm từ 48,6 μm (kích thước ban đầu của hợp kim nhôm) xuống 7,17 μm

sau khi miết lần 1 và tiếp tục giảm xuống 4,91 μm sau miết lần 2. Nếu tiếp tục miết lặp lại thì kích thước hạt trung bình giảm xuống còn khoảng 3,77 μm.

Qua các nghiên cứu thực nghiệm [105, 107] đã chỉ ra, khi biến dạng dẻo, lệch dần tích tụ thành các biên lệch. Các biên lệch này lúc đầu có góc lệch thấp, nhưng dần thành những biên góc lớn, tạo nên các siêu hạt (subgrain) trong chính các hạt ban đầu. Đối với biến dạng nhỏ và trung bình, các biên lệch này có dạng hình ô khối [108]. Còn với biến dạng lớn hơn, sự phát triển này dẫn tới cấu trúc từ ô khối (Hình 3.11 a) thành cấu trúc dẹt dài (Hình 3.11 b).



Hình 3. 11. Mô hình cấu trúc khi biến dạng nhỏ (a) và biến dạng lớn (b)[108].

3.2.3.1. Biến đổi cấu trúc của nón xuyên chế tạo bằng phương pháp dập + miết



Hình 3. 12. Ảnh TEM mẫu nón xuyên dập sau miết lần 1 (a) và miết lần 2 (b)
Trên hình 3.12 trình bày kết quả chụp TEM mẫu cấu trúc nón xuyên dập, sau đó miết biến dạng lần 1 và lần 2. Đối với mẫu nón xuyên dập sau miết lần 1 đã thấy sự xuất hiện của các lệch, tuy nhiên vẫn còn thấy sự tồn tại của các biên hạt (hình 3.12 a). Kết quả này có thể là do ban đầu hạt đa tinh thể liền nhau có định hướng khác nhau vì vậy lệch rất khó thay đổi đột biến mặt trượt khi vượt qua biên giới hạt. Do đó, lệch chỉ có thể chuyển động tự do trong hạt. Khi tiếp tục biến dạng bằng miết lần 2, đã thấy xuất hiện nhiều các dải lệch và có sự tập trung của lệch nhiều hơn (hình 3.12 b). Hay nói cách khác, mật độ lệch sau khi miết lần 2 được tăng lên.

Quá trình biến dạng dẻo làm thay đổi rất mạnh cấu trúc và cơ tính của vật liệu cũng như kim loại. Trong và sau khi trượt, mạng tinh thể ở xung quanh mặt trượt bị xô lệch, các hạt bị biến dạng không đều, song đều có khuynh hướng bị kéo dài và dẹt ra theo phương biến dạng. Với độ biến dạng ε lớn (40 - 50%) hạt bị phân nhỏ, kéo dài ra, tạo nên thớ (độ biến dạng ε thường được tính bằng độ giảm của tiết diện phôi khi biến dạng dẻo theo công thức (3.1):

$$\varepsilon = \frac{S_0 - S_f}{S_0} 100\% \tag{3.1}$$

Trong đó, S₀ và S_f là tiết diện phôi trước và sau khi biến dạng dẻo. Khi độ biến dạng rất lớn (70-90%, ít gặp) các hạt bị quay đến mức các mặt và phương mạng cùng chỉ số của chúng trở nên song song với nhau, tạo nên cấu trúc được gọi là textua (texture). Khi kim loại có textua nó sẽ có tính dị hướng. Textua tạo nên trong trường hợp này được gọi là textua biến dạng. Sau biến dạng dẻo trong kim loại tồn tại ứng suất dư do xô lệch mạng và biến dạng không đều giữa các hạt cũng như trên tiết diện. Ngoài ra, cơ tính kim loại thay đổi rất nhiều theo chiều hướng tăng độ cứng và độ bền do mạng tinh thể bị xô lệch.

Để có thể hiểu rõ hơn ảnh hưởng của mỗi lần miết biến dạng đến độ cứng của mẫu, trong nghiên cứu này, các mẫu nón xuyên được tiến hành đo độ cứng tế vi tại các vị trí từ bề mặt bên trong ra bề mặt bên ngoài nón xuyên, tương ứng với các vị trí đo từ mặt trong mẫu là 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 và 0,9 mm. Kết quả sự thay đổi độ cứng tại các vị trí đo khác nhau của mẫu nón xuyên được chỉ ra trên hình 3.13.

Hình 3.13 cho thấy, độ cứng tế vi của mẫu nón xuyên dập có sự chênh lệch lớn tại các vị trí đo. Tại vị trí đo độ cứng tế vi cách mặt trong của nón xuyên dập

0,9 mm có giá trị cao nhất là 113,2 HV và giảm dần theo hướng từ mặt ngoài của nón xuyên vào mặt trong của nón. Giá trị độ cứng nhỏ nhất là 73,9 HV tại vị trí đo cách mặt trong của mẫu nón xuyên 0,3 mm (do quá trình dập lớp kim loại càng gần mặt ngoài sẽ chịu biến dạng uốn được kéo dãn và biến cứng nhiều hơn), sau đó độ cứng lại có xu hướng tăng lên tại vị trí đo cách bề mặt trong của mẫu nón xuyên 0,1 mm. Khi mẫu nón xuyên dập được miết biến dạng lần 1, đã cho thấy có sự phân bố độ cứng đồng đều hơn so với mẫu không qua công đoạn miết biến dạng. Giá trị độ cứng cao nhất (~114,3 HV) cũng thu được tại vị trí đo cách mặt trong của mẫu 0,9 mm và thấp nhất là 103,8 HV tại vị trí đo cách mặt trong của mẫu 0,5 mm (do quá trình miết lớp kim loại xa bánh miết và trục miết sẽ được biến dạng ít hơn nên độ cứng sẽ giảm).



Hình 3. 13. Độ cứng tế vi của mẫu nón xuyên dập và sau khi miết biến dạng tại các vị trí khác nhau.

Nếu mẫu nón xuyên dập tiếp tục được miết lần 2, giá trị độ cứng đã cho thấy sự đồng đều tại tất cả các vị trí đo của mẫu, giá trị độ cứng không có sự thay đổi nhiều (khoảng vài HV, tương đương với sai số của phép đo). Độ cứng cao nhất vẫn thu được tại vị trí đo cách mặt trong mẫu 0,9 mm và thấp nhất tại vị trị đo cách mặt trong mẫu 0,9 mm và thấp nhất tại vị trị đo cách mặt trong mẫu 0,1 mm, tương ứng với các giá trị lần lượt là 118,1 HV và 111,6 HV (do quá trình miết chiều dày thành nón xuyên giảm, lớp kim loại giữa thành nón cũng được biến dạng làm độ cứng đồng đều hơn). Như vậy, tại các vị trí đo gần mặt trong và mặt ngoài đều có giá trị độ cứng cao hơn các vị trí liền kề, điều này có thể là do đã có sự biến dạng nhất định đối với bề mặt của mẫu nón xuyên ở cả 2 mặt của mẫu nón.

Thêm vào đó, các kết quả thu được ở trên còn cho thấy quá trình biến dạng bằng phương pháp miết đã ảnh hưởng tới cơ tính (độ cứng) của mẫu nón xuyên.

Đặc biệt là các vị trí gần bề mặt ngoài mẫu phễu có sự biến dạng mạnh, dẫn đến độ cứng cao với tất cả các mẫu nón xuyên. Kết quả này là do trong quá trình biến dạng đã làm nhỏ mịn kích thước hạt nên số lượng biên hạt lớn, nhờ đó có thể chống lại sự chuyển động của lệch là nguyên nhân làm tăng độ cứng cho mẫu.

3.2.3.2. Nón xuyên chế tạo bằng phương pháp luyện kim bột

Kết quả ảnh TEM mẫu nón xuyên thiêu kết SPS sau khi miết lần 1 và sau khi miết lần 2 được đưa ra trên hình 3.14.





Quan sát trên mẫu thiêu kết SPS kết hợp với miết lần 1 (hình 3.14a) đã thấy xuất hiện biên giới siêu hạt cùng với các siêu hạt (subgrain) với kích thước khoảng vài chục đến vài trăm nm. Biên giới siêu hạt thực chất là các tường lệch, tạo lên do những lệch cùng dấu tương tác lẫn nhau khi chúng trượt trên những mặt trượt song song và giữ nhau ở vị trí cần bằng. Còn siêu hạt ở đây là những vùng tinh thể nhỏ với cấu trúc tinh thể khá hoàn chỉnh, định hướng lệch nhau một góc nhỏ, ngăn cách bằng biên giới siêu hạt. Ngoài ra, còn quan sát thấy sự tập trung của lệch đối với mẫu nón xuyên miết lần 1.

Khi mẫu nón xuyên tiếp tục được miết biến dạng lần 2, biên giới siêu hạt và các siêu hạt với kích thước nhỏ hơn so với mẫu miết lần 1 được hình thành và xuất hiện nhiều vùng tập trung các lệch (hình 3.14 b). Bên cạnh đó, quan sát cũng cho thấy, mật độ lệch sau khi miết lần 2 cũng tăng nên khoảng cách giữa các lệch giảm, các lệch gần nhau hơn nên dễ tạo ra một tập hợp lệch. Tập hợp này sẽ sinh ra trường ứng suất đàn hồi vừa tác dụng ngược lại, giải tán nguồn lệch trong hạt, vừa kích thích nguồn ở các hạt lân cận hoạt động trong quá trình biến dạng.

Độ cứng tế vi của mẫu nón xuyên thiêu kết SPS và sau khi miết biến dạng tại các vị trí đo khác nhau được thể hiện trên hình 3.15. Tương tự như xu hướng đối với các mẫu nón xuyên dập, mẫu nón xuyên thiêu kết SPS cũng có sự chênh lệch độ cứng lớn tại các vị trí đo. Sự chênh lệch độ cứng lên đến 37 % giữa vị trí có độ cứng cao nhất (~97,5 HV, cách mặt trong mẫu 0,9 mm) và vị trí có độ cứng thấp nhất (~ 61,4 HV, cách mặt trong mẫu 0,3 mm do quá trình thiêu kết độ xít chặt giữa các hạt vẫn chưa được hoàn toàn). Còn mẫu đồng thiêu kết SPS kết hợp với miết lần 1 và miết lần 2 đã thấy độ cứng có sự đồng đều hơn, chênh lệch về độ cứng trong trường hợp này lần lượt là 13,1 % và 12,4 %.



Hình 3. 15. Độ cứng tế vi của mẫu nón xuyên thiêu kết SPS và sau khi miết biến dạng tại các vị trí khác nhau.

Thêm vào đó, dễ nhận thấy độ cứng của mẫu nón xuyên sau miết lần 2 cao hơn so với miết lần 1 và mẫu đồng thiêu kết SPS không miết biến dạng tại tất cả các vị trí. Cụ thể, tại vị trí cách mặt trong mẫu 0,9 mm, mẫu đồng được miết lần 2 đạt giá trị độ cứng là 116,4 HV, trong khi mẫu đồng miết lần 1 và mẫu sau khi thiêu kết SPS không miết đạt giá trị độ cứng lần lượt là 106,9 HV và 97,5 HV. Còn giá trị độ cứng thấp nhất của cả 3 mẫu nón xuyên đều thu được tại vị trị cách mặt trong 0,3 mm, với các giá trị lần lượt là 101,9, 92,9 và 61,4 HV tương ứng với các mẫu miết lần 2, mẫu miết lần 1 và mẫu sau thiêu kết SPS. Ngoài ra, giá trị độ cứng của mẫu ở mặt trong và mặt ngoài đều có giá trị cao hơn so với vị trị liền kề, tương tự như kết quả đo độ cứng trên mẫu nón xuyên dập (Hình 3.13).

Như vậy, sau biến dạng, tổ chức của các mẫu nón xuyên bị thay đổi, tổ chức sẽ không còn các hạt đa cạnh như ban đầu, mà các hạt bị biến dạng không

đều (do các hệ trượt định hướng khác nhau). Phần lớn các hạt đều bị biến dạng dài theo phương lực tác dụng (phương miết). Khi kết thúc quá trính biến dạng, mạng tinh thể bị xô lệch với mật độ lệch cao, tồn tại ứng suất dư bên trong. Bên cạnh đó, các siêu hạt được hình thành với kích thước nhỏ mịn nên tạo ra nhiều biên hạt cản trở sự chuyển động của lệch và chống lại sự xô lệch mạng, cải thiện cơ tính cho mẫu nón xuyên.

3.3. Kết quả thử nổ lõm của các mẫu nón xuyên chế tạo

Để đánh giá khả năng xuyên của nón xuyên, hệ thống thử nghiệm nổ lõm được thiết lập như đã trình bày trong Chương 2. 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 nón xuyên đặt cách mặt bia thép một khoảng cách là 22 mm. Bia thép và lượng nổ lõm được định vị cố định với nhau bằng vít phía sau bia thép, đảm bảo cho việc lượng nổ lõm 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 nón xuyên tạo thành tia (jet) kim loại ở thể rắn, di chuyển xuyên vào bia thép tưới vận tốc siêu cao, tạo một lỗ xuyên trong bia thép. Sau mỗi một lần nổ, bia thép được lấy ra, cắt xẻ đôi theo chiều dọc, chính giữa lỗ xuyên để đo chiều sâu xuyên, quan sát và chụp ảnh. Mỗi một loại nón xuyên được thử nổ hai lần, chiều sâu xuyên thép của mỗi một loại nón xuyên là giá trị trung bình của hai lỗ xuyên. Bảng số liệu đo chiều sâu xuyên của các loại nón xuyên khi thử nổ được trình bày tại bảng 3.1.

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

Bảng 3. 1. Số liệu chiều sâu xuyên đo được của các loại nón xuyên khi thử.

Theo (bảng 3.1) thấy rằng, chiều sâu xuyên của nón xuyên 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 nón xuyên chế tạo bằng phương pháp thiêu kết SPS, cao nhất là chiều sâu xuyên của nón xuyên 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 nón xuyên 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 nón xuyên SPS, công đoạn miết làm tăng chiều sâu xuyên sâu xuyên của nón xuyên sâu xuyên thêm 14,9% so với phễu SPS ban đầu, do chiều sâu xuyên của nón xuyên SPS đã cao hơn chiều sâu xuyên của nón xuyên dập nguội là 41%. Kết quả cũng cho thấy, chiều sâu xuyên của cả hai loại nón xuyên 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.

Trên hình 3.16 là hình ảnh mặt cắt lỗ xuyên trên bia thép khi thử nghiệm nổ lõm sử dụng 4 loại nón xuyên.



Hình 3. 16. Hình ảnh mặt cắt lỗ xuyên của các loại nón xuyên khác nhau.

Ngoài ra, chiều sâu xuyên của nón xuyên chế tạo bằng phương pháp thiêu kết SPS lớn hơn nhiều so với chiều sâu xuyên của nón xuyên chế tạo bằng phương pháp dập là do nón xuyên chế tạo bằng phương pháp thiêu kết SPS có cấu trúc được di truyền từ bột đồng nguyên liệu, với các hạt nhỏ mịn khoảng 1 µm bên trong các hạt tinh thể lớn. Điều này sẽ được minh họa qua hình 3.17:



Hình 3. 17. Mô hình di truyền cấu trúc hạt từ bột đồng điện phân sang vật liệu đồng khối chế tạo từ bột đồng bằng phương pháp thiêu kết SPS

Có thể thấy, hạt bột điện phân ban đầu là các tinh thể hạt lớn (hạt cấp 1) dạng nhánh cây, bên trong chứa các hạt tương đối nhỏ mịn (hạt cấp 2). Khi bột đồng điện phân được thiêu kết SPS, ngoài việc hình thành các biên hạt của hạt cấp 1 thì bên trong mỗi các hạt này lại xuất hiện các biên hạt của hạt cấp 2. Vì vậy, cấu trúc của mẫu đồng thiêu kết bằng SPS có nhiều biên hạt hơn so với cấu trúc của đồng dập. Ngoài ra, các nghiên cứu [70, 71, 108, 109] đều chỉ ra rằng, chiều sâu xuyên tăng lên khi kích thước hạt cấu trúc của nón kim loại giảm, hay nói cách khác là khi số lượng biên giới hạt trong cấu trúc tăng lên. Điều này cũng giải thích việc tăng khả năng xuyên của mẫu nón xuyên thiêu kết SPS so với mẫu nón xuyên dập.

Bên cạnh đó, hiện tượng sau khi miết, chiều sâu xuyên của nón xuyên 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 [25] đã đi đến kết luận, sự biến dạng của nón xuyên trong lượng nổ lõm 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 10⁴.ms⁻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 dòng kim loại dài hơn, không bị đứt gãy. Quá trình biến dạng dẻo trong kim loại có thể được biểu diễn theo mô hình sau:



Hình 3. 18. Mô hình biến dạng hạt thô: a) Trước biến dạng; b) Sau biến dạng

Cấu trúc của mẫu nón xuyên không được miết biến dạng sẽ không có các siêu hạt, hơn nữa các hạt lớn lại có định hướng tinh thể khác nhau, xác suất định hướng thuận lợi với phương tác động là thấp. Vì vậy, khi biến dạng có hạt lớn được biến dạng dễ dàng, nhưng sẽ có các hạt khó biến dạng, do đó sẽ dễ hình thành các vết nứt tế vi (hình 3.18), làm cho dòng kim loại dễ bị ngắt quãng. Còn đối với cấu trúc mẫu nón xuyên được biến dạng bằng miết, sẽ có nhiều siêu hạt được hình thành, trong mỗi siêu hạt này lại có định hướng tinh thể khác nhau, làm cho xác suất định hướng phương trượt của lệch trùng với phương tác động của lực sẽ cao, điều này tạo điệu kiện cho hạt lớn nào cũng được biến dạng (hình 3.19). Do đó, sẽ hạn chế việc hình thành các vết nứt tế vi xuất hiện bên trong mẫu, làm cho dòng kim loại được dài hơn, làm tăng chiều sâu xuyên của nón xuyên.



Hình 3. 19. Mô hình biến dạng hạt mịn và siêu mịn: a) trước biến dạng; b) sau khi biến dạng

3.4. Kết luận Chương 3

Trong chương này, đã chế tạo mẫu nón xuyên bằng phương pháp dập nguội + miết và phương pháp thiêu kết SPS + miết, trong đó:

 - Đã phát hiện thấy cấu trúc của vật liệu đồng chế tạo từ bột đồng điện phân, thiêu kết bằng kỹ thuật SPS gồm các hạt lớn, kích thước từ vài chục đến hàng trăm μm, bên trong các hạt lớn là các hạt nhỏ kích thước khoảng 1 -2 μm.

- Khi gia công miết cơ học, đã tạo ra siêu hạt cấu trúc ở cả nón xuyên dập và nón xuyên chế tạo từ bột đồng điện phân thiêu kết bằng phương pháp SPS. Siêu hạt cấu trúc này do chuyển động và tích tụ của lệch hình thành, có kích thước khoảng 100-300 nm.

- Độ cứng của mẫu nón xuyên chế tạo theo hai phương pháp dập nguội và thiêu kết bột Cu bằng SPS đều tăng khi miết, đạt được độ đồng đều trong toàn chiều dày nón xuyên sau lần miết thứ hai. Khối lượng riêng của mẫu nón xuyên thiêu kết SPS cũng tăng theo số lần miết, đạt gần với tỷ trọng lý thuyết sau lần miết thứ hai, còn đối với mẫu nón xuyên dập là không thay đổi.

- Nón xuyên chế tạo bằng phương pháp thiêu kết SPS từ bột đồng xuyên sâu hơn 41% so với nón xuyên chế tạo bằng phương pháp dập nguội. Công đoạn miết nón xuyên sau khi thiêu kết SPS làm tăng thêm được gần 15% so với nón xuyên không miết.

CHƯƠNG 4. CHẾ TẠO, TÍNH CHẤT VÀ ĐẶC TÍNH XUYÊN NỔ LÕM CỦA ĐỒNG COMPOSITE W-CU CẤU TRÚC SIÊU MỊN

4.1. Nghiên cứu ảnh hưởng của hàm lượng W đến khả năng xuyên của nón xuyên bằng phần mềm mô phỏng

Như đã trình bày trong phần tổng quan, chiều sâu xuyên *P* của lượng nổ lõm trên một loại bia xác định sẽ phụ thuộc vào chiều dài dòng kim loại tạo thành sau khi phản ứng nổ xảy ra và khối lượng riêng của nón kim loại theo công thức (1.3):

$$P = L * (\lambda * \rho_t / \rho_t)^{1/2}$$
(1.3)

Trong đó *L* là chiều dài dòng kim loại, ρ_j là khối lượng riêng của nón kim loại, ρ_t là khối lượng riêng của vật liệu làm bia và λ là hệ số liên quan đến chiều dài dòng kim loại và có giá trị nằm trong khoảng 1 đến 2.

Như vậy với một bài toán cụ thể đã có khối lượng riêng ρ_j của nón kim loại và khối lượng riêng ρ_t của vật liệu làm bia. Và do đó chiều sâu xuyên *P* sẽ phụ thuộc vào chiều dài dòng kim loại *L*. Chiều dài *L* ngoài phụ thuộc vào bản chất vật liệu làm nón thì còn phụ thuộc nhiều yếu tố như lượng thuốc nổ, loại thuốc nổ, cấu trúc thân vỏ của lượng nổ lõm...

Trong bài toán mô phỏng này, cấu trúc của nón, lượng nổ lõm và bia thép như thấy trong hình 4.1. Kết cấu của lượng nổ lõm 03 phần tử chính: thân vỏ (1); thuốc nổ (2), nón kim loại (3). Thân vỏ có dạng hình trụ, được thiết kế từ vật liệu thép 40Cr (có các tính chất tương đương với thép STELL-4340 trong ngân hàng dữ liệu của phần mềm mô phỏng) với đường kính ngoài D, chiều dài L, bề dày đáy t₁, bề dày phần trụ t₂. Khối thuốc nổ A-IX-1 có dạng hình trụ, đường kính *d*, chiều cao *l*. Nón kim loại, dạng nón, có chiều cao *h*, các bán kính ngoài và trong lần lượt là R_1 , R_2 , có bề dày tại đỉnh δ_1 ;bề dày tại phần miệng δ_2 , tâm chỏm cầu nằm trên trục đối xứng của phần chiến đấu (khối thuốc nổ). Tại thời điểm ban đầu, thuốc nổ được kích nổ từ tâm của mặt đầu. Sau khi kích nổ, sóng nổ sẽ lan truyền trong khối thuốc nổ tạo ra sóng va đập và sản phẩm nổ nén ép đĩa tạo hình để tạo thành phần tử xuyên, đồng thời dưới tác dụng của sóng nổ, thân vỏ bị phá võ. Các kích thước thiết kế trong bài toán này đối với nón, thân vỏ được trình bày trong bảng 4.1. Thành phần của nón với các giá trị khối lượng riêng theo tính toán lý thuyết sử dụng trong bài toán mô phỏng được thấy trong bảng 4.2.



Hình 4. 1. Bản vẽ của nón kim loại, lượng nổ lõm và bia thép sử dụng trong bài toán mô phỏng: 1- Thân vỏ; 2- Khối thuốc nổ; 3- Nón xuyên; 4- Điểm kích nổ; 5- Bia thép

|--|

Ký hiệu	D1	D2	D3	D4	D5	L1	L2	L3	L4	L5	R	α
Đơn vị (mm)	Ф31,98	Ф34,27	Ф35,4	Ф39,4	Φ80	32,4	32,5	34,5	100	22	4	59,5

Bảng 4. 2. Tên mẫu, thành phần và khối lượng riêng lý thuyết của composite W-Cu

Tân mẫu	Hàm lượng Cu	Hàm lượng W	Khối lượng riêng		
Ten mau	(%, khối lượng)	(%, khối lượng)	lý thuyết (g/cm ³)		
Cu	100	0	8,96		
Cu70W30	70	30	10,67		
Cu60W40	60	40	11,40		
Cu50W50	50	50	12,23		
Cu40W60	40	60	13,19		

Bài toán mô phỏng sẽ cho kết quả của chiều dài kim loại (L), chiều sâu xuyên (P) trên thép 40Cr và tốc độ đầu dòng kim loại, v₁. Bài toán đầu tiên được mô phỏng đối với nón bằng Cu kim loại với các tính chất như liệt kê trong bảng 4.3. Loại thuốc nổ với tính chất tương tự A-IX-1 với thành phần (93,5-95)% RDX

và (4-6,5)% chất thuần hóa, có khối lượng riêng trong phạm vi 1,6-1,68 g/cm³ và tốc độ nổ là 7500-8000 m/s.

Vật	Khối lượng	Nhiệt	Mô đun	Mô đun	Giới hạn	Độ cứng	T _{nóng chảy}
liệu	riêng	dung	nén	trượt (cắt)	chảy dẻo	(MPa)	(K)
	(g/cm^3)	(J/kgK)	(GPa)	(GPa)	(MPa)		
Cu	8,96	383	129	46	90	292	1356

Bảng 4. 3. Một số tính chất của Cu sử dụng trong bài toán mô phỏng

Với các tính chất của Cu và thuốc nổ A-IX-1 như trên, kết quả quá trình mô phỏng cho thấy tốc độ đầu dòng của dòng kim loại (Cu) đạt được tại thời điểm ngay trước khi chạm bia là 6357 m/s với chiều dài dòng kim loại đạt được là 43mm và chiều sâu đâm xuyên là 80 mm, tức là tương đương với chiều sâu đâm xuyên của lượng nổ lõm sử dụng nón Cu sau khi miết lần 2 ở chương 3.



Hình 4. 2. Kết quả mô phỏng với mẫu nón Cu

Khi mô phỏng đối với các nón bằng vật liệu composite W-Cu với hàm lượng W khác nhau, các tính chất của vật liệu vật giữ nguyên các tính chất như nón đồng và chỉ thay đổi khối lượng riêng theo hàm lượng W để đánh giá ảnh hưởng của khối lượng riêng nón đến chiều dài dòng kim loại hình thành và chiều sâu đâm xuyên lớn nhất trên bia thép. Kết quả xác định vận tốc đầu dòng kim loại v_1 như thấy trên đồ thị hình 4.3. Với hàm lượng W = 0 %, tức khi nón kim loại là Cu nguyên chất, vận tốc đầu dòng đạt được là 6.357 m/s, khi nón đồng được đưa thêm 30% W tương ứng composite Cu70W30 cả vận tốc đầu dòng giảm xuống còn 6288 m/s. Khi tiếp tục tăng hàm lượng W lên 50%, các giá trị vận tốc tiếp tục giảm xuống và giảm mạnh khi hàm lượng W tăng lên 60 %. Ở hàm lượng W là 60%, vận tốc đầu dòng lúc này chỉ đạt 5446 m/s. So với kết quả mô phỏng đối với nón bằng đồng nguyên chất thì tốc độ đầu dòng giảm giảm 14,3% ở hàm lượng W 60% so với khi nón bằng Cu nguyên chất.





Hình ảnh mô phỏng với hàm lượng W thay đổi từ 30 đến 60 % như thấy trên hình 4.4-4.7.



Hình 4. 4. Kết quả mô phỏng với mẫu nón composite Cu70W30



Hình 4. 5. Kết quả mô phỏng với mẫu nón composite Cu60W40



Hình 4. 6. Kết quả mô phỏng với mẫu nón composite Cu50W50



Hình 4. 7. Kết quả mô phỏng với mẫu nón composite Cu40W60



Hình 4. 8. Sự phụ thuộc chiều dài dòng kim loại L, chiều sâu đâm xuyên P và khối lượng riêng vào hàm lượng W

Hình 4.8 cho thấy sự phụ thuộc chiều dài dòng kim loại *L*, chiều sâu xuyên *P* và khối lượng riêng theo tính toán lý thuyết vào hàm lượng W. Với hàm lượng W tăng lên từ 0 đến 60% khối lượng riêng của mẫu compositee tăng lên do W có khối lượng riêng cao hơn Cu (khối lượng riêng của cao gấp 2,15 lần so với Cu). Chiều

dài dòng kim loai có xu hướng giảm xuống từ 43 xuống 40 mm khi tăng hàm lượng W từ 30 lên 60%, kết quả là chiều sâu đâm xuyên tăng từ 80 lên 95 mm khi tăng hàm lượng W từ 0 đến 50%, khi tiếp tục tăng hàm lượng W lên 60 %, chiều sâu đâm xuyên P giảm nhanh xuống còn 85 mm (giảm 10,5 % so với hàm lương W 50%), thâm chí thấp hơn khi so sánh với nón có hàm lương W là 40%. Từ các kết quả mô phỏng cho thấy, khi tăng hàm lượng W sẽ làm tăng khối lượng riêng của nón nhưng làm giảm vân tốc đầu dòng. Tuy nhiên chiều sâu đâm xuyên có xu hướng tăng lên khi tăng hàm lương W từ 0 đến 50% và sau đó nhanh chóng giảm xuống khi hàm lượng W tăng đến 60 %. Từ công thức (1.3) cho thấy chiều sâu đâm xuyên P phụ thuộc vào chiều dài dòng kim loại L và khối lượng riêng của nón. Tuy nhiên sự giảm mạnh của chiều sâu xuyên P khi hàm lượng W tăng lên 60% với khối lượng riêng tăng mạnh trong khi chiều dài dòng kim loại không giảm. Điều này cho thấy, ngoài phụ thuộc vào khối lượng riêng của nón và chiều dài dòng kim loại tạo ra sau phản ứng nổ thì chiều sâu đâm xuyên còn phu thuộc vào tốc đô của dòng kim loai tao ra. Mô hình tính toán và thực nghiêm, của Guo cùng đồng nghiêp và các nghiên cứu mô phỏng tính toán đi trước cũng cho thấy sự phu thuộc của chiều sâu đâm xuyên vào khoảng cách giữa lượng nổ lõm đến bia H, khối lượng riêng của nón ρ_i , khối lượng riêng của bia ρ_t vận tốc đầu dòng υ_{tip} và vận tốc toàn dòng υ_i như thấy trong công thức (4.1) với $x = \rho_i / \rho_t$.

$$P \sim (H-a) \left[\left(\frac{v_{tip}}{v_j} \right)^{\sqrt{x}} - 1 \right]$$
(4.1)

Như vậy chiều sâu đâm xuyên của lượng nổ lõm đạt được lớn nhất với hàm lượng W là 50 % theo kết quả mô phỏng có thể do tối ưu hóa giữa sự tăng khối lượng riêng và tốc độ dòng kim loại tạo ra. Khi tăng khối lượng riêng sẽ làm giảm tốc độ dòng kim loại. Giai đoạn đầu khi tăng khối lượng riêng không làm giảm nhiều tốc độ dòng nên chiều sâu đâm xuyên tăng, nhưng khi khối lượng riêng tăng cao sẽ làm giảm mạnh tốc độ dòng (60 % W) làm cho chiều sâu đâm xuyên giảm mạnh. Điều này cho thấy chiều sâu đâm xuyên phụ thuộc vào không chỉ khối lượng riêng, chiều dài dòng kim loại sau phản ứng nổ, tốc độ dòng kim loại mà còn phụ thuộc nhiều thông số khác. Tuy nhiên kết quả phân tích định tính cũng cho thấy với hàm lượng W 50% sẽ cho chiều sâu đâm xuyên lớn nhất. Và để tối ưu hóa kết quả

mô phỏng, các nón với hàm lượng W thay đổi sẽ được chế tạo và thử nghiệm nổ để đánh giá và kiểm chứng.

4.2. Chế tạo và thử nghiệm thực tế nón kim loại bằng vật liệu composite W-Cu

4.2.1. Ảnh hưởng của hàm lượng W đến cấu trúc và tính chất của nón W-Cu

Để kiểm nghiệm với kết quả mô phỏng và lựa chọn thành phần composite CuW phù hợp cho các nghiên cứu thử nghiệm tiếp theo. Các nón đồng với thành phần thiết kế như trong bài toán mô phỏng được chế tạo. Phương pháp chế tạo nón xuyên bằng vật liệu composite W-Cu như đã được trình bày tại Mục 2.2.1 và Mục 2.2.2 Chương 2. Mẫu sau khi thiêu kết SPS được lấy ra, cắt, mài để phân tích cấu trúc, đo khối lượng riêng và đo độ cứng Vickers.

Giản đồ nhiễu xạ tia X (XRD) của nón composite W-Cu sau khi thiêu kết SPS như thấy trên hình 4.9. Từ các giản đồ nhiễu xạ cho thấy các đỉnh nhiễu xạ của mẫu chỉ gồm Cu và W, như vậy quá trình thiêu kết không làm thay đổi thành phần pha của vật liệu.



Hình 4. 9. Giản đồ nhiễu xạ tia X mẫu composite với hàm lượng W khác nhau sau khi thiêu kết SPS

Ånh SEM hình 4.10 cho thấy sự phân tán khá đồng đều của các hạt W (màu trắng) trên nền Cu (màu xám). Kết quả phân tích thành phần hóa học dựa phổ tán xạ năng lượng tia X đối với các mẫu nón composite W-Cu như thấy trên các hình 4.11-4.14 cho thấy các mẫu chứa chỉ Cu và W với hàm lượng như trong bảng gắn với các hình. Có sự sai lệch nhỏ giữa hàm lượng Cu và W do vị trí vùng phân tích có thể giàu Cu hơn hay giàu W hơn một chút. Ngoài ra một lượng nhỏ oxy với hàm lượng

có thể có trên bề mặt hạt Cu và W trong quá trình chế tạo bột và chế tạo mẫu (trong quá nghiền trộn,...). Mặc dù quá trình nghiền trộn được thực hiện trong môi trường n-hexan để bảo vệ và sau đó được hoàn nguyên cũng như thiêu kết sơ bộ trong khí hydro nhưng có thể oxy này bị bẫy bên trong hạt đồng do quá trình nghiền trộn nên không thể hoàn nguyên được. Tuy nhiên với lượng oxy tồn tại thấp dưới 1% nên cũng có thể coi như quá trình thiêu kết, chế tạo không gây ra sự oxy hóa đối với nón composite W-Cu kim loại.



Hình 4. 10. Ảnh SEM cấu trúc nón composite W-Cu với hàm lượng W khác nhau



Hình 4. 11. Phổ tán xạ năng lượng tia X và thành phần hóa học mẫu nón Cu70W30 sau khi thiêu kết SPS



Hình 4. 12. Phổ tán xạ năng lượng tia X và thành phần hóa học mẫu nón Cu60W40 sau khi thiêu kết SPS



Hình 4. 13. Phổ tán xạ năng lượng tia X và thành phần hóa học mẫu nón Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS



Hình 4. 14. Phổ tán xạ năng lượng tia X và thành phần hóa học mẫu nón Cu40W60 sau khi thiêu kết SPS

Hình 4.15 là đồ thi thể hiện khối lượng riệng của mẫu nón composite W-Cu tăng lên khi tăng hàm lương W, từ 8,89 lên 12,76 g/cm³, khi tăng hàm lương W từ 0 đến 60%. So với khối lương riêng theo tính toán lý thuyết thì khối lương riêng đo được thấp hơn. Tính toán cho thấy khi tăng hàm lượng W từ 0 đến 50% thì tỷ trong tương đối giảm châm từ 99,2 xuống 98,8%, nhưng khi tăng hàm lương W lên 60% thì tỷ trong tương đối giảm manh xuống và chỉ đat 96,7%. Điều này cho thấy khi tăng hàm lương W lên thì khả năng kết khối của composite giảm xuống. Điều này là do sư chênh lệch về nhiệt đô nóng chảy giữa Cu (1083 °C) và W lớn đồng thời tính thấm ướt cũng như tạo dung dịch rắn của Cu với W thấp nên khi tăng hàm lượng W thì khả năng kết khối (hay tính thiêu kết) của composite giảm xuống [110-112]. Kết quả đo độ cứng Vickers (HV₅) đối với các mẫu nón nón CuW như thấy trên đồ thị hình 4.16. Đối với mẫu nón Cu chế tạo từ bột đồng và thiêu kết SPS, độ cứng đo được là 73,8 \pm 1,5 (HV₅) như đã trình bày ở chượng 3. Khi đưa thêm W vào để tao composite CuW, do W cứng hơn so với Cu nên khi tăng hàm lương W làm cho đô cứng của composite CuW tăng lên nhanh chóng, với 30 % W độ cứng bề mặt nón đạt $126,3 \pm 3,8$ (HV_{0.5}) và đạt giá trị lớn nhất 209,2 ±4,5 với hàm lượng W là 60%. Điều này là hiển nhiên vì độ cứng của W cao hơn so với đồng và do đó khi tăng hàm lượng W sẽ làm độ cứng tăng lên.



Hình 4. 15. Khối lượng riêng và tỷ trong tương đối của mẫu nón composite W-Cu sau khi thiêu kết SPS với hàm lượng W khác nhau



Hình 4. 16. Độ cứng Vickers của nón W-Cu với hàm lượng W khác nhau
4.2.2. Thử nghiệm thử nổ lõm đối với nón composite W-Cu

Các mẫu nón bằng composite W-Cu sau khi thiêu kết SPS được gia công đến kích thước theo thiết kế giống với nón bằng đồng kim loại. Sau khi gia công đến kích thước theo bản vẽ, các nón được xác định khối lượng và độ tăng khối lượng so với nón bằng kim loại đồng chế tạo bằng phương pháp SPS.



Hình 4. 17. Ảnh hưởng của hàm lượng W đến khối lượng nón W-Cu và độ tăng khối lượng tương đối

Đồ thị hình 4.17 cho thấy khối lượng của nón xuyên chế tạo bằng bột đồng kim loại sau khi SPS đạt 13,21g và sau đó tăng lên 18,96g với hàm lượng W đưa vào là 60% khối lượng. Kết quả so sánh về độ tăng khối lượng tương đối cho thấy khi đưa 30% W để nón composite Cu70W30 thì khối lượng nón tăng lên 19,12% và khi đưa 60% W thì khối lượng nón tăng lên 32,04% so với nón chế tạo từ bột đồng và thiêu kết SPS.

Quá trình thử nghiệm được thực hiện với các điều kiện thử nghiệm như nhau bao gồm cùng loại thuốc nổ, khối lượng thuốc nổ và thử nổ đối với bia thép 40Cr để so sánh chiều sâu đâm xuyên của các nón CuW và nón đồng nguyên chất. Trên Hình 4.18 là mặt cắt dọc theo chiều sâu đâm xuyên trên bia thép 40Cr sau khi thử nghiệm nổ. Chiều sâu đâm xuyên trên bia thép được thể hiện trên đồ thị hình 4.19 và so sánh với kết quả mô phỏng ở mục 4.1.



Hình 4. 18. Mặt cắt dọc theo chiều sâu đâm xuyên bia thép 40Cr thử nghiệm với các nón W-Cu với hàm lượng W khác nhau



Hình 4. 19. So sánh chiều sâu xuyên giữa thử nghiệm thực tế và mô phỏng với các nón W-Cu với hàm lượng W khác nhau

Kết quả cho thấy chiều sâu đâm xuyên tăng lên và đạt giá trị lớn nhất P = 80 mm khi hàm lượng W là 50% tương ứng với nón composite Cu50W50. Sau đó chiều sâu đâm xuyên giảm xuống nhanh còn 64 mm khi hàm lượng W tăng lên 60% đối với mẫu nón Cu40W60. Nếu so sánh với kết quả thử nghiệm của lượng nổ lõm sử dụng nón Cu chế tạo bằng phương pháp dập nguội thì chiều sâu đâm xuyên tăng 60%, còn so với nón Cu chế tạo bằng phương pháp SPS thì chiều sâu đâm xuyên tăng khoảng 14,3%, còn nếu so sánh với lượng nổ lõm sử dụng hai loại nón sau khi gia công miết từ nón Cu đã dập nguội hoặc thiêu kết SPS thì chiều sâu đâm xuyên là tương đương. Các kết quả cũng cho thấy chiều sâu đâm xuyên trong thử nghiệm nổ thực tế có sự tương quan về xu hướng so với kết quả mô phỏng. Tuy nhiên kết quả thử nghiệm đạt được đều thấp hơn so với kết quả mô phỏng do trong quá trình mô phỏng chưa tính toán hết đến các điều kiện thử nghiệm thực tế.

4.3. Gia công miết tạo cấu trúc siêu mịn

4.3.1 Cấu trúc tế vi mẫu nón composite Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS

Từ kết quả nghiên cứu mô phỏng và thử nghiệm nổ lõm theo thành phần W, nón với thành phần 50% W tương ứng composite Cu50W50 được lựa chọn cho nghiên cứu biến dạng dẻo bằng gia công miết để tạo cấu trúc siêu hạt. Bột hỗn hợp bột Cu50W50 sau khi nghiền trộn, ép tao hình nón, thiêu kết sơ bộ và thiêu kết SPS ở 950°C để được các mẫu nón. Các mẫu nón này sau đó được ủ ở 150°C với thời gian 60 phút trong môi trường khí hydro để khử ứng suất dư sau khi thiêu kết SPS. Quá trình chế tạo mẫu được thể hiện trên sơ đồ hình 4.20. Trên hình 4.21 là hình ảnh các nón composite Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS.



Hình 4. 20. Sơ đồ chế tạo nón composite Cu50W50 cấu trúc siêu mịn



Hình 4. 21. Các mẫu nón Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS

Để quan sát sự thay đổi cấu trúc của hạt Cu sau khi SPS và sau khi miết mẫu được cắt ra từ nón tại vị trí giữa nón như sơ đồ trên hình 4.22. Để so sánh, vùng bề mặt nón (vùng trực tiếp tiếp xúc với đĩa miết) được mài, đánh bóng và tẩm thực bằng dung dịch FeCl₃ (5g) + HCl (10mL) + H₂O (100mL) để quan sát được sự thay đổi cấu trúc hạt Cu dẫn đến việc thay đổi cơ tính của nón.



Hình 4. 22. Vị trí lấy mẫu để quan sát cấu trúc của Cu sau khi thiêu kết và gia công tạo cấu trúc siêu hạt

Ånh SEM và ảnh quang học của mẫu nón Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS được thể hiện trên hình 4.23, ở đây chủ yếu quan sát cấu trúc của vùng giàu Cu.



Hình 4. 23. Ảnh quang học và ảnh SEM cấu trúc mẫu nón Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS

Trong đó, hình 4.23 a và b tương ứng với ảnh quang học và ảnh SEM của khu vực gần phía bề mặt ngoài của nón, còn hình 4.23 c và d là ảnh quang học ở khu vực gần bề mặt trong của nón. Cấu trúc của Cu chứa nhiều hạt kích thước vài chục đến hàng trăm µm có dạng các tấm xếp xen kẽ nhau và vẫn quan sát rất rõ biên giới giữa các hạt đa tinh thể Cu. Và cấu trúc đi từ ngoài vào trong của nón có kiểu tương đương nhau, không có nhiều khác biệt về hình dạng và kích thước hạt. Quan sát này cũng giống như quan sát đối với mẫu nón Cu sau khi SPS chế tạo đã quan sát được chế tạo từ bột đồng ở chương 3.

4.3.2 Cấu trúc tế vi mẫu nón composite Cu50W50 sau khi miết lần 1

Các nón sau khi thiêu kết SPS được ủ ở 150°C trong thời gian 60 phút để khử ứng suất, sau đó tiến hành miết lần 1 với quy trình miết như đã trình bày ở phần trên. Mẫu sau khi miết lần 1 cũng được cắt mẫu ở các vị trí như đã lấy mẫu đối với nón như chỉ ra trên hình 4.22 và đánh dấu vị trí trong và ngoài thành nón để tiện cho quá trình quan sát và đánh giá. Trên hình 4.24 là ảnh quang học mặt cắt thành nón sau khi mài đánh bóng và tẩm thực. Các vị trí 1, 2, 3 tương ứng với cấu trúc của mặt cắt đi từ bề mặt trong thành nón ra đến phía bề mặt ngoài nón (vị trí được tiếp xúc với con lăn của thiết bị miết). Có thể thấy ở bề mặt trong thành nón, ảnh 1, khu vực giàu Cu có cấu trúc gần tương tự với tự với cấu trúc của thành nón sau khi SPS, tức là trong các hat đồng chứa nhiều hat với kích thước khá lớn, lên đến vài chục μm. Ở vi trí giữa thành nón, ảnh 2, cấu trúc cho thấy vẫn còn tồn tai nhiều hat Cu với kích thước lớn, nhưng nhiều vùng đã có chuyển biến tạo các hạt kích thước nhỏ hơn và không quan sát rõ biên hat. Ra đến vùng ngoài, ảnh 3, vùng được miết trực tiếp đầu tiên, cấu trúc tế vi khu vực giàu đồng lúc này không xác đinh rõ được vùng biên hạt giữa các hat đồng, do quá trình biến dang đã làm cho các hat đồng nhỏ min. Để thấy rõ hơn cấu trúc của thành nón sau khi miết lần 1, cấu trúc mặt cắt tiếp tục được quan sát thông qua chụp ảnh SEM như thấy trên hình 4.25. Các khu vực chụp ảnh tương ứng từ phía bề mặt trong nón ra đến phía bên ngoài bề mặt nón cũng được đánh số tương tự như đối với ảnh quang học. Kết quả quan sát cũng thể hiện rõ, đối với phu vực phía thành trong nón và ở giữa thành nón, cấu trúc bao gồm các hạt Cu kích thước lớn hơn và đến khu vực phía ngoài bề mặt nón thì các hạt Cu được biến dạng tạo kích thước rất nhỏ mịn. Khi quan sát ở độ phóng đại cao hơn, đối với khu vực phía ngoài bề mặt nón, ảnh 4, cho thấy cấu trúc tế vi của vùng giàu đồng bao gồm các siêu hat với kích thước dang siêu hat với chiều dài vài µm nhưng chiều dày

chỉ vài trăm nm. Điều này cho thấy quá trình miết đã tạo ra cấu trúc siêu hạt ở khu vực bề mặt ngoài thành nón, nhưng phía bề mặt thành nón vẫn còn giữ cấu trúc hạt thô của Cu sau khi thiêu kết SPS. Sự chuyển biến kích thước hạt tạo ra gradient kích thước hạt từ phía thành trong nón ra phía ngoài từ kích thước khá thô vài chục µm và giảm xuống thành cấu trúc siêu hạt ở khu vực phía ngoài nón.



Hình 4. 24. Ảnh quang học cấu trúc mẫu nón composite Cu50W50 sau khi miết lần1: 1) Phía gần mặt trong nón, 2) phía giữa nón, và 3) Phía bề mặt ngoài nón



Hình 4. 25. Ảnh SEM cấu trúc mẫu nón Cu50W50 sau khi miết lần 1: 1) Phía gần mặt trong nón, 2) phía giữa nón, 3) Phía bề mặt ngoài nón và 4) độ phóng đại cao phía bề mặt ngoài nón



Hình 4. 26. Ảnh TEM cấu trúc tế vi khu vực bề mặt ngoài nón sau khi gia công miết lần 1

Để quan sát và đánh giá rõ hơn cấu trúc của khu vực cấu trúc siêu hạt sau khi miết lần 1. Cấu trúc phía bề măt ngoài thành nón được quan sát trên kính hiển vi điện tử truyền qua, hình 4.26. Cấu trúc quan sát trên ảnh TEM cho thấy rõ các siêu hạt với kích thước lớn nhất vài µm và chiều dày chỉ vài trăm nm. Hơn nữa từ ảnh TEM cũng quan sát thấy nhiều các lệch mạng phân tán trong các siêu hạt. Đồng thời ở các vị trí biên siêu hạt cũng thấy sự tập trung của lệch mạng tạo thành các tường lệch. Sự xuất hiện của các lệch mạng là do quá trình biến dạng liên tục của các hạt lớn do quá trình miết để tạo các siêu hạt. Khi quá trình biến dạng này diễn ra mạnh, các lệch mạng cũng chuyển động dần ra các vùng biên hạt lớn để hóa bền vùng biên hạt lớn tạo thành các tường lệch.

4.3.3 Cấu trúc tế vi mẫu nón composite Cu50W50 sau khi miết lần 2

Sau khi miết lần 1, các mẫu nón được ủ ở 150°C trong thời gian 60 phút để khử ứng suất, sau đó lại tiếp tục miết lần 2 với quy trình miết như đã trình bày ở phần trên. Mẫu sau khi miết lần 2 cũng được cắt mẫu ở các vị trí như đã lấy mẫu đối với nón sau khi miết lần 1 và được mài, đánh bóng, tẩm thực sau đó quan sát cấu trúc. Trên hình 4.27 là ảnh quang học bề mặt cắt ngang thành nón với các vị trí tương ứng từ trong ra ngoài thành nón tương tự như với mẫu sau khi miết lần 1. Quan sát trên ảnh quang học đối với các vị trí giàu Cu cho thấy lúc này không còn xuất hiện các hạt Cu thô trong cấu trúc từ phía thành trong ra đến thành ngoài của nón. Điều này cho thấy sau hai lần miết, cấu trúc hạt của đồng trong toàn chiều dày thành nón đã chịu tác động của quá trình miết và tạo ra cấu trúc siêu hạt.



Hình 4. 27. Ảnh quang học cấu trúc mẫu nón Cu50W50 sau khi miết lần 2: 1) Phía gần mặt trong nón, 2) phía giữa nón, và 3) Phía bề mặt ngoài nón



Hình 4. 28. Ånh SEM cấu trúc tế vi khu vực bề mặt ngoài nón sau khi miết lần 2 1 và 1-1 Phía gần mặt trong nón, 2 và 2-2 phía giữa nón, và 3, 3-3 Phía bề mặt ngoài nón

Cấu trúc các siêu hạt Cu sau khi miết lần 2 cũng được quan sát trên ảnh TEM để đánh giá sự thay đổi so với miết lần 1, như thấy trên hình 4.29. Từ ảnh TEM quan sát rõ ràng được sự hình thành phân tán của các lệch mạng trong các siêu hạt. Ngoài ra cũng quan sát thấy sự hình thành mạnh mẽ và tập trung hơn của các lệch mạng tạo thành các tường lệch tại vị trí biên siêu hạt so với cấu trúc sau khi gia công miết lần 1.



Hình 4. 29. Ảnh TEM cấu trúc tế vi khu vực bề mặt ngoài nón sau khi gia công miết lần 2

Ngoài tạo ra cấu trúc siêu hạt Cu trong vùng giàu đồng, thì quá trình gia công miết cũng làm tăng khối lượng riêng của nón Cu50W50 tương tự như đối với nón bằng Cu chế tạo bằng phương pháp thiêu kết SPS đã trình bày ở chương 3. Sự tăng khối lượng riêng của nón ở đây là do quá trình gia công miết đã loại bỏ các lỗ xốp tồn tại trong cấu trúc nón do quá trình thiêu kết SPS chưa loại bỏ hết. Sau khi thiêu kết SPS, khối lượng riêng của nón composite Cu50W50 đạt được là 12,08 g/cm³ tương ứng với 98,8% so với mật độ lý thuyết và sau khi miết lần 2, khối lượng riêng tăng lên lần lượt là 12,14 và 12,2 g/cm³ tương ứng với tỷ trọng tương đối lần lượt là 99,3 và 99,8%.



Hình 4. 30. Khối lượng riêng của nón Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS và sau khi kết hợp miết lần 1 và lần 2

Để đánh giá ảnh hưởng của quá trình miết đến độ cứng của vùng giàu Cu trên mặt cắt thành nón tương tự như khi nghiên cứu đối với nón Cu ở chương 3, các mẫu cũng được cắt ra từ thành nón và mài, đánh bóng sau đó đo độ cứng tế vi Vickers $HV_{0,1}$ tại các vị trị khác nhau từ phía thành trong ra đến phía thành ngoài nón. Tuy nhiên do sự có mặt của W phân tán trong nền Cu nên ở đây các vị trí đo chỉ là tương đối, không giống nhau về tọa độ, mà chỉ xác định hướng đo từ thành trong ra thành ngoài. Hơn nữa do phải lựa chọn các vùng giàu đồng và hạn chế ảnh hưởng của các hạt W nên tải trọng đo được lựa chọn là 0,1 KG. Kết quả xác định độ cứng Vickers $HV_{0,1}$ của vùng giàu đồng của các nón Cu50W50 sau khi SPS, sau khi miết lần 1 và sau khi miết lần 2 như trình bày trên đồ thị hình 4.31. Xu hướng chung quan sát được là độ cứng ở phía thành ngoài của nón sẽ có độ cứng cao hơn so với phía trong, nhưng khác so với các kết quả xác định được của nón Cu chế tạo

bằng phương pháp dập nguội, dập nguội kết hợp miết, thiêu kết SPS hay thiêu kết SPS kết hợp miết.



Hình 4. 31. Độ cứng tế vi khu vực nền Cu của các nón Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS, miết lần 1 và miết lần 2

Đối với mẫu Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS, về cơ bản độ cứng cao nhất đạt được phía gần thành ngoài nón với giá trị $HV_{0,1}$ là 130,1 sau đó là độ cứng phía thành trong nón với $HV_{0,1}$ là 122,5 và thấp nhất là phía thành nón với $HV_{0,1}$ đạt được là 109.

Đối với mẫu nón sau khi thiêu kết SPS kết hợp miết lần 1, độ cứng tế vi đạt được cao nhất cũng tại vị trí sát thành ngoài nón với giá trị $HV_{0,1}$ là 138,8 sau đó giảm dần vào phía thành trong nón với giá trị nhỏ nhất $HV_{0,1}$ là 114,8.

Đối với nón sau khi thiêu kết SPS và miết lần 2, độ cứng cao nhất đạt được phía ngoài thành nón với giá trị $HV_{0,1}$ là 137,7 sau đó đến giá trị đo được ở phía thành trong với $HV_{0,1}$ là 129,1 và thấp nhất ở vị trí giữa thành nón với $HV_{0,1}$ là 118,2.

Xu hướng chung có chút khác với nón bằng Cu nguyên chất và hầu kết các giá trị đo được đều cao hơn so với nón Cu. Đối với nón Cu sau khi dập và miết lần 2 độ cứng đạt giá trị cao nhất 118,1 và 106,9 HV đối với mẫu nón Cu sau khi thiêu kết SPS kết hợp miết lần 2 ở vị trí sát phía ngoài thành nón. Sự khác biệt kết quả đo là do đối với nón bằng Cu, toàn bộ thành nón bằng Cu nên có thể thấy được sự thay đổi độ cứng tế vi từ phía trong thành nón ra phía ngoài một cách tương đối chính

xác và cũng đồng thời xác định được ảnh hưởng của quá trình gia công miết lần 1 và lần 2 đối với độ cứng của nón.

Trong khi đó, đối với nón chế tạo từ composite Cu50W50, mặc dù độ cứng được đo với việc tập trung mũi đâm vào vùng giàu đồng nhưng sẽ chịu ảnh hưởng của tương tác với các hạt W. Thứ nhất W có độ cứng cao hơn Cu nên khi tạo thành composite sẽ có độ cứng cao hơn Cu. Thứ 2, khi chọn vùng giàu Cu nhưng các hạt lân cận là W, nên mũi đâm có thể chạm vào hạt W như mô hình giải thích hình 4.32a. Ví dụ đối với điểm 1 trên hình 4.32a, mũi đâm khi đâm xuống sát với vị trí hạt W, sẽ chịu ảnh hưởng nhẹ của độ cứng hạt W, với điểm 2, mũi đâm cách xa hạt W sẽ cho độ cứng vùng giàu đồng chính xác nhất và điểm 3 khi mũi đâm đâm trực tiếp vào hạt W ngay phia bên dưới vùng giàu Cu, lúc này độ cứng sẽ bị ảnh hưởng rất nhiều bởi độ cứng của W. Trên hình 4.32 b và c là ảnh quang học vết đâm độ cứng tế vi, có thể thấy như vị trí mũi tên chỉ tại vị trí mũi đâm tương tác với các hạt W. Do vậy kết quả đo ở đây chỉ mang tính tương đối, rất khó xác định được ảnh hưởng của quá trình miết đối với toàn bộ mặt cắt thành nón.



Hình 4. 32. a) Mô mình vết đâm đo độ cứng tế vi, b) và c) Vết đâm độ cứng tế vi trên thực tế

4.3.4 Thử nghiệm nổ lõm nón composite Cu50W50 sau khi miết lần 2

Các nón Cu50W50 sau khi miết lần 2 sẽ được gia công tiện đến kích thước nón theo tiết kế như thấy trên hình 4.33. Sau khi gia công nón theo thiết kế sẽ lắp đặt vào lượng nổ lõm giống như đối với phương pháp thử nghiệm trong các phần trước để so sánh. Trong đó, lượng thuốc nổ, kiểu thuốc nổ được giữ nguyên cũng như bia thép bằng thép để thử nổ là thép 40Cr cùng kích thước.



Hình 4. 33. Các nón composite Cu50W50 sau khi miết lần 2



Hình 4. 34. Mặt cắt dọc theo chiều sâu đâm xuyên của bia thép sau khi thử nổ

Kết quả thử nổ cho thấy chiều sâu đâm xuyên đã tăng lên đáng kể sau khi miết nón Cu50W50 lần 2. Chiều sâu đâm xuyên đo được trung bình là khoảng 89 mm trên bia thép 40Cr, hình 4.34. Như đã báo cáo trong chương 3, chiều sâu đâm xuyên trung bình của nón bằng Cu dập nguội sau đó miết lần 2 khoảng 80 mm và chiều sâu đâm xuyên của nón Cu50W50 sau khi SPS cũng khoảng 80 mm. Như vậy sau khi miết lần 2 tạo được cấu trúc siêu hạt nên chiều sâu đâm xuyên đã tăng lên. So với nón bằng Cu sau khi miết lần 2 hoặc nón Cu50W50 sau khi SPS thì chiều sâu đâm xuyên tăng khoảng 11%, tức là cấu trúc siêu hạt Cu kết hợp với sự tăng khối lượng riêng tối ưu khi thêm W với hàm lượng 50% đã làm chiều sâu đâm xuyên tăng lên đáng kể.

Các nghiên cứu đi trước đã cho thấy chiều sâu đâm xuyên của nón chế tạo từ cùng loại vật liệu sẽ bị ảnh hưởng bởi cấu trúc vật liệu sau khi chế tạo. Trong đó, chiều sâu đâm xuyên tỷ lệ nghịch với kích thước hạt, nghĩa là khi kích thước hạt càng giảm thì chiều sâu đâm xuyên sẽ tăng lên. Điều này đã được giải thích trong chương 3 khi biến dạng miết đã tạo ra cấu trúc siêu hạt của các hạt đồng sau khi miết từ nón được chế tạo từ hai phương pháp đồng dập nguội từ phôi đồng sau khi đúc hoặc từ phương pháp thiêu kết SPS để nâng cao chiều sâu đâm xuyên của lượng nổ lõm.

Một số nghiên cứu về chiều sâu đâm xuyên của lượng nổ lõm tăng lên khi giảm kích thước hạt đã được tiến hành trong một số vật liệu nón từ đồng và hợp kim đồng. Trong nghiên cứu của Leus và các cộng sự, bằng kỹ thuật ép qua kênh gấp khúc (ECAP) để tạo phôi Cu cấu trúc siêu hạt (< 5 μ m), kết quả thử nghiệm cho thấy lượng nổ lõm sử dụng các nón đồng với cấu trúc siêu hạt đều có chiều sâu đâm xuyên lớn hơn so với khi sử dụng nón Cu chế tạo từ phôi Cu ban đầu với kích thước hạt khoảng 35 μ m. Trong nghiên cứu của Sun và đồng nghiệp, bằng kỹ thuật thiêu kết laze, Sun đã tạo được cấu trúc với kích thước hạt của hợp kim CuSn10 nằm trong phạm vi từ 15-50 μ m nhỏ hơn nhiều so với kích thước hạt của mẫu chế tạo từ phôi đúc và gia công tiện, từ 200 đến 600 μ m, và kết quả thử nghiệm cho thấy chiều sâu đâm xuyên trên bia thép của nón chế tạo bằng kỹ thuật thiêu kết laze cao hơn 27% so với mẫu chế tạo từ phôi đúc [71]. Nhiều nghiên cứu cũng khác cho thấy hiệu quả hoạt động của nón kim loại có kích thước hạt siêu mịn cũng tốt hơn so với kích thước hạt thô [75, 109].

Thêm vào đó, như đã được giới thiệu trong phần tổng quan, các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng chiều sâu đâm xuyên cũng bị ảnh hưởng bởi khả năng biến dạng dẻo của vật liệu làm nón. Vật liệu có độ biến dạng dẻo càng cao thì chiều sâu đâm xuyên càng lớn. Điều này được giải thích thông qua cơ chế chuyển động của lệch mạng khi kích thước hạt của vật liệu ở vùng siêu mịn hay siêu hạt. Như đã giải thích ở chương 3, khi so sánh cấu trúc của nón được gia công biến dạng bằng kỹ thuật miết đã tạo ra cấu trúc siêu hạt và mật độ lệch tăng mạnh trong cấu trúc của hạt Cu

sau khi biến dạng. Sự gia tăng về diện tích biên hạt và mật độ độ lệch cao đã tạo điều kiện thuận lợi cho việc chuyển động của lệch và xác suất của các lệch định hướng theo phương tác động của lực do quá trình nổ của thuốc tạo ra cao hơn và do đó khả năng biến dạng dẻo của dòng kim loại tạo ra tốt hơn dẫn đến chiều sâu đâm xuyên được cải thiện.

Kết quả phân tích cấu trúc của vùng giàu Cu trong nón composite Cu50W50 cũng cho thấy đã tạo được cấu trúc siêu hạt với mật độ lệch tăng lên, đặc biệt sau khi gia công miết lần 2. Tuy nhiên cũng phải thấy rõ ràng rằng, sự có mặt của W để tạo composite Cu làm cho độ bền của vật liệu tăng lên do các hạt W có độ cứng cao hơn nhưng sẽ làm cho độ dẻo của vật liệu giảm xuống. Quá trình biến dạng dẻo của vật liệu sẽ diễn ra thuận lợi khi xác suất của các lệch mạng định hướng cùng phương với phương tác dụng của lực. Và khả năng biến dạng dẻo của vật liệu sẽ giảm xuống khi trong cấu trúc có nhiều tác nhân làm cản trở của lệch.

Rõ ràng sự xuất hiện của các hạt W với kích thước rất lớn (đến vài chục µm) đã cản trở chuyển động của lệch làm hóa bền vật liệu nhưng cũng làm khả năng biến dạng dẻo giảm xuống. Việc xác định khả năng biến dạng dẻo của hai loại nón này tại tốc độ biến dạng siêu cao như khi thử nổ là việc hầu như không thể do quá trình diễn ra rất nhanh chỉ trong vài µs. Một cách tương đối đánh giá khả năng biến dạng dẻo của mẫu nón Cu kim loại và Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS và gia công biến dạng miết cho thấy độ bền kéo đứt của mẫu Cu50W50 lớn hơn, đạt 318 MPa với độ dãn dài đạt 10,8% trong khi độ bền kéo đứt của mẫu chỉ đạt khoảng 264 MPa



Hình 4. 35. Ảnh SEM bề mặt gãy sau khi thử kéo mẫu Cu và Cu50W50 chế tạo bằng phương pháp thiêu kết SPS kết hợp gia công miết

Hình 4.35 cho thấy ảnh SEM quan sát mặt gẫy của mẫu cắt ra từ nón Cu và Cu50W50 sau khi thiêu kết SPS kết hợp gia công miết. Đối với mẫu nón Cu, do khả năng biến dạng dẻo tốt của Cu nên các hạt bị kéo dài ra theo phương kéo và cũng quan sát thấy sự phát triển của các khuyết tật lỗ xốp và vết nứt khi sau khi kéo tuy nhiên các vết nứt phát triển chậm. Đối với mẫu nón Cu50W50, quan sát thấy rõ sự phát triển mạnh của nứt tại vị trí liên kết giữa các hạt W và nền đồng làm cho khả năng biến dạng dẻo của mẫu giảm mạnh khi thử kéo tại nhiệt độ phòng. Kết hợp với kết quả mô phỏng về chiều dài dòng kim loại tạo ra với hàm lượng W tăng lên đã cho thấy khi tăng hàm lượng W đã làm chiều dài của dòng kim loại tạo ra giảm xuống khi so sánh với chiều dài dòng kim loại tạo ra của nón Cu kim loại và đây có thể là nguyên nhân dẫn đến kết quả chiều sâu đâm xuyên khi thử nghiệm nổ thực tế thấp hơn so với kết quả mô phỏng.





Đồ thị hình 4.36 tổng kết lại chiều sâu đâm xuyên của các nón Cu kim loại và Cu50W50 được chế tạo bằng phương pháp dập nguội, thiêu kết SPS và gia công miết kết hợp. Kết quả cho thấy rõ ràng vai trò của cấu trúc siêu hạt trong cả hai nón Cu và Cu50W50. Trong đó đối với nón Cu, khi chế tạo bằng phương pháp dập nguội do kích thước hạt thô nên chiều sâu đâm xuyên chỉ đạt khoảng 50 mm, mẫu nón Cu chế tạo bằng kỹ thuật thiêu kết dòng xung plasma có cấu trúc hạt nhỏ hơn nên chiều sâu đâm xuyên của lượng nổ lõm đạt khoảng 70,5 mm và khi kết hợp gia
công miết để đạt cấu trúc siêu hạt thì chiều sâu đâm xuyên đạt được gần như tương tự nhau khoảng 80-81 mm. Đối với mẫu Cu50W50 chế tạo được bằng kỹ thuật thiêu kết SPS, do tăng được khối lượng riêng tối ưu nên chiều sâu đâm xuyên ban đầu đạt được khoảng 80 mm sau đó tăng lên 89 mm khi kết hợp với gia công miết để đạt được cấu trúc siêu hạt của nền Cu.

4.4. Kết luận Chương 4

Từ các kết quả nghiên cứu chế tạo nón composite CuW cho phép rút ra những kết luận sau đây:

- Chiều sâu đâm xuyên của lượng nổ lõm sử dụng nón composite W-Cu đã tăng lên và đạt giá trị lớn nhất khi hàm lượng W đạt 50 % khối lượng cả đối với kết quả mô phỏng và kết quả thử nghiệm nổ lõm trên thực tế. Khi tăng hàm lượng W lên 60%, chiều sâu đâm có xu hướng giảm xuống, mặc dù khối lượng riêng của nón tăng lên điều này có thể do làm giảm chiều dài dòng kim loại tạo ra và làm giảm tốc độ đầu dòng kim loại. Với hàm lượng W đưa vào là 50 % chiều sâu đâm xuyên đạt được khi thử nghiệm nổ lõm trên bia thép 40X là 80 mm, tăng tương ứng 60% và 14,3 % so với khi sử dụng nón bằng đồng chế tạo bằng phương pháp dập nguội hoặc thiêu kết SPS từ bột đồng.

 Bằng kỹ thuật gia công miết biến dạng đã tạo được cấu trúc siêu hạt đối với nền Cu của composite, siêu hạt có chiều dài từ 1-3 μm và dày 100-300 nm.

- Nón xuyên composite 50Cu50W sau khi biến dạng dẻo bằng phương pháp miết có chiều sâu đâm xuyên trên thép 40X tăng 11 % so với nón chưa gia công miết.

- Chiều sâu đâm xuyên của nón tăng sau khi miết là do tạo được cấu trúc siêu mịn của nền Cu và tăng được mật độ lệch trong cấu trúc pha nền, làm thúc đẩy quả trình biến dạng dẻo của vật liệu ở tốc độ biến dạng siêu cao.

KẾT LUẬN CHUNG

Luận án đã tập trung nghiên cứu phương pháp chế tạo vật liệu nón xuyên, cấu trúc, tính chất và khả năng xuyên thép của hai loại vật liệu nón xuyên có cấu trúc siêu mịn gồm đồng kim loại và composite W-Cu. Từ những kết quả nghiên cứu nhận được, có thể rút ra một số kết luận chính như sau:

Đối với nón xuyên chế tạo bằng 100% đồng kim loại:

1. Đã chế tạo thành công nón xuyên cho thiết bị nổ lõm bằng phương pháp luyện kim bột từ bột đồng kim loại điện phân, sử dụng kỹ thuật thiêu kết xung điện plasma để kết khối vật liệu. Vật liệu chế tạo theo quy trình nêu trên có cấu trúc là những hạt đa tinh thể, kích thước từ 50 đến 200 μm, bên trong các hạt lớn là các hạt nhỏ kích thước khoảng 1-3 μm. Nón xuyên chế tạo từ bột đồng điện phân thiêu kết bằng xung điện plasma xuyên thép sâu hơn 41% so với nón xuyên chế tạo bằng phương pháp dập nguội thông thường.

2. Đã nghiên cứu được qui trình miết nón xuyên tạo cấu trúc siêu mịn bao gồm 2 giai đoạn với 5 lần miết, chiều sâu mỗi lần miết là 0,1 mm, giữa lần miết thứ ba và lần miết thứ tư là công đoạn ủ khử ứng suất ở nhiệt độ 150° C, thời gian ủ là 60 phút. Cấu trúc của vật liệu nón xuyên sau khi miết bao gồm các hạt đa tinh thể, bên trong các hạt này là các siêu hạt (subgrain) có kích thước từ 300-500 nm, dài khoảng 1-2 µm với mật độ lệch mạng tăng cao. Chiều sâu xuyên của nón xuyên sau khi miết tăng 15% so với nón xuyên chế tạo bằng phương pháp SPS, tính tổng thể tăng 60% so với nón xuyên chế tạo bằng phương pháp dập nguội từ đồng tấm.

Đối với nón xuyên chế tạo bằng composite W-Cu:

3. Đã xác định được bằng phần mềm mô phỏng và thực nghiệm tỷ lệ khối lượng W/Cu cho để chế tạo nón xuyên với chiều sâu xuyên lớn nhất là 50% W và 50% Cu.

4. Đã chế tạo thành công nón xuyên bằng composite 50%W+50%Cu theo phương pháp luyện kim bột, thiêu kết bằng xung điện plasma như đã trình bày tại điểm 1. Khác biệt ở chỗ, trong công đoạn nghiền trộn, bột W và bột Cu được nghiền trộn trong thiết bị nghiền bi (tỷ lệ bi:bột là 2:1) với thời gian nghiền là 48 giờ. Nón xuyên chế tạo từ composite 50W50Cu bằng phương pháp thiêu kết SPS có chiều

sâu xuyên thép sâu hơn 14,3 % so với nón xuyên chế tạo từ 100% bột đồng thiêu kết bằng SPS.

5. Kích thước hạt cấu trúc pha nền Cu trong composite 50W50Cu có ảnh hưởng đến chiều sâu xuyên của nón. Nón xuyên chế tạo từ vật liệu composite 50W50Cu bằng phương pháp thiêu kết SPS, sau khi được miết theo quy trình như trình bày tại điểm 2 có cấu trúc pha nền Cu siêu mịn, gồm các siêu hạt kích thước từ 100-300 nm, dài 1-3 μm. Chiều sâu xuyên của nón xuyên 50W50Cu sau khi miết tăng 11% so với nón xuyên cùng vật liệu thiêu kết bằng SPS, không qua công đoạn gia công miết.

6. Kích thước hạt (siêu hạt) và mật độ lệch của vật liệu chế tạo nón xuyên có ảnh hưởng lớn đến chiều sâu xuyên. Kích thước hạt cấu trúc nhỏ mịn, mật độ lệch cao có thể làm nón xuyên biến dạng theo nguyên lý siêu dẻo, điều này làm tăng tính liên tục của tia kim loại, từ đó làm tăng chiều sâu xuyên.

ĐÓNG GÓP MỚI CỦA LUẬN ÁN

- Đã xây dựng được quy trình công nghệ và chế tạo thành công nón xuyên cho thiết bị nổ lõm bằng phương pháp luyện kim bột kết hợp thiêu kết xung plasma và miết cơ học bằng vật liệu đồng kim loại hoặc composite W-Cu có cấu trúc siêu mịn.

- Đã nghiên cứu mô phỏng và thử nghiệm nổ lõm trong đánh giá khả năng xuyên sâu của nón xuyên được chế tạo. Đã chỉ ra tỷ lệ khối lượng tối ưu cho vật liệu nón xuyên bằng composite W-Cu là 50%Cu và 50%W, chiều sâu xuyên tăng khoảng 10% so với nón xuyên bằng đồng kim loại (100% Cu).

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

Tạp chí

 Nguyễn Minh Tuấn, Trần Bảo Trung, Đoàn Đình Phương, Lương Văn Đương, Nguyễn Ngọc Linh, Nguyễn Văn Toàn "Nghiên cứu ảnh hưởng của một số phương pháp chế tạo phễu lót đến chiều sâu xuyên thép của lượng nổ lõm", Tạp chí nghiên cứu KH&CN Quân sự; Số 85, 2-2023; pp. 142-151; ISSN: 1859 – 1043.

2. Nguyen Minh Tuan, Nguyen Ngoc Linh, Nguyen Van Toan "Effect of Heating Rate and Sintering Temperature on Mechanical Properties of W-Cu Composites Produced via Spark Plasma Sintering", International Journal of Engineering Research & Science (IJOER); Vol-8, Issue-10, October- 2022; pp. 1-6; ISSN: 2395-6992.

3. Nguyen Minh Tuan, Nguyen Van Toan, Luong Van Duong, Vu Thang Long, Tran Bao Trung, Pham Van Trinh, Doan Dinh Phuong "*Microstructure and microhardness of conical shaped W-Cu composites prepared by spark plasma sintering and subsequent spinning process*"; *IEEE Access* (accepted for publication); DOI 10.1109/ACCESS.2024.3351759 (SCIE, IF = 3,9)

4. Nguyen Minh Tuan, Nguyen Van Toan, Vu Thang Long, Luong Van Duong, Pham Van Trinh, Tran Bao Trung, Doan Dinh Phuong "*Effect of Tungsten Contents on the Jet Penetration Performance of Shaped Charge Liner Based Copper-Tungsten Composites*"; *Frontiers in Materials*; Volume 11 – 2024, <u>doi:</u> <u>10.3389/fmats.2024.1308290</u> (SCIE, IF = 3,2)

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Hà Hồng Quang, Báo cáo tổng kết đề tài "Nghiên cứu công nghệ miết ép để chế tạo nón đồng cho đạn chống tăng chống giáp phản ứng nổ" Hà nội 2016.
- 2. Lê Minh Đức, Báo cáo tổng kết đề tài "Nghiên cứu thiết kế, chế tạo đạn chống tăng ĐCT-9T kiểu Tandem bắn trên súng SPG-9" Hà nội 2017.
- Naeem, K., A. Hussain, and S. Abbas, A Review of Shaped Charge Variables for its Optimum Performance. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2019. 9(6): p. 4917-4924.
- 4. Milinazzo, J.J., *Energy Transfer of a Shaped Charge*. 2016: United States.
- Held, M., Fundamentals of shaped charges. William P. Walters and Jonas A. Zukas. John Wiley & Sons, New York 1989, 398 pp., 84 Figs., Price: \$85, ISBN 0-471-62172-2. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1989. 14(5): p. 220-220.
- 6. Walters, W., A Brief History of Shaped Charges. 2008: p. 16.
- Eather R. and A.U.K. Griffiths, *Note on the History of Shaped Charges*. 1983, Royal Armament Research and Development Establishment Report.
- 8. Walters W., A Brief History of Shaped Charges, in Proceedings of the 24th International Symposium on Ballistics. 2008: New Orleans, LA p. 3–10.
- 9. Schardin H., *About the development of shaped charge*. Defense technical books (in German). 1954.
- 10. Orlenko L.P, *Physics of explosion and impact*. Textbook for universities (in Russian) ,M. FIZMATLIT. 2006.
- Shekhar, H., Explosive Characteristics and Shaped Charge Applications of Nitromethane (NM): A Review. Central European Journal of Energetic Materials, 2012. 9: p. 87-97.

- 12. Walters W. An overview of the shaped charge concept. The 11th Annual ARL/USMA Technical Symposium. 2003.
- Shekhar, H., Theoretical Modelling of Shaped Charges in the Last Two Decades (1990-2010): A Review. Central European Journal of Energetic Materials, 2012. 9.
- 14. Chou, P. and W. Flis, *Recent Developments in Shaped Charge Technology*. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1986. **11**: p. 99-114.
- Samudre, S.S., et al., *Studies on an Improved Plastic Bonded Explosive* (*PBX*) for Shaped Charges. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2009. 34(2): p. 145-150.
- 16. Alekseevskii, V.P., *Penetration of a rod into a target at high velocity*.Combustion, Explosion and Shock Waves, 1966. 2(2): p. 63-66.
- 17. Orlenko L.P., Fizika vzryva [Physics of explosion], M. Pub.
 "Fizmatlit" [Physical and mathematical literature], 2002, Vol. 1, ISBN 5-9221-0219-2, 832 p (in Russian).
- Nguyễn Văn Thủy and Trần Văn Định, Uy lực đạn, Giáo trình của Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội, 2007.
- 19. Li, W.B., et al., *Effect of the liner material on the shape of dual mode penetrators*. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2015. 51(3): p. 387-394.
- 20. Doig, A. Some metallurgical aspects of shaped charge liners. 2002.
- 21. Manfred Held, Hydrodynamic theory of shaped charge jet penetration; Messerschmitt-Bölkow-Blohm, Schrobenhausen, 1991.
- 22. Du, Y., et al., *Study on Penetration Performance of Rear Shaped Charge Warhead*. Materials, 2021. **14**: p. 6526.

- 23. Vorotilin M.S., Calculation of the makeup of "copper tungsten" composite used as material for a conical liner of a shaped charge, Izvestija TulGu, 2011, Vol.2.
- 24. Held, M., *Liners for Shaped Charges*. JOURNAL OF BATTLEFIELD TECHNOLOGY, 2001. **4**.
- 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, 2017. 14: p. 2089-2106.
- Ahmed, M. and A.Q. Malik, A Review of Works on Shaped Charges. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2017. 7(5): p. 2098-2103.
- Park, S., et al., Study of Shape and Microstructure Changes of Ta Linear for Building an Explosively Formed Penetrator. Korean Journal of Metals and Materials, 2019. 57: p. 475-481.
- 28. Lichtenberger A. et al., Shaped charges with molybdenum liner, the Proceedings of 16th International Ballistics Symposium, San Francisco, USA, September 23-28, 1996.
- 29. Cowan K.G. and Bourne B., Analytical code and hydrocode modeling and Experimental characterisation of shaped charges containing conical molybdenum liners, the Proceedings of 19th International Ballistic Symposium, Interlaken, Switzerland, May 7-11, 2001.
- 30. Cowan K.G., e.a., Analytical code and hydrocode modelling and experimental characterisation of shaped charges containing conical tungsten liners, the Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics, San Antonio, USA, November 15-19, 1999.

- Saran, S., O. Ayısıt, and M.S. Yavuz, *Experimental Investigations* on Aluminum Shaped Charge Liners. Procedia Engineering, 2013. 58: p. 479-486.
- 32. Walters, W., W. Gooch, and M. Burkins, *The Penetration Resistance of a Titanium Alloy against Jets from Tantalum Shaped Charge Liners*. 2000.
- Elshenawy, T. and Q. Li, *Breakup Time of Zirconium Shaped Charge Jet*. Propellants, 2013. 38.
- Xu, W.-l., et al., Bore-center annular shaped charges with different liner materials penetrating into steel targets. Defence Technology, 2019. 15(5): p. 796-801.
- 35. G. Wang, Y. Qin, S. Yang, Influence of Ni additions on the microstructure andtensile property of W-Cu composites produced by direct energy deposition, J.Alloy. Compd. 899 (2022) 163272.
- 36. Kim JC, Moon IH. *Sintering of nanostructured W-Cu alloysprepared by mechanical alloying*. Nanostructured Mater1998;10:283–90.
- A.D. IvanovK., A. Nikolaev, G.M. Kalinin, M.E. Rodin, *Effect of heat treatments on the properties of CuCrZr alloys*, J. Nucl. Mater. 307–311 (2002) 673–676
- Doré, F., Lay, S., Eustathopoulos, N. & Allibert, C. H. Segregation of Fe during the sintering of doped W–Cu Alloys. Scr. Mater. 49, 237–242 (2003)
- Zhang, Z. H. et al. Generalized fabrication of nanoporous metals (Au, Pd, Pt, Ag,and Cu) through chemical dealloying. J. Phys. Chem. C 113, 12629–12636 (2009).
- 40. Azar, G. T. P., Rezaie, H. R., Gohari, B. & Razavizadeh, H. *Synthesis and densification of W–Cu, W–Cu–Ag and W–Ag composite powders via a chemicalprecipitation method.* J. Alloy. Compd. 574, 432–436 (2013)

- Chen, P., Luo, G. Q., Li, M. J., Shen, Q. & Zhang, L. M. Effects of Zn additions on the solid-state sintering of W-Cu composites. Mater. Des. 36, 108–112 (2012).
- Yang, X. H., Zou, J. T., Xiao, P. & Wang, X. H. Effects of Zr addition on properties and vacuum arc characteristics of Cu-W alloy. Vacuum 106, 16–20 (2014).
- 43. Ruijun W.F. L. T. G. and Yuling W., A study on tungsten-coppernickel alloy as shaped charge liner, Acta Armamentarii, Vol. 1, pp. 28, 2001.
- 44. Lee, W.H., *Oil well perforator design using 2D Eulerian code*. International Journal of Impact Engineering, 2002. **27**(5): p. 535-559.
- 45. Hu, Z.W., et al., Advanced progress in materials for shaped charge and explosively formed penetrator liners. RARE METAL MATERIALS AND ENGINEERING, 2004. **33**: p. 1009-1012.
- 46. Sun, M., et al., *Reactivity and Penetration Performance Ni-Al and Cu-Ni-Al Mixtures as Shaped Charge Liner Materials.* 2018. **11**(11).
- 47. Dennis R. Brauer, Frank N. Mandigo, and Derek E. Tyle, Copper alloys for shaped charge liners, United States Patent No. 5,098,487, 1992.
- 48. Cui, P., et al., Investigation of Penetration Performance of Zr-based Amorphous Alloy Liner Compared with Copper. Materials, 2020.
 13: p. 912.
- 49. William W., Introduction to Shaped Charges, A Report of Army Research Laboratory, March 2007. P.124.
- P. Zhao, S. Guo, G. Liu, Y. Chen, J. Li, Fabrication of W Cu functionally graded material with improved mechanical strength, J. Alloys Compd. 601 (2014) 289–292.

- 51. B.B. Liu, J.X. Xie, X.H. Qu, Fabrication of W-Cu functionally graded materials with high density by particle size adjustment and solid state hot press, Compos. Sci. Technol. 68 (2008) 1539–1547.
- E. Tejado, A. Müller, J.-H. You, J.Y. Pastor, *The thermo-mechanical behaviour ofW-Cu metal matrix composites for fusion heat sink applications : Theinfluence of the Cu content*, J. Nucl. Mater. 498 (2018) 468–475.
- R. Liu, T. Hao, K. Wang, T. Zhang, X.P. Wang, C.S. Liu, Q.F. Fang, *Microwave sintering of W / Cu functionally graded materials*, J. Nucl. Mater. 431 (2012) 196–201.
- 54. C. Zhou, L. Li, J. Wang, J. Yi, Y. Peng, A novel approach for fabrication of functionally graded W / Cu composites via microwave processing, J. Alloys Compd. 743 (2018) 383–387.
- 55. G. Pintsuk, I. Smid, J.-E. Doring, W. Hohenauer, J. Linke, Fabrication and characterization of vacuum plasma sprayed W / Cu-composites for extreme thermal conditions, J. Mater. Sci. 42 (2007) 30–39.
- Z.J. Zhou, J. Du, S.X. Song, Z.H. Zhong, C.C. Ge, Microstructural characterization W/Cu functionally graded materials produced by a one-step resistancesintering method, J. Alloys Compd. 428 (2007) 146–150.
- 57. J.C. Kim, I.H. Moon, *Sintering of nanostructured W-Cu alloys prepared by mechanical alloying*, Nanostruct. Mater. 10 (1998) 283–290.
- S.S. Ryu, Y.D. Kim, I.H. Moon, Dilatometric analysis on the sintering behavior ofnanocrystalline W-Cu prepared by mechanical alloying, J. Alloys Compd. 335 (2002) 233–240
- 59. Baker E. L., et al., Development of molybdenum shaped charge liners in 127th Annual Meeting and Exhibition of the Minerals, Metals & Materials Society. 1998: San Antonio, USA.

- A. Lichtenberger, N.V., D. Salignon, M. T. Daumas, J. Collard,. Shaped charges with molybdenum liner". in 16th International Ballistics Symposium. 1996. San Francisco, USA.
- 61. Tie-Fu, W. and Z. He-Rong, *Copper-Tungsten Shaped Charge Liner and its Jet.* Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1996. **21**(4): p. 193-195.
- Zygmunt, B. and Z. Wilk, Formation of Jets by Shaped Charges with Metal Powder Liners. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2008.
 33(6): p. 482-487.
- Elshenawy, T., G. Abdo, and A. Elbeih, *High Penetration Performance* of Powder Metallurgy Copper-Tungsten Shaped Charge Liners. Central European Journal of Energetic Materials, 2018. 15: p. 610-628.
- 64. Zhao, Z., et al., *Effect of Zn and Ni added in W-Cu alloy on* penetration performance and penetration mechanism of shaped charge liner. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016. **54**: p. 90-97.
- 65. Yan, Z., G. Xu, and J. Suo, *Study on W/(TiN)Ta composite and its application in shape charge liner*. SN Applied Sciences, 2020. 2(10): p. 1736.
- 66. Xiuqing Li, Minjie Zhang1, Guoshang Zhang, Shizhong Wei, Liujie Xu, Yucheng Zhou, *Effect of spark plasma sintering temperature on structure and performance characteristics of Cu-20wt%W composite,* Journal of Alloys and Compounds 912 (2022) 165246.
- 67. Lava Kumar Pillari a,1, Srinivasa R. Bakshi a, Paritosh Chaudhuri b,c,
 B.S. Murty, *Fabrication of W-Cu functionally graded composites using high energy ball milling and spark plasma sintering for plasma facing components*, Advanced Powder Technology 31 (2020) 3657–3666.

- 68. Jun-Kai Liu, Kai-Fei Wang, Kuo-Chih Chou, Guo-Hua Zhang, Fabrication of ultrafine W-Cu composite powders and its sintering behavior, j. mater. Res. Technol . 2020; 9(2):2154–2163.
- A.K. Chaubeya,*, Rajat Guptaa, Rohit Kumara, Bharat Vermaa, Shailesh Kanparab, Sivaiah Bathulac, S.S. Khirwadkarb, Ajay Dhar, *Fabrication and characterization of W-Cu functionally graded material by spark plasma sintering process*, Fusion Engineering and Design 135 (2018) 24–30.
- 70. Leus, V., Y. Khoptiar, and R. Ceder, *Exaionminat of shaped charge performance with ECAP produced liners*. Vol. 2272. 2020. 120013.
- Sun, S., et al., Comparison of Shaped Charge Jet Performance Generated by Machined and Additively Manufactured CuSn10 Liners. Materials (Basel), 2021. 14(23).
- T2. Lichtenberger AB and S. M., Influence of the structural and metallurgical state of a liner on the performance of a shaped charge.
 Rapport-Bericht Co.;, 1981. 218 (81).
- Schmidt, C.G., et al., *Effect of grain size on high strain rate deformation of copper*. Metallurgical Transactions A, 1991. 22(10): p. 2349-2357.
- 74. Jiang, Y., et al., *Investigation on the grain size effect on the copper shaped charge jet stretching behavior*. Frontiers in Materials, 2022. 9.
- 75. 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, 2021. 15: p. 2345-2354.
- 76. 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, 2021. 8(6): p. 066521.

- 77. Gurevitch, A.C., et al., *Characterization and comparison of microstructures in the shaped-charge regime: copper and tantalum.* Materials Characterization, 1993. **30**(3): p. 201-216.
- Murr, L.E., et al., A comparison of shaped charge liner cone and recovered jet fragment microstructures to elucidate dynamic recrystallization phenomena. Scripta Metallurgica et Materialia, 1995.
 32(1): p. 31-36.
- Tian, W.H., et al., Microstructural Change in Electroformed Copper Liners of Shaped Charges Upon Plastic Deformation at Ultra-High Strain Rate. Radiation Effects and Defects in Solids, 2002. 157(1-2): p. 145-156.
- Murr, L.E., H.K. Shih, and C.S. Niou, *Dynamic recrystallization in detonating tantalum shaped charges: A mechanism for extreme plastic deformation*. Materials Characterization, 1994. 33(1): p. 65-74.
- 81. Reese J. W., e.a., *Coated metal particles to enhance oil field shaped charge performance*. 2001: United State.
- 82. Walters, W.P., et al. A Study of Jets From Unsintered-Powder Metal Lined Nonprecision Small-Caliber Shaped Charges. 2001.
- Wang, C., J. Ding, and H. Zhao, Numerical Simulation on Jet Formation of Shaped Charge with Different Liner Materials. Defence Science Journal, 2015. 65: p. 279-286.
- 84. Sun, M., et al., *Reactivity and Penetration Performance Ni-Al and Cu-Ni-Al Mixtures as Shaped Charge Liner Materials*. Materials, 2018. 11: p. 2267.
- 85. Elshenawy, T., Density Effect of the Compacted Copper-Tungsten Shaped Charge Powder Liners on its Penetration Performance. Journal of Powder Metallurgy & Mining, 2017. **06**.

- Zygmunt, B. and Z. Wilk, Formation of Jets by Shaped Charges with Metal Powder Liners. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2008. 33.
- Zhanlei, W., et al., Dynamic Consolidation of W-Cu Nano-Alloy and Its Performance as Liner Materials. Rare Metal Materials and Engineering, 2014. 43(5): p. 1051-1055.
- Tao, J. and X. Shi, Properties, phases and microstructure of microwave sintered W-20Cu composites from spray pyrolysiscontinuous reduction processed powders. Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 2012. 27(1): p. 38-44.
- Yu, Y., W. Zhang, and H. Yu, Effect of Cu content and heat treatment on the properties and microstructure of W-Cu composites produced by hot extrusion with steel cup. Advanced Powder Technology, 2015.
 26(4): p. 1047-1052.
- 90. Luo, C., et al., The activated sintering of WCu composites through spark plasma sintering. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019. 81: p. 27-35.
- 91. Pervikov, A., et al., Synthesis of W-Cu composite nanoparticles by the electrical explosion of two wires and their consolidation by spark plasma sintering. Materials Research Express, 2019. **6**: p. 1265i9.
- 92. S.K. Kamal, Y. Sushma, J. Vimala, B. Shankar, P. Ghosal, L. Durai, B. Majumdar, *Effect of processing route on densification of W-10wt%Cu nano-composite using spark plasma sintering*, J. Alloy. Compd. 785 (2019) 1137–1143.
- C.L. Luo, Y. Wang, J.X. Xu, G. Xu, Z. Yan, J. Li, H. Li, *The activated sintering of W-Cu composites through spark plasma sintering*, Int. J. Refract. Met. Hard Mater. 81 (2019) 27–35.

- 94. A. Elsayed, W. Li, O.A.E. Kady, R. German, *Experimental investigations on the synthesis of W-Cu nano-composite through spark plasma sintering*, J. Alloy. Compd. 639 (2015) 373–380
- 95. X.Y. Song, X.M. Liu, J.X. Zhang, Neck formation and self-adjusting mechanism of neck growth of conducting powders in spark plasma sintering, J. Am. Ceram. Soc. 89 (2) (2006) 494–500
- 96. D.G. Liu, H.R. Ma, C.F. Ruan, L.M. Luo, Y. Ma, Z.M. Wang, Y.C. Wu, Interface diffusion and mechanical properties of ODS-W/Cu prepared by spark plasma sintering, 190 (2021) 278–288.
- P. Dong, Z. Wang, W. Wang, S. Chen, J. Zhou, Understanding the spark plasma sintering from the view of materials joining, Scr. Mater. 123 (2016) 118–121.
- S.X. Ke, K.Q. Feng, H.L. Zhou, Y. Shui, *Phase evolution of Mo-W-Cu* alloy rapid prepared by spark plasma sintering, J. Alloy. Compd. 775 (2019) 784–789
- 99. 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, 2019. 82: p. 91-99.
- 100. Baykara, T., V. Günay, and A. Demirural, Structural Evolution and Microstructural Features of the Hydrodynamically Penetrating Copper Jet of a Shaped Charge. Journal of Materials Engineering and Performance, 2021. 30(3): p. 1862-1871.
- 101. Súng phóng lựu,
 https://vi.wikipedia.org/wiki/S%C3%BAng_ph%C3%B3ng_l%E1%BB
 %B1u.

- 102. Suliman, H.M. and S. Kivrak, Anti-Tank Guided Missile System Design Based on an Object Detection Model and a Camera. International Journal of Computational Intelligence Systems, 2023. 16(1): p. 20.
- 103. Nguyễn Công Hòe, Báo cáo tổng kết đề tài cấp Nhà nước "Nghiên cứu thiết kế chế thử súng, dây nổ và đạn bắn via phục vụ khai thác dầu khí", Hà nội 2006.
- 104. Zhang, M., et al., Structure of copper shaped charge liner evolution law based on die forging process. Journal of Physics: Conference Series, 2020. 1507: p. 032036.
- 105. Xue, Q., et al., Mechanisms for initial grain refinement in OFHC copper during equal channel angular pressing. Acta Materialia, 2007. 55(2): p. 655-668.
- 106. Wang, X.X., et al., *A unique spinning method for grain refinement: repetitive shear spinning*. Procedia Engineering, 2017. **207**: p. 1725-1730.
- 107. Bay, B., et al., Overview no. 96 evolution of f.c.c. deformation structures in polyslip. Acta Metallurgica et Materialia, 1992. 40(2): p. 205-219.
- Welsh B.S., *High Speed Deformation and Break-Up of Shaped Charge Jets*. 1993, The University of Nottingham, p. 221.
- 109. Petit, J., V. Jeanclaude, and C. Fressengeas, *Effects of liner grain size* on shaped - Charge jet performance: A combined experimental/numerical/analytical approach. http://dx.doi.org/10.1051/jp4:2006134058, 2006. 134.
- 110. Ibrahim, H., A. Aziz, and A. Rahmat, *Enhanced liquid-phase* sintering of W-Cu composites by liquid infiltration. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014.
 43(Complete): p. 222-226.

- 111. Gu, D. and Y. Shen, *Influence of Cu-liquid content on densification and microstructure of direct laser sintered submicron W–Cu/micron Cu powder mixture*. Materials Science and Engineering: A, 2008. 489(1): p. 169-177.
- 112. Elsayed, A., et al., *Experimental investigations on the synthesis of W– Cu nanocomposite through spark plasma sintering*. Journal of Alloys and Compounds, 2015. **639**: p. 373-380.