

**BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI**



NGUYỄN HỒNG TIẾN

**NGHIÊN CỨU CẢI THIỆN ĐỘ BỀN MÒN VÍT ÉP TẢI TRỌNG CAO
BẰNG GIẢI PHÁP THIẾT KẾ KẾT HỢP PHUN PHỦ HVOF**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội – 2026

**BỘ CÔNG THƯƠNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI**



NGUYỄN HỒNG TIẾN

**NGHIÊN CỨU CẢI THIỆN ĐỘ BỀN MÒN VÍT ÉP TẢI TRỌNG CAO
BẰNG GIẢI PHÁP THIẾT KẾ KẾT HỢP PHUN PHỦ HVOF**

Ngành đào tạo : Kỹ thuật cơ khí
Mã số : 9.52.01.03

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC :
1. PGS.TS. NGUYỄN TUẤN LINH
2. TS. NGUYỄN VĂN THIỆN

Hà Nội – 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan nội dung luận án là công trình nghiên cứu của riêng tôi dưới sự hướng dẫn khoa học của thầy PGS.TS Nguyễn Tuấn Linh hướng dẫn và thầy TS. Nguyễn Văn Thiện hướng dẫn. Những kết quả nghiên cứu được trình bày trong luận án là trung thực, không sao chép từ bất cứ công trình nghiên cứu nào khác.

Hà Nội, ngày 15 tháng 03 năm 2026

Tác giả luận án

LỜI CẢM ƠN

Trước hết, tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc và lòng trân trọng nhất tới tập thể hướng dẫn khoa học của tôi, PGS.TS Nguyễn Tuấn Linh và TS Nguyễn Văn Thiện, những người thầy không chỉ là nguồn cảm hứng mà còn là kim chỉ nam cho bước đường nghiên cứu. Sự hướng dẫn tận tâm, kiên nhẫn và hỗ trợ không ngừng nghỉ của các Thầy trong suốt quá trình thực hiện luận án này là điều không thể diễn tả hết bằng lời.

Tôi cũng xin gửi lời cảm ơn sâu sắc tới Ban giám hiệu Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội đã tạo mọi điều kiện thuận lợi nhất về mặt điều kiện làm việc và trang thiết bị nghiên cứu, giúp tôi có thể tập trung vào luận án một cách tốt nhất. Sự ủng hộ và hỗ trợ này thật sự là nguồn động viên lớn lao đối với tôi trong suốt quá trình nghiên cứu.

Bên cạnh đó, tôi không thể không nhắc đến sự giúp đỡ của các Thầy, Cô, đồng nghiệp tại Trường Cơ khí - Ô tô, Trung tâm Việt Nhật, Trung tâm đào tạo sau đại học đã hỗ trợ tôi trong suốt quá trình nghiên cứu.

Tôi xin cảm ơn sự hỗ trợ về tài chính, thời gian và tạo điều kiện giúp đỡ của Ban giám hiệu, phòng Tổ chức hành chính, Trường Đại học công nghiệp Hà Nội.

Tôi cũng muốn bày tỏ lòng biết ơn vô hạn tới bố mẹ của tôi, những người đã luôn bên cạnh, động viên và hỗ trợ tôi không chỉ trong quá trình này mà còn trong cuộc sống. Sự hy sinh và tình yêu thương của bố mẹ là nguồn động lực vô giá giúp tôi vượt qua mọi khó khăn.

Cuối cùng, lời cảm ơn sâu sắc nhất của tôi dành tới người vợ thương yêu của tôi, người bạn đồng hành, người luôn ủng hộ, chia sẻ mọi điều trong cuộc sống và công việc trong những năm qua.

Hà Nội, ngày 15 tháng 03 năm 2026

Tác giả luận án

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC	iii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ TỪ VIẾT TẮT.....	vii
DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU	viii
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ.....	x
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU.....	xiv
MỞ ĐẦU	1
1. Lý do lựa chọn đề tài.....	1
2. Lịch sử nghiên cứu	2
3. Mục tiêu nghiên cứu của luận án, đối tượng, phạm vi nghiên cứu	3
4. Nội dung nghiên cứu	3
5. Phương pháp nghiên cứu trong thiết kế vít ép tải trọng cao	4
6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn đề tài	4
7. Bố cục của luận án.....	5
CHƯƠNG 1. NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ VÍT ÉP TẢI TRỌNG CAO	6
1.1. Khái niệm về vít ép tải trọng cao	6
1.2. Cơ sở lý thuyết thiết kế vít ép tải trọng cao	9
1.2.1. Cơ sở lý thuyết thiết kế vít ép	9
1.2.1.1. Các thông số làm việc của vít ép.....	10
1.2.1.2. Các phương pháp thiết kế vít ép.....	12
1.2.2. Cơ sở lý thuyết mô phỏng vít ép	14
1.3. Cơ sở lý thuyết về công nghệ phun phủ HVOF	20
1.4. Tình hình nghiên cứu ngoài nước và Việt Nam	25

1.4.1. Tình hình nghiên cứu ngoài nước	25
1.4.2. Tình hình nghiên cứu tại Việt Nam.....	32
KẾT LUẬN CHƯƠNG 1.....	36
CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG NHẪM CẢI THIỆN ĐỘ BỀN MÒN CHO VÍT ÉP TẢI TRỌNG CAO	38
2.1. Phân tích các chỉ tiêu làm việc của vít ép.....	38
2.1.1. Thở tích ép.....	38
2.1.2. Áp suất nén.....	40
2.2. Xây dựng phương pháp xác định biên dạng vít ép	41
2.2.1. Sơ đồ khối giải bài toán xác định biên dạng vít ép	41
2.2.2. Các kết quả về biên dạng vít ép.....	43
2.3. Nghiên cứu mô phỏng quá trình ép vật liệu rời rạc.....	45
2.3.1. Xây dựng mô hình hình học vít ép – bu lông ép	46
2.3.2. Xây dựng mô hình vật liệu.....	48
2.3.2.1. <i>Mô hình vật liệu mùn cưa</i>	48
2.3.2.2. <i>Vật liệu vít ép</i>	60
2.3.3. Xây dựng điều kiện biên	60
2.4. Phân tích kết quả mô phỏng.....	62
2.4.1. Phân tích kết quả áp suất nén 3 mô hình mô phỏng.....	64
2.4.2. Phân tích kết quả lực tác dụng lên ba mô hình vít ép	69
2.4.2.1. <i>Phân tích kết quả lực nén.</i>	69
2.4.2.2. <i>Phân tích các thành phần lực tác dụng lên vít ép.</i>	75
2.4.3. Phân tích kết quả các đại lượng tác động lên hạt.	83

2.4.3.1. Phân tích kết quả ứng suất dọc trục.....	83
2.4.3.2. Phân tích kết quả lực nén tác dụng lên vật liệu rời rạc.	85
2.4.3.4. Phân tích kết quả nhiệt.....	87
2.4.3.5. Phân tích kết quả Tensor ứng suất.....	89
2.4.3.6. Phân tích kết quả vận tốc và động năng hạt trên ba mô hình.	92
2.5. Phân tích kết quả mòn.	97
KẾT LUẬN CHƯƠNG 2.....	107
CHƯƠNG 3: VẬT LIỆU, TRANG THIẾT BỊ VÀ THỰC NGHIỆM TẠO LỚP PHỦ HVOF.....	109
3.1. Vật liệu, trang thiết bị thực nghiệm.....	110
3.1.1. Vật liệu thực nghiệm	110
3.1.2. Trang thiết bị thực nghiệm	111
3.2. Lựa chọn các thông số phun phủ HVOF.....	114
3.3. Thực nghiệm đo cấu trúc, độ cứng lớp phủ.....	115
3.3.1. Thực nghiệm đo cấu trúc lớp phủ	115
3.3.2. Thực nghiệm đo độ hạt lớp phủ	115
3.3.3. Thực nghiệm đo độ xốp lớp phủ	116
3.3.4. Thực nghiệm đo chiều dày lớp phủ.....	121
3.4. Thực nghiệm đo độ cứng của lớp phủ	123
KẾT LUẬN CHƯƠNG 3.....	127
CHƯƠNG 4: THỬ NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ ĐỘ BỀN MÒN CỦA VÍT ÉP TẢI TRỌNG CAO	128

4.1. Thử nghiệm và đánh giá độ bền mòn của vít ép trong điều kiện làm việc thực tế	128
4.1.1. Quy trình thử nghiệm và đánh giá độ bền mòn của vít ép trong điều kiện làm việc thực tế	128
4.1.2. Kết quả thử nghiệm và đánh giá độ bền mòn của vít ép trong điều kiện làm việc thực tế	129
4.2. Kiểm tra kết quả thực nghiệm trên máy quét 3D	134
4.3. Phân tích p-value cho ba mô hình quét 3D	140
4.4. Kiểm tra chất lượng bán thành phẩm viên nén	142
KẾT LUẬN CHƯƠNG 4.....	144
KẾT LUẬN CHUNG	147
HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO	149
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN....	151
DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	152

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ TỪ VIẾT TẮT

TT	Viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
1	ANOVA	Analysis of Variance	Phân tích phương sai
2	CAD	Computer – Aided Design	Thiết kế có sự trợ giúp của máy tính
3	CFD	Computational Fluid Dynamics	Phương pháp động lực học chất lưu
4	CGS	Cold Gas Spray	Phun nguội
5	DEM	Discrete Element Method	Phương pháp phần tử rời rạc
6	DOE	Design of Experiment	Phương pháp thiết kế thí nghiệm
7	EDEM	Engineering Discrete Element Method	Phần mềm hiệu suất cao để mô phỏng vật liệu dạng khối và dạng hạt
8	FEM	Finite Element Method	Phương pháp phần tử hữu hạn
9	FVM	Finite Volume Method	Phương pháp thể tích hữu hạn
10	GA	Genetic Algorithm	Giải thuật di truyền
11	HRC	Hardness of Steel According to the Rockwell Scale	Độ cứng của thép theo thang Rockwell
12	HVOF	High Velocity Oxygen Fuel	Phương pháp phun nhiên liệu tốc độ cao
13	MPM	Material Point Method	Phương pháp điểm vật chất
14	PVD	Physical Vapor Deposition	Bốc hơi lắng đọng vật lý
15	SEM	Spectral Element Method	Phương pháp phần tử quang phổ
16	SPH	Smoothed Particle Hydrodynamics	Phương pháp thủy động lực học
17	VPS	Vacuum Plasma Spray	Phun plasma trong chân không

DANH MỤC CÁC BẢNG BIỂU

<i>Bảng 1 - 1. Các đặc tính lớp phủ.....</i>	<i>23</i>
<i>Bảng 2- 1. Thông số vật liệu mìn của</i>	<i>50</i>
<i>Bảng 2- 2. Mô hình hạt mìn của.....</i>	<i>58</i>
<i>Bảng 2- 3. Thông số vật liệu thép C45.....</i>	<i>60</i>
<i>Bảng 2- 4. Thành phần nguyên tố hóa học thép C45.....</i>	<i>60</i>
<i>Bảng 2- 5. Điều kiện biên trong quá trình mô phỏng</i>	<i>61</i>
<i>Bảng 2- 6. Tổng áp suất nén của 3 mô hình vít ép.....</i>	<i>67</i>
<i>Bảng 2- 7. Tổng lực nén của 3 mô hình vít ép</i>	<i>73</i>
<i>Bảng 2- 8. Tổng lực tác dụng lên vít của 3 mô hình vít ép</i>	<i>81</i>
<i>Bảng 2- 9. Ứng suất dọc trục trung bình của hạt trên 3 mô hình vít ép</i>	<i>84</i>
<i>Bảng 2- 10. Lực nén trung bình tác dụng lên hạt của 3 mô hình vít ép.....</i>	<i>86</i>
<i>Bảng 2- 11. Thông lượng nhiệt trung bình tác dụng lên hạt của 3 mô hình vít ép...88</i>	
<i>Bảng 2- 12. Tensor ứng suất trung bình tác dụng lên hạt của 3 mô hình vít ép.....</i>	<i>90</i>
<i>Bảng 2- 13. Vận tốc trung bình của hạt trên 3 mô hình vít ép.....</i>	<i>92</i>
<i>Bảng 2- 14. Giá trị mòn trung bình của 3 mô hình vít ép.....</i>	<i>104</i>
<i>Bảng 2- 15. Giá trị tổng mòn của 3 mô hình vít ép.....</i>	<i>105</i>
<i>Bảng 2- 16. Thông số hình học mô hình vít ép 3</i>	<i>106</i>
<i>Bảng 3- 1. Thành phần hoá học bột phun phủ.....</i>	<i>111</i>
<i>Bảng 3- 2. Thuộc tính của WC và Ni</i>	<i>111</i>
<i>Bảng 3- 3. Bảng Taguchi L9 với các giá trị độ xốp đo được.....</i>	<i>118</i>
<i>Bảng 3- 4. Hệ số S_{Ni} được tính toán cho độ xốp lớp phủ.....</i>	<i>118</i>
<i>Bảng 3- 5. Hệ số S_N cho mỗi cấp độ ảnh hưởng đến độ xốp lớp phủ</i>	<i>119</i>
<i>Bảng 3- 6. Bảng Taguchi L9 với các giá trị độ cứng đo được.....</i>	<i>124</i>
<i>Bảng 3- 7. Hệ số S_{Ni} được tính toán cho các giá trị độ cứng đo được</i>	<i>124</i>
<i>Bảng 3- 8. Hệ số S_N cho mỗi cấp độ ảnh hưởng đến các giá trị độ cứng đo được</i>	<i>125</i>
<i>Bảng 4- 1. Kết quả thử nghiệm lượng mòn với vít ép tại nhà máy không phủ và phủ HVOF</i>	<i>130</i>
<i>Bảng 4- 2. Bảng so sánh lượng mòn vít ép tại nhà máy và vít ép tại nhà máy được phủ.....</i>	<i>130</i>

<i>Bảng 4- 3. Kết quả thử nghiệm lượng mòn với vít ép tối ưu không phủ và phủ HVOF</i>	131
<i>Bảng 4- 4. Bảng so sánh lượng mòn vít ép tại nhà máy và vít ép tại nhà máy được phủ</i>	132
<i>Bảng 4- 5. Bảng so sánh lượng mòn vít ép tại nhà máy và vít ép tối ưu không phủ</i>	132
<i>Bảng 4- 6. Bảng so sánh 3 mô hình sau khi quét 3D</i>	138
<i>Bảng 4- 7. Bảng giá trị F-value và p-value</i>	140

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ

Hình 1- 1. Vít ép tải trọng cao	7
Hình 1- 2. Hình ảnh thành phẩm than sạch.....	8
Hình 1- 3. Vít ép dùng trong sản xuất than sạch	8
Hình 1- 4. Cấu tạo vít ép – buồng ép	9
Hình 1- 5. Mô hình DEM sử dụng mô hình hạt khối	19
Hình 1- 6. Sơ đồ phân loại các phương pháp phun phủ nhiệt.....	21
Hình 1- 7. Thiết bị phun phủ HVOF	22
Hình 2- 1. Biên dạng mặt cắt dọc vít ép.....	38
Hình 2- 2. Bước góc trên biên dạng vít ép	41
Hình 2- 3. Sơ đồ khối xác định biên dạng vít ép bằng GA.....	42
Hình 2- 4. Trường hợp thứ nhất, $\frac{R_1}{D} = \frac{R_2}{D} \rightarrow 0$	44
Hình 2- 5. Trường hợp thứ hai, $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$	44
Hình 2- 6. Trường hợp thứ ba $\frac{R}{D} \neq 0$ và $\alpha_1 \neq \alpha_2$	44
Hình 2- 7. Sơ đồ khối bài toán mô phỏng ép vật liệu mùn cưa trong hệ thống vít ép – buồng ép	46
Hình 2- 8. Mô hình hình học hệ thống vít ép – buồng ép.....	47
Hình 2- 9. Hình ảnh mô hình vít ép thứ nhất	47
Hình 2- 10. Hình ảnh mô hình vít ép thứ hai	47
Hình 2- 11. Hình ảnh mô hình vít ép thứ 3	48
Hình 2- 12. Hình ảnh mùn cưa trên kính hiển vi quang học Leica độ phóng đại 50 lần	48
Hình 2- 13. Phương pháp liên tục trong mô phỏng DEM [20]	49
Hình 2- 14. Phương pháp rời rạc trong mô phỏng DEM [20]	49
Hình 2- 15. Phương pháp rời rạc trong mô phỏng DEM [20]	51
Hình 2- 16. Nguyên lý bước thời gian trong mô phỏng DEM [20]	52
Hình 2- 17. Nguyên lý bước thời gian Rayleigh trong mô phỏng DEM [20]	53
Hình 2- 18. Nguyên lý phát hiện va chạm trong mô phỏng DEM [20]	54
Hình 2- 19. Mô hình mòn vít ép khi tương tác vật liệu rời rạc [20].....	55
Hình 2- 20. Nguyên tắc xây dựng mô hình vật liệu rời rạc	58

Hình 2- 21. Gán mô hình vật liệu mùn cưa.....	59
Hình 2- 22. Mô hình mô phỏng quá trình ép trên phần mềm EDEM	62
Hình 2- 23. Đồ thị kết quả mô phỏng áp suất nén mô hình 1	64
Hình 2- 24. Đồ thị kết quả mô phỏng áp suất nén mô hình thứ 2	65
Hình 2- 25. Đồ thị kết quả mô phỏng áp suất nén mô hình thứ 3.....	65
Hình 2- 26. Áp suất trong buồng ép của mô hình vít ép thứ 1	66
Hình 2- 27. Áp suất trong buồng ép của mô hình vít ép thứ 2.....	66
Hình 2- 28. Áp suất trong buồng ép của mô hình vít ép thứ 3.....	67
Hình 2- 29. Đồ thị áp suất 3 mô hình.....	68
Hình 2- 30. Đồ thị kết quả tổng lực nén mô hình thứ 1	70
Hình 2- 31. Đồ thị kết quả tổng lực nén mô hình thứ 2	71
Hình 2- 32. Đồ thị kết quả tổng lực nén mô hình thứ 3	71
Hình 2- 33. Lực nén lên bề mặt vít của mô hình vít ép thứ 1.....	72
Hình 2- 34. Lực nén lên bề mặt vít của mô hình vít ép thứ 2.....	72
Hình 2- 35. Lực nén lên bề mặt vít của mô hình vít ép thứ 3.....	73
Hình 2- 36. Đồ thị tổng lực nén 3 mô hình	73
Hình 2- 37. Đồ thị tổng lực pháp tuyến 3 mô hình	76
Hình 2- 38. Đồ thị tổng lực tiếp tuyến 3 mô hình	78
Hình 2- 39. Tổng lực tác dụng lên bề mặt vít của mô hình vít ép thứ nhất	80
Hình 2- 40. Tổng lực tác dụng lên bề mặt vít của mô hình vít ép thứ hai	80
Hình 2- 41. Tổng lực tác dụng lên bề mặt vít của mô hình vít ép thứ ba.....	81
Hình 2- 42. Đồ thị tổng lực 3 mô hình	82
Hình 2- 43. Ứng suất dọc trục của hạt trên mô hình thứ 1, 2, 3.....	84
Hình 2- 44. Đồ thị ứng suất dọc trục 3 mô hình	85
Hình 2- 45. Lực nén trung bình tác dụng lên hạt của mô hình vít thứ 1, 2, 3	86
Hình 2- 46. Đồ thị Lực nén trung bình tác dụng lên vật liệu 3 mô hình.....	87
Hình 2- 47. Thông lượng nhiệt trung bình tác dụng lên hạt của 3 mô hình thứ 1, 2, 3	88
Hình 2- 48. Đồ thị Thông lượng nhiệt trung bình 3 mô hình.....	89
Hình 2- 49. Tensor ứng suất tác dụng lên hạt của ba mô hình.....	90
Hình 2- 50. Đồ thị Tensor ứng suất 3 mô hình	91

Hình 2- 51. Vận tốc trung bình hạt của 3 mô hình vít ép.....	92
Hình 2- 52. Đồ thị Vận tốc trung bình hạt 3 mô hình.....	93
Hình 2- 53. Đồ thị động năng hạt 3 mô hình.....	95
Hình 2- 54. Kết quả mô phỏng lượng mòn của mô hình vít ép 1	98
Hình 2- 55. Đồ thị mòn trung bình của mô hình vít ép thứ nhất.....	98
Hình 2- 56. Đồ thị tổng Lượng mòn của mô hình vít ép thứ nhất.....	99
Hình 2- 57. Vị trí mòn chính trên mô hình vít ép thứ nhất.....	99
Hình 2- 58. Kết quả mô phỏng lượng mòn của mô hình vít ép 2.....	100
Hình 2- 59. Đồ thị lượng mòn trung bình của mô hình vít ép thứ 2	100
Hình 2- 60. Đồ thị lượng mòn tổng của mô hình vít ép thứ 2.....	101
Hình 2- 61. Vị trí mòn chính trên mô hình vít ép thứ 2.....	101
Hình 2- 62. Kết quả mô phỏng lượng mòn của mô hình vít ép thứ 3.....	102
Hình 2- 63. Đồ thị lượng mòn trung bình của mô hình vít 3	102
Hình 2- 64. Đồ thị tổng lượng mòn của mô hình vít thứ 3.....	103
Hình 2- 65. Vị trí mòn chính trên mô hình vít ép thứ 3.....	103
Hình 2- 66. Lượng mòn trung bình 3 mô hình	104
Hình 2- 67. Tổng lượng mòn 3 mô hình.....	105
Hình 3- 1. Sơ đồ thực nghiệm đánh giá độ bền mòn.....	109
Hình 3- 2. Sơ đồ cắt mẫu thực nghiệm từ vít ép	110
Hình 3- 3. Hình ảnh mẫu thực nghiệm cắt từ vít ép.....	110
Hình 3- 4. Thiết bị phun HVOF	112
Hình 3- 5. Kính hiển vi quang học LEICA DM750 M	113
Hình 3- 6. Máy đo độ cứng ISOSCAN HV2 AC.....	114
Hình 3- 7. Ảnh phóng đại x300 đo kích thước hạt của lớp phủ.....	116
Hình 3- 8. Ảnh phóng đại x300 lớp phủ có độ xốp	117
Hình 3- 9. Ảnh phân tích theo % của độ xốp lớp phủ.....	117
Hình 3- 10. Đồ thị ảnh hưởng của mỗi thông số chính đến độ xốp của lớp phủ....	120
Hình 3- 11. Đồ thị ảnh hưởng tương tác của các thông số đến độ xốp lớp phủ....	120
Hình 3- 12. Đồ thị ảnh hưởng tương tác của các thông số F_p , R_p , D_p đến độ xốp lớp phủ.....	121
Hình 3- 13. Ảnh phóng đại x300 đo kích thước hạt của lớp phủ.....	121
Hình 3- 14. Đồ thị ảnh hưởng của mỗi thông số chính đến độ cứng của lớp phủ..	125

Hình 3- 15. Đồ thị ảnh hưởng của mỗi thông số chính đến độ cứng của lớp phủ..	126
Hình 3- 16. Đồ thị ảnh hưởng của mỗi thông số chính đến độ cứng của lớp phủ..	126
Hình 4- 1. Quy trình thử nghiệm chung	129
Hình 4- 2. Hình ảnh vít không phủ bị mòn, biến dạng nhiệt.....	131
Hình 4- 3. Hình ảnh vít phủ bị mòn	131
Hình 4- 4. Lượng mòn trung bình 4 loại vít.....	133
Hình 4- 5. Mô hình 3D quét và mô hình hoàn thiện vít ép.....	135
Hình 4- 6. Vít ép mô hình 3 ban đầu (1) và sau khi làm việc (2).....	135
Hình 4- 7. Hình ảnh so sánh mòn vít ép mô hình 1 sau khi làm việc so với vít ép ban đầu.....	136
Hình 4- 8. Hình ảnh so sánh mòn vít ép mô hình 1 sau khi làm việc so với vít ép ban đầu tại 3 vị trí cánh vít	136
Hình 4- 9. Hình ảnh so sánh mòn vít ép mô hình 2 sau khi làm việc so với vít ép ban đầu.....	137
Hình 4- 10. Hình ảnh so sánh mòn vít ép mô hình 2 sau khi làm việc so với vít ép ban đầu tại 3 vị trí cánh vít	137
Hình 4- 11. Hình ảnh so sánh mòn vít ép mô hình 3 sau khi làm việc so với vít ép ban đầu.....	138
Hình 4- 12. Hình ảnh so sánh mòn vít ép mô hình thứ ba sau khi làm việc so với vít ép ban đầu tại 3 vị trí cánh vít	138
Hình 4- 13. Hình ảnh thử nghiệm mẫu bán thành phẩm	142
Hình 4- 14. Kết quả thử nén ngang mẫu bán thành phẩm.....	143
Hình 4- 15. Kết quả thử nén dọc mẫu bán thành phẩm	143

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

TT	Ký hiệu	Diễn giải	Đơn vị
1	τ	Ứng suất bám dính của lớp phủ	MPa
2	D	Đường kính ngoài vít ép	mm
3	D_m	Đường kính trung bình trục vít	mm
4	D_p	Khoảng cách phun	m
5	e	Chiều rộng cánh vít	mm
6	F_p	Lưu lượng phun	g/ph
7	H	Độ cứng của lớp phủ	HRC
8	k	Tỷ số nén	-
9	L	Chiều dài buồng ép	mm
10	n	Tốc độ quay của trục vít	Vòng/ phút
11	R_1	Bán kính lượn góc trước	mm
12	R_2	Bán kính lượn góc sau	mm
13	R_h	Bán kính hạt	mm
14	R_p	Tỷ lệ oxy/propan	-
15	s	Bước vít	mm
16	T_R	Bước thời gian Rayleigh	s
17	V	Thể tích phần nguyên liệu được điền đầy trong buồng ép	m^3
18	W	Độ ẩm của mùn cưa sau sấy	%
19	α_1	Góc trước cánh vít	°
20	α_2	Góc sau cánh vít	°
21	ρ_s	Khối lượng riêng của vật liệu sau nén	kg/m^3
22	ρ_b	Khối lượng riêng ban đầu của vật liệu	kg/m^3

MỞ ĐẦU

1. Lý do lựa chọn đề tài

Vít ép tải trọng cao là bộ phận quan trọng trong các dây chuyền xử lý và gia công vật liệu rời, thực hiện đồng thời chức năng nén chặt, tạo hình và vận chuyển vật liệu dưới áp suất lớn. Kết cấu của bộ phận này gồm trục vít xoắn và cánh vít, cho phép tạo lực nén đủ lớn để bảo đảm độ đồng đều cũng như độ bền cơ học của sản phẩm sau ép. Nhờ khả năng làm việc ổn định trong điều kiện tải lớn, vít ép được sử dụng rộng rãi trong nhiều lĩnh vực công nghiệp như chế biến thực phẩm, sản xuất viên nhiên liệu sinh học, xử lý chất thải rắn và tạo hình vật liệu xây dựng. Tuy nhiên, trong thực tế vận hành, vít ép thường xuyên làm việc trong môi trường bất lợi với áp lực lớn, ma sát cao, nhiệt độ tăng mạnh và tiếp xúc liên tục với vật liệu có tính mài mòn. Hệ quả là chi tiết này nhanh chóng bị suy giảm biên dạng làm việc, phát sinh biến dạng và giảm tuổi thọ sử dụng. Tình trạng đó không chỉ làm giảm chất lượng sản phẩm mà còn làm tăng chi phí sửa chữa, thay thế, gây gián đoạn sản xuất và làm giảm hiệu quả kinh tế của doanh nghiệp.

Đối với lĩnh vực sản xuất than sạch từ mùn cưa, vỏ trấu, dăm bào và các dạng sinh khối tương tự, vít ép tải trọng cao giữ vai trò quyết định trong việc tạo ra sản phẩm có độ kết dính tốt, mật độ cao và thời gian cháy dài. Vì vậy, nâng cao độ bền mòn của vít ép không thể chỉ dừng ở lựa chọn vật liệu nền mà cần được tiếp cận theo hướng tổng hợp, kết hợp giữa tối ưu hóa hình học và tăng cường chất lượng bề mặt làm việc. Trong đó, bề mặt vít ép là khu vực cần được quan tâm đặc biệt vì đây là vùng trực tiếp tiếp xúc với vật liệu và chịu mài mòn mạnh nhất. Việc ứng dụng các công nghệ phủ tiên tiến, đặc biệt là phun phủ HVOF, có thể cải thiện rõ rệt độ cứng, khả năng chống mài mòn và tuổi thọ của chi tiết. Bên cạnh đó, việc kết hợp công nghệ xử lý bề mặt với mô phỏng số còn cho phép dự báo khu vực chịu mài mòn lớn, qua đó hỗ trợ hoàn

thiện thiết kế, giảm chi phí vận hành và nâng cao khả năng cạnh tranh của sản phẩm.

Xuất phát từ yêu cầu thực tiễn của ngành sản xuất than sạch cũng như các lĩnh vực có điều kiện làm việc khắc nghiệt tương tự, tác giả lựa chọn thực hiện đề tài luận án tiến sĩ: **“Nghiên cứu cải thiện độ bền mòn vít ép tải trọng cao bằng giải pháp thiết kế kết hợp phun phủ HVOF”**. Luận án hướng tới việc đồng thời tối ưu hình học vít ép, mô phỏng quá trình chuyển động của vật liệu và quy luật mài mòn, kết hợp với giải pháp xử lý bề mặt nhằm nâng cao hiệu quả vận hành, kéo dài tuổi thọ thiết bị và giảm chi phí bảo trì.

2. Lịch sử nghiên cứu

Lịch sử nghiên cứu cho thấy vấn đề thiết kế, tối ưu hóa và nâng cao độ bền mòn của các chi tiết làm việc dưới tải trọng lớn đã được nhiều nhà khoa học quan tâm từ khá sớm, trong đó có các cơ cấu vít ép dùng trong công nghiệp chế biến sinh khối. Từ thập niên 1990, nhiều công trình đã tập trung vào mô hình hóa ứng suất – biến dạng, nghiên cứu cơ chế mài mòn và tối ưu hóa hình học vít bằng các phương pháp phân tích số, đặc biệt là DEM và FEM. Trong giai đoạn 2000–2020, sự phát triển của các mô hình mài mòn hiện đại như Oka, Archard cải tiến và công nghệ phủ HVOF đã mở ra hướng tiếp cận mới cho việc nâng cao khả năng chống mài mòn của chi tiết cơ khí. Tại Việt Nam, các nghiên cứu chủ yếu mới tập trung vào cải tiến thiết bị ép viên, khảo sát thực nghiệm độ bền mòn và ứng dụng công nghệ phủ trong một số lĩnh vực cơ khí – luyện kim; trong khi đó, các nghiên cứu mô phỏng chi tiết trường lực trong vít ép, cũng như đánh giá tổng hợp cơ – nhiệt – mài mòn dưới điều kiện làm việc thực tế vẫn còn hạn chế. Khoảng trống này cho thấy cần có các nghiên cứu chuyên sâu hơn theo hướng kết hợp tối ưu thiết kế với giải pháp vật liệu và công nghệ tiên tiến như phun phủ HVOF cùng mô phỏng DEM/FEM hiện đại.

3. Mục tiêu nghiên cứu của luận án, đối tượng, phạm vi nghiên cứu

- Mục tiêu nghiên cứu của luận án: Luận án hướng tới việc đề xuất và kiểm chứng giải pháp nâng cao độ bền mòn của vít ép làm việc trong điều kiện tải trọng cao thông qua việc tối ưu hóa thiết kế hình học kết hợp ứng dụng công nghệ phun phủ HVOF. Trên cơ sở mô phỏng và thực nghiệm, nghiên cứu nhằm cải thiện hiệu quả làm việc và kéo dài tuổi thọ sử dụng của vít ép.

- Đối tượng nghiên cứu của luận án là Vít ép tải trọng cao dùng để nén và vận chuyển vật liệu rời như mùn cưa trong sản xuất than sạch. Vít làm việc dưới áp suất và ma sát lớn, dễ bị mài mòn, biến dạng, giảm tuổi thọ và chất lượng sản phẩm.

- Phạm vi nghiên cứu: Luận án tập trung nghiên cứu cơ chế mài mòn cơ học trên bề mặt vít ép gắn với hình học của vít và điều kiện làm việc đặc trưng, chưa đi sâu vào các dạng hư hỏng khác như ăn mòn hóa học, mỏi nhiệt hay nứt gãy do va đập. Về nội dung, nghiên cứu được giới hạn ở việc mô phỏng quá trình ép vật liệu rời bằng phần mềm EDEM nhằm xác định trường chuyển động của hạt, lực nén và phân bố ứng suất trên bề mặt vít; phân tích mối quan hệ giữa hình học vít, chế độ làm việc và quy luật mài mòn; tối ưu một số thông số cơ bản của vít ép để nâng cao độ bền mòn; đồng thời nghiên cứu ứng dụng công nghệ phun phủ HVOF trên nền thép C45 và đánh giá hiệu quả của giải pháp này bằng thực nghiệm.

4. Nội dung nghiên cứu

Nội dung Luận án tập trung nghiên cứu các vấn đề: (1) Phân tích quá trình làm việc của hệ vít ép – bu lông ép trong sản xuất viên nén sinh khối và xác định các yếu tố ảnh hưởng đến tải trọng, ứng suất và mài mòn của vít; (2) Mô phỏng quá trình ép bằng phương pháp DEM để đánh giá phân bố lực, vận tốc hạt và quy luật mài mòn theo hình học; (3) Đề xuất và tối ưu một số thông số thiết kế của vít ép – bu lông ép nhằm cải thiện điều kiện làm việc và cải thiện độ bền mòn; (4) Nghiên cứu công nghệ phun phủ HVOF, chế tạo lớp phủ chống mài mòn trên thép C45 và đánh giá đặc trưng cơ – lý của lớp phủ; (5) So sánh,

đối chiếu kết quả mô phỏng và thực nghiệm để đề xuất giải pháp cải thiện độ bền mòn cho vít ép tải trọng cao.

5. Phương pháp nghiên cứu trong thiết kế vít ép tải trọng cao

- Phân tích, tính toán lý thuyết: Tối ưu thiết kế hình học vít ép dựa trên các mô hình cơ học dòng vật liệu rời, đảm bảo khả năng nén và vận chuyển hiệu quả.

- Mô phỏng số: Sử dụng phương pháp phần tử rời rạc kết hợp mô phỏng số để mô phỏng dòng vật liệu và dự đoán mài mòn trên bề mặt vít.

- Thực nghiệm xác thực: Thực nghiệm phun phủ HVOF, Quy hoạch thực nghiệm.

- Đánh giá, phân tích so sánh: So sánh kết quả mô phỏng với thực nghiệm nhằm hiệu chỉnh mô hình và đề xuất phương án thiết kế cùng giải pháp công nghệ phù hợp.

6. Ý nghĩa khoa học và thực tiễn đề tài

Ý nghĩa khoa học

Đề tài có ý nghĩa khoa học xây dựng và phát triển mô hình mô phỏng tích hợp toàn diện cho vít ép tải trọng cao, kết hợp giữa tối ưu hình học, mô phỏng dòng vật liệu rời bằng phương pháp mô phỏng số.

Kết hợp mô phỏng số với mô hình mài mòn giúp dự đoán chính xác vị trí mòn theo thời gian, từ đó xác định các vùng chịu mài mòn lớn nhất trên bề mặt vít.

Bên cạnh đó, việc ứng dụng công nghệ phun phủ HVOF được kết hợp tăng khả năng chống mài mòn, tạo tiền đề cho các nghiên cứu tiếp.

Ý nghĩa thực tiễn

Kết quả nghiên cứu góp phần nâng cao chất lượng làm việc và kéo dài tuổi thọ của vít ép tải trọng cao, giảm chi phí bảo trì, nâng cao hiệu suất sản xuất và

duy trì sự ổn định vận hành trong môi trường công nghiệp khắc nghiệt. Kết quả của luận án cũng có thể mở rộng áp dụng cho các chi tiết cơ khí khác làm việc trong điều kiện mài mòn lớn, qua đó góp phần nâng cao hiệu quả kinh tế và năng lực cạnh tranh của doanh nghiệp.

7. Bố cục của luận án

Bố cục của Luận án được trình bày trong 4 chương:

Chương 1: Nghiên cứu tổng quan về vít ép tải trọng cao

Chương 2: Nghiên cứu giải pháp thiết kế và mô phỏng nhằm cải thiện độ bền mòn cho vít ép tải trọng cao

Chương 3: Vật liệu, trang thiết bị và thực nghiệm tạo lớp phủ HVOF

Chương 4: Thử nghiệm và đánh giá độ bền mòn của vít ép tải trọng cao

CHƯƠNG 1. NGHIÊN CỨU TỔNG QUAN VỀ VÍT ÉP TẢI TRỌNG CAO

1.1. Khái niệm về vít ép tải trọng cao

Vít ép tải trọng cao là một chi tiết quan trọng trong các máy ép, nén vật liệu, được thiết kế để thực hiện đồng thời chức năng nén chặt và vận chuyển vật liệu rời hoặc dạng bột dưới áp lực lớn, tạo ra sản phẩm có độ kết dính, mật độ và tính đồng nhất cao.

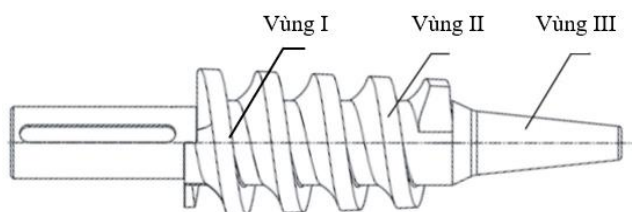
Trong khuôn khổ nghiên cứu này, vít ép tải trọng cao được hiểu là loại vít ép làm việc liên tục trong điều kiện mô men xoắn lớn, áp suất nén cao và thời gian vận hành kéo dài khi xử lý vật liệu sinh khối dạng rời. Theo số liệu khảo sát và thực nghiệm của luận án, loại vít này thường làm việc ở mức áp suất ép trung bình khoảng $4,2 \div 5,0$ MPa, tốc độ quay $350 \div 400$ vòng/phút và được dẫn động bởi động cơ có công suất từ 22 đến 30 kW.

Trong các điều kiện này, bề mặt vít ép chịu tác động đồng thời của lực nén lớn, ma sát trượt liên tục và dòng vật liệu có tính mài mòn cao, dẫn đến hiện tượng tập trung ứng suất và mài mòn cục bộ nghiêm trọng. Do đó, vít ép tải trọng cao đòi hỏi các giải pháp thiết kế hình học hợp lý kết hợp với xử lý bề mặt phù hợp nhằm nâng cao độ bền mòn và tuổi thọ làm việc.

Cấu tạo chính của vít ép gồm trục vít và các cánh vít, được lắp đặt trong buồng ép. Khi trục vít xoay, các cánh vít vừa thực hiện nhiệm vụ đẩy vật liệu dọc theo trục, vừa tạo áp lực nén dần về phía đầu ra. Áp lực nén lớn giúp vật liệu tăng mật độ, giảm độ rỗng và đạt được độ kết dính cần thiết. Đặc điểm nổi bật của vít ép tải trọng cao là khả năng vận hành liên tục trong thời gian dài, với tải trọng lớn mà vẫn đảm bảo hiệu suất ổn định, đáp ứng yêu cầu khắt khe trong sản xuất công nghiệp.

Bề mặt xoắn vít có thể được thiết kế đa dạng: dạng thân khai, chữ U (U-thread), chữ V, hoặc kết hợp đường thẳng, cung tròn, đường cycloid..., nhằm tối ưu hóa khả năng di chuyển và ép vật liệu, đồng thời tạo ma sát và duy trì

hiệt độ phù hợp. Hình học vít quyết định hiệu quả vận chuyển, nén ép, và cũng ảnh hưởng trực tiếp đến hiện tượng mài mòn trên bề mặt làm việc. Hình dạng của vít ép tải trọng cao như hình 1-1 gồm ba vùng trong đó vùng I có đường kính không đổi dùng để dẫn vật liệu, vùng II là vùng có đường kính giảm dần có chức năng ép dần vật liệu, tại vùng III là vùng tạo hình vật liệu thành những hình dạng mong muốn.



Hình 1- 1. Vít ép tải trọng cao

Vít ép tải trọng cao được ứng dụng trong nhiều ngành công nghiệp khác nhau như trong ngành chế biến thực phẩm để tạo thành các viên thức ăn chăn nuôi, viên nén sinh học. Trong ngành xử lý rác thải để giúp giảm đáng kể độ ẩm và thể tích chất thải, dễ dàng vận chuyển, tiết kiệm chi phí xử lý. Ngoài các ứng dụng trong chế biến thực phẩm và xử lý chất thải, vít ép còn đóng vai trò đặc biệt quan trọng ngành xây dựng để tạo khối vật liệu từ đất sét, xi măng, bột đá.

Trong ngành sản xuất than sạch, vít ép tải trọng cao giữ vai trò đặc biệt quan trọng trong việc tạo ra viên nhiên liệu có độ đặc cao, cháy bền và hạn chế phát thải trong quá trình sử dụng như hình 1- 2.



Hình 1- 2. Hình ảnh thành phẩm than sạch

Trong ngành sản xuất than sạch, vít ép tải trọng cao như hình 1- 3 là chi tiết cơ khí cốt lõi quyết định chất lượng viên than: đảm bảo độ đặc, độ bền, khả năng cháy lâu và lượng khói thải thấp.



Hình 1- 3. Vít ép dùng trong sản xuất than sạch

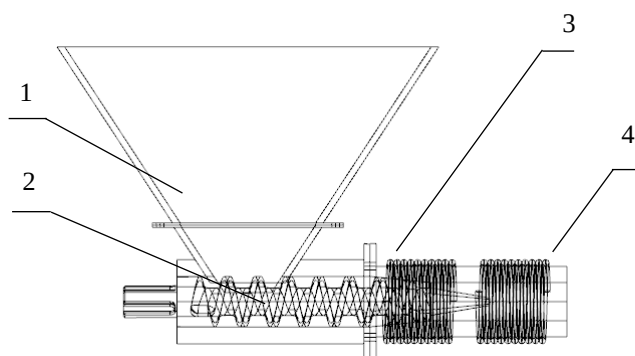
Mặc dù có vai trò quan trọng trong dây chuyền sản xuất, vít ép lại phải làm việc trong môi trường có áp lực cao, ma sát lớn và nhiệt độ tăng cục bộ, vì vậy chi tiết này rất dễ bị mài mòn nhanh, suy giảm biên dạng và giảm tuổi thọ sử dụng. Do đó, việc nghiên cứu thiết kế hình học vít hợp lý, kết hợp giải pháp xử lý bề mặt để tăng độ bền mòn và kéo dài tuổi thọ là yêu cầu cấp thiết và có ý nghĩa thực tiễn cao.

Vít ép tải trọng cao hoạt động dựa trên sự chuyển đổi chuyển động quay của trục vít thành quá trình vận chuyển và nén vật liệu theo phương dọc trục. Khi trục vít quay, các cánh vít cuốn vật liệu từ đầu vào và đẩy dọc theo chiều dài buồng ép về phía cửa ra. Trong quá trình này, không gian chứa vật liệu giữa cánh vít và buồng ép giảm dần, làm cho vật liệu bị nén chặt, tăng mật độ, giảm độ rỗng và tăng độ liên kết giữa các phần tử. Áp suất nén tăng dần theo chiều dài vít và đạt giá trị lớn nhất ở khu vực gần đầu ra, nơi vật liệu được ép chặt trước khi thoát ra ngoài dưới dạng sản phẩm có hình dạng tương đối ổn định, mật độ cao và độ bền cơ học tốt. Đồng thời, ma sát giữa vật liệu với bề mặt vít và buồng ép còn tạo ra nhiệt, góp phần cải thiện độ kết dính của vật liệu, đặc biệt có ý nghĩa trong quá trình sản xuất than sạch. Với cơ chế vận chuyển cưỡng bức kết hợp nén liên tục như vậy, vít ép tải trọng cao có khả năng làm việc ổn định, năng suất lớn và đáp ứng được các yêu cầu nghiêm ngặt về chất lượng sản phẩm.

1.2. Cơ sở lý thuyết thiết kế vít ép tải trọng cao

1.2.1. Cơ sở lý thuyết thiết kế vít ép

Vít ép tải trọng cao thường được thiết kế với cấu tạo chính gồm trục vít xoắn, cánh vít, buồng ép như hình 1- 4. Khi hoạt động, vít ép thực hiện đồng thời hai chức năng: vận chuyển vật liệu dọc trục và tạo áp suất nén, giúp nén chặt vật liệu rời (mùn cưa, bột, sinh khối...) thành sản phẩm có mật độ cao và độ kết dính tốt. Vật liệu sau khi được cấp qua phễu nạp sẽ đi vào vùng làm việc của vít ép; tại đây, trục vít thực hiện đồng thời chức năng vận chuyển và nén vật liệu về phía cửa khuôn. Ở khu vực gần đầu ra, thường tương ứng với vài bước vít cuối trong buồng ép, vật liệu bị ép chặt dưới áp suất cao, sau đó được đùn qua vùng gia nhiệt để tạo hình thành viên nén.



Hình 1- 4. Cấu tạo vít ép – buồng ép

Trong quá trình vận hành, vít ép tải trọng cao phải làm việc dưới các điều kiện khắc nghiệt về lực nén, ma sát cao và nhiệt độ tăng cục bộ. Hiện tượng mài mòn diễn ra phổ biến tại bề mặt làm việc của cánh vít, đặc biệt là vùng nén và đầu thoát vật liệu. Vì vậy, khả năng chống mài mòn của vít ép là một chỉ tiêu đặc biệt quan trọng để đánh giá tuổi thọ, hiệu quả làm việc và độ tin cậy vận hành của thiết bị trong điều kiện tải trọng cao. Thiết kế vít ép tải trọng cao là bài toán kỹ thuật phức tạp, cần đáp ứng đồng thời nhiều yêu cầu: đảm bảo lực nén đủ lớn, duy trì dòng vận chuyển ổn định, kiểm soát ma sát và nhiệt sinh ra, đồng thời giảm mài mòn, kéo dài tuổi thọ thiết bị. Phương pháp thiết kế hình học truyền thống thường dựa vào các thông số cơ bản như đường kính ngoài, đường kính trục, bước xoắn, góc xoắn và tỷ số chiều dài [33]. Những thông số hình học

chủ yếu thường được xác lập trên cơ sở các công thức bán thực nghiệm, tính toán cơ học và kinh nghiệm thiết kế thực tế nhằm đạt được lực nén và khả năng vận chuyển vật liệu phù hợp.

1.2.1.1. Các thông số làm việc của vít ép

a) Lưu lượng vít ép

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \cdot s \cdot n \cdot \eta \quad (1.1)$$

Công thức 1.1 được dùng để xác định lưu lượng Q mà vít ép có thể vận chuyển trong một đơn vị thời gian [19]. Trong đó:

D: Đường kính ngoài của vít, quyết định khối lượng vật liệu chứa trong mỗi vòng quay (mm).

s: Bước vít, quyết định khoảng cách dịch chuyển vật liệu trên một vòng quay (mm).

n: Với n là tốc độ quay của trục vít, đơn vị vòng/phút.

η : Hiệu suất vận chuyển, thường trong khoảng 0,3÷0,45.

b) Áp suất nén

Áp suất nén là chỉ tiêu quan trọng để đảm bảo vật liệu được nén chặt, tăng mật độ và độ kết dính [40]. Áp suất nén được tính theo công thức (1.2)

$$p = \frac{F}{A} \quad (1.2)$$

Trong đó: p là áp suất nén, MPa.

F: Lực nén, N.

A: Diện tích mặt cắt ngang của buồng ép, mm².

Áp suất càng lớn, khả năng nén càng cao, đồng thời yêu cầu cấu trúc cơ khí phải chịu tải tốt.

c) Lực nén vít ép

Lực nén trong vít ép được phân tích thành hai thành phần là lực dọc trục được tính như công thức (1.3) và lực pháp tuyến như công thức (1.4) dựa trên quan hệ với góc nghiêng của cánh vít với hướng truyền lực trong hệ.

$$F_a = F \cdot \cos \alpha \quad (1.3)$$

$$F_n = F \cdot \sin \alpha \quad (1.4)$$

Lực dọc trục F_a là lực mà vít ép cần tạo ra để duy trì áp suất nén cần thiết. Lực F_n tạo áp lực tiếp xúc lên trục vít là nguyên nhân chính gây ma sát và mài mòn vít ép.

d) Mô men xoắn trên trục vít

Momen xoắn M được tính toán để xác định công suất động cơ cần thiết và kích thước thiết kế trục vít.

$$M = \frac{F_a \cdot D_m}{2 \cdot \tan(\varphi + \alpha)} \quad (1.5)$$

Trong đó:

D_m : Đường kính trung bình của vít, ảnh hưởng trực tiếp đến lực đòn bẩy, mm.

φ : Góc ma sát trong của vật liệu, quyết định khả năng trượt hoặc bám dính, °.

α : Góc xoắn của cánh vít, ảnh hưởng đến khả năng đẩy vật liệu dọc trục, °.

Giá trị M càng lớn, yêu cầu động cơ mạnh hơn và kết cấu vững chắc hơn.

e) Tỷ số nén

Tỷ số nén k phản ánh mức độ tăng mật độ vật liệu sau quá trình nén thể hiện như công thức (1.6) [40].

$$k = \frac{V}{V_i} = \frac{\rho_s}{\rho_b} \quad (1.6)$$

ρ_s : Khối lượng riêng của vật liệu sau nén, kg/m³.

ρ_b : Khối lượng riêng ban đầu của vật liệu, kg/m³.

Tỷ số nén được hiểu là tỷ lệ giữa thể tích phần rãnh vít và thể tích phần nguyên liệu dịch chuyển qua vùng làm việc.

Giá trị k lớn thể hiện khả năng nén tốt, giúp tạo ra sản phẩm có độ bền cơ học và kết dính cao.

f) Chiều dài buồng ép

Chiều dài buồng ép L cần đủ lớn để đảm bảo thời gian và khoảng cách nén vật liệu được xác định như công thức (1.7) [19].

$$L = \frac{n.Q}{A.v} \quad (1.7)$$

Trong đó:

n: Hệ số an toàn hoặc hệ số tích lũy, n được dùng để điều chỉnh chiều dài buồng ép nhằm đảm bảo vật liệu có đủ thời gian nén, n được thường chọn từ 1,1 ÷ 1,5

Q: Lưu lượng thể tích vật liệu qua buồng ép (m³/s). Đây là thể tích vật liệu mà vít ép xử lý trong một đơn vị thời gian

A: Diện tích mặt cắt ngang buồng ép, mm².

v: Vận tốc trung bình của vật liệu trong buồng ép, m/s.

Việc thiết kế L hợp lý sẽ giúp tăng hiệu suất ép, giảm lực ma sát không cần thiết và tránh hiện tượng tích tụ vật liệu.

1.2.1.2. Các phương pháp thiết kế vít ép

a) Phương pháp thiết kế truyền thống

Trong thiết kế vít ép tải trọng cao, trước khi các công cụ mô phỏng số được ứng dụng rộng rãi, các phương pháp truyền thống vẫn là cách tiếp cận chủ yếu. Ưu điểm của nhóm phương pháp này là đơn giản, dễ sử dụng và phù hợp với giai đoạn thiết kế sơ bộ; tuy nhiên, do phụ thuộc nhiều vào giả thiết và hệ số kinh nghiệm nên độ chính xác còn hạn chế khi áp dụng cho điều kiện làm việc phức tạp. Các cách tiếp cận phổ biến gồm thiết kế theo công thức kinh nghiệm, thiết kế theo lý thuyết vít tải, mô hình áp suất nén tăng dần dọc theo chiều dài vít, lý thuyết Archimedes và phương pháp tính toán trong thiết kế vít đùn. Mặc dù các phương pháp này hỗ trợ xác định nhanh các thông số cơ bản và đánh giá sơ bộ năng suất hay lực ép, chúng vẫn chưa mô tả đầy đủ sự tương tác phức tạp giữa vật liệu với bề mặt vít, đặc biệt là cơ chế ma sát và mài mòn trong điều kiện tải trọng cao. Vì vậy, việc bổ sung các công cụ mô phỏng số hiện đại là cần thiết để nâng cao độ tin cậy của bài toán thiết kế.

b) Phương pháp thiết kế phi truyền thống

Các phương pháp thiết kế phi truyền thống được phát triển nhằm khắc phục những hạn chế của các phương pháp truyền thống và nâng cao hiệu quả trong nghiên cứu vít ép tải trọng cao [20]. Nhóm phương pháp này chủ yếu dựa trên công nghệ mô phỏng hiện đại. Trong đó, phương pháp mô phỏng số cho phép phân tích chi tiết quá trình làm việc của vít, bao gồm mô phỏng bằng phần tử hữu hạn (FEM) để đánh giá ứng suất, biến dạng và nhiệt, và phần tử rời rạc (DEM) để mô phỏng dòng chảy, ma sát và mài mòn của vật liệu rời. Ngoài ra, các mô hình mô phỏng kết hợp được sử dụng để tăng độ chính xác khi nghiên cứu các hiện tượng phức tạp. Song song với mô phỏng, các phương pháp tối ưu hóa hiện đại cũng được áp dụng nhằm tìm ra thiết kế tối ưu cho vít ép. Trong đó, tối ưu hóa đa mục tiêu cho phép đồng thời đạt được nhiều yêu cầu thiết kế, và đặc biệt, thuật toán di truyền (Genetic Algorithm — GA) [47] là công cụ mạnh mẽ để tìm nghiệm tối ưu toàn cục cho các bài toán thiết kế phức tạp, nhất là khi kết hợp với kết quả mô phỏng số. Nhờ các phương pháp này, việc thiết

ké vít ép có thể đạt được sự cân bằng tốt giữa các yếu tố trong quá trình làm việc, đáp ứng yêu cầu ứng dụng trong môi trường công nghiệp khắc nghiệt.

Giải thuật di truyền là một phương pháp tối ưu hóa được xây dựng dựa trên nguyên lý chọn lọc tự nhiên và cơ chế di truyền sinh học. Phương pháp này mô phỏng quá trình tiến hóa của quần thể nghiệm qua nhiều thế hệ nhằm tìm kiếm lời giải tối ưu hoặc gần tối ưu cho bài toán cần giải quyết. GA đặc biệt phù hợp với các bài toán tối ưu phi tuyến, đa mục tiêu và có không gian tìm kiếm phức tạp, tức là những trường hợp mà các phương pháp tối ưu truyền thống khó phát huy hiệu quả. Trong nghiên cứu này, GA được sử dụng để tối ưu hình học vít ép theo hướng giảm ma sát, nâng cao khả năng nén và hạn chế mài mòn. Khi kết hợp với mô phỏng DEM, hiệu quả của từng cấu hình hình học có thể được đánh giá sát thực tế hơn, từ đó lựa chọn được phương án tối ưu theo các tiêu chí kỹ thuật đặt ra.

Hàm mục tiêu trong giải thuật di truyền GA được thiết lập theo công thức (1.8) [41]. Trong đó, x là biến thiết kế. Hàm này có thể là hàm đơn mục tiêu hoặc đa mục tiêu.:

$$f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1.8)$$

GA được sử dụng để tối ưu hóa hình học vít ép nhằm giảm lực ma sát, tăng khả năng nén và giảm mài mòn. Việc kết hợp với mô phỏng DEM cho phép đánh giá hiệu suất từng cấu hình thiết kế đề xuất bởi GA một cách chính xác, từ đó chọn ra giải pháp tối ưu dựa trên các tiêu chí kỹ thuật thực tế.

1.2.2. Cơ sở lý thuyết mô phỏng vít ép

Trong lĩnh vực mô phỏng kỹ thuật, nhiều phương pháp số đã được phát triển để phục vụ phân tích ứng xử cơ lý, thiết kế hình học và tối ưu hóa quá trình công nghệ. Mỗi phương pháp có phạm vi áp dụng riêng, phù hợp với từng dạng bài toán cụ thể. Các phương pháp mô phỏng số phổ biến như phương pháp thể tích hữu hạn (FVM – Finite Volume Method) là một phương pháp số thường

được sử dụng trong động lực học chất lưu tính toán (CFD). Phương pháp này đảm bảo tính bảo toàn khối lượng, động lượng và năng lượng bằng cách tính thông lượng vật lý qua bề mặt các thể tích hữu hạn thường dùng mô phỏng dòng chảy chất lỏng, truyền nhiệt, lưu lượng không khí.

Phương pháp động lực học chất lưu tính toán (CFD – Computational Fluid Dynamics) là phương pháp số nhằm giải các bài toán về dòng chảy và truyền nhiệt thường mô phỏng quạt, máy nén, buồng đốt, silo thông gió...

Phương pháp thủy động lực học hạt trơn hóa (SPH – Smoothed Particle Hydrodynamics) là phương pháp không lưới, dựa trên hạt, được sử dụng để mô phỏng dòng chảy, vật liệu mềm hoặc phá hủy cấu trúc phù hợp với các bài toán có biến dạng lớn, nhưng khó kiểm soát khi mật độ hạt cao hoặc tương tác hạt – tường phức tạp.

Phương pháp điểm vật chất (MPM – Material Point Method) kết hợp đặc điểm của FEM và các phương pháp hạt để mô phỏng biến dạng lớn trong vật liệu liên tục. Mặc dù có ưu điểm trong mô phỏng phá hủy nhưng chủ yếu phục vụ vật liệu có tính chất liên tục chứ không tối ưu cho hạt rời rạc.

Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) được sử dụng rộng rãi trong phân tích ứng suất, biến dạng và trường nhiệt của các chi tiết cơ khí liên tục nhờ khả năng mô tả tốt ứng xử vật liệu dưới tải trọng phức tạp. Tuy nhiên, khi đối tượng nghiên cứu là vật liệu rời rạc như mùn cưa, có tính không liên tục và biến đổi hình dạng phức tạp trong quá trình chuyển động, FEM bộc lộ hạn chế vì không thể mô tả chi tiết tương tác vi mô giữa các hạt. Trái lại, phương pháp phần tử rời rạc (DEM) coi mỗi hạt vật liệu như một phần tử độc lập có khối lượng, vận tốc và mô men quay riêng, tương tác với nhau thông qua các mô hình lực tiếp xúc. Nhờ đó, DEM có khả năng tái hiện khá đầy đủ các hiện tượng như nén chặt, phân tách, chuyển động không đồng đều và mài mòn bề mặt thiết bị. Với đặc

điểm đó, DEM là lựa chọn phù hợp hơn để nghiên cứu dòng vật liệu sinh khối trong vít ép tải trọng cao.

Từ các phân tích trên có thể thấy rằng việc kết hợp thiết kế hình học, mô phỏng số bằng DEM và giải pháp xử lý bề mặt là hướng tiếp cận toàn diện cho bài toán nâng cao tuổi thọ và hiệu quả làm việc của vít ép tải trọng cao.

a) Phương trình chuyển động tịnh tiến

Phương trình (1.9) mô tả chuyển động tịnh tiến của từng hạt theo định luật II Newton trong mô phỏng DEM [16]:

$$m_i \frac{d_{v_i}}{dt} = \sum F_{ij} + m_i \cdot g \quad (1.9)$$

m_i : Khối lượng hạt, kg.

v_i : Vận tốc hạt, m/s².

F_{ij} : Lực tiếp xúc từ các hạt hoặc bề mặt khác lên hạt, N.

g : Gia tốc trọng trường, m/s².

b) Phương trình chuyển động quay

Phương trình (1.10) mô tả chuyển động quay của hạt dưới tác dụng mô men tiếp xúc trong DEM [64].

$$I_i \frac{d_{\omega_i}}{dt} = \sum T_{ij} \quad (1.10)$$

I_i : Momen quán tính, kg.m².

ω_i : Vận tốc góc của hạt, rad/s.

T_{ij} : Momen xoắn do hạt j tác dụng lên hạt i, N.m.

c) Mô hình tiếp xúc giữa các hạt

Các lực tiếp xúc được tính dựa trên biến dạng, thông qua mô hình Hertz-Mindlin [23], [52]:

Lực pháp tuyến đàn hồi được tính theo công thức (1.11):

$$F_{en} = k_n \cdot \delta_n^{3/2} \quad (1.11)$$

Trong đó k_n : Hệ số đàn hồi pháp tuyến, δ_n : Biên dạng nén

Lực tiếp tuyến được tính theo công thức (1.12):

$$F_{et} = -k_t \cdot \delta_t \quad (1.12)$$

$$|F_{et}| \leq \mu \cdot |F_{en}| \quad (1.13)$$

k_t : Hệ số đàn hồi tiếp tuyến, N/m.

δ_t : Biên dạng trượt, m.

μ : Hệ số ma sát.

d) Lực giảm chấn

Lực giảm chấn được tính theo công thức (1.14) [44]

$$F_n = -\gamma_n \cdot v_n \quad (1.14)$$

γ_n : Hệ số giảm chấn, N.s/m.

v_n : Vận tốc tương đối pháp tuyến, m/s.

e) Tính toán mài mòn

Thể tích mài mòn được tính theo công thức (1.15) [20]:

$$V = K \frac{F_n \cdot s}{H} \quad (1.15)$$

V : Thể tích vật liệu mài mòn, m^3 .

K : Hệ số mài mòn.

s : Quãng đường trượt, m.

H : Độ cứng vật liệu, N/m^2 .

f) Tính toán và tích phân thời gian

Vị trí và vận tốc được cập nhật thông qua tích phân số thông qua công thức (1.16) và (1.17) [20]:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v(t)\Delta t \quad (1.16)$$

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a(t)\Delta t \quad (1.17)$$

Các biểu thức (1.14) và (1.15) thể hiện thường dùng trong DEM, trong đó gia tốc – vận tốc – vị trí được cập nhật tuần tự theo từng bước thời gian. Giá trị bước thời gian Δt thường được lựa chọn nhỏ hơn $0,1 \div 0,3$ lần chu kỳ dao động Rayleigh để đảm bảo ổn định số.

g) Mô hình dạng hạt trong DEM

Trong mô phỏng DEM, hình dạng hạt đóng vai trò rất quan trọng vì nó ảnh hưởng trực tiếp đến các đặc tính cơ học, khả năng chuyển động, va chạm và phân bố lực. Việc lựa chọn mô hình hình dạng hạt phù hợp giúp tăng độ chính xác khi mô phỏng dòng chảy và quá trình nén trong vít ép tải trọng cao. Có một số mô hình thường dùng trong mô phỏng DEM:

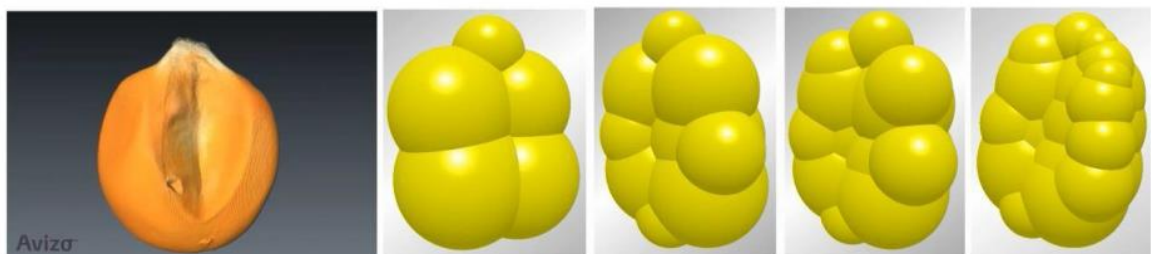
- Hạt hình cầu: Đây là mô hình hạt phổ biến nhất trong DEM vì đơn giản, dễ tính toán, tốc độ mô phỏng nhanh và dễ kiểm soát các tham số tiếp xúc. Đơn giản hóa tính toán, giúp giảm thời gian mô phỏng. Dễ kiểm soát tương tác và lực tiếp xúc. Phù hợp với các vật liệu rời có hình dạng gần tròn hoặc kích thước nhỏ. Tuy nhiên không mô tả chính xác ứng xử của các hạt không đều (dài, dẹt, góc cạnh).

- Hạt đa cầu: Đây là mô hình hạt phổ biến nhất trong DEM vì đơn giản, dễ tính toán, tốc độ mô phỏng nhanh và dễ kiểm soát các tham số tiếp xúc. Đơn giản hóa tính toán, giúp giảm thời gian mô phỏng. Dễ kiểm soát tương tác và lực tiếp xúc. Phù hợp với các vật liệu rời có hình dạng gần tròn hoặc kích thước

nhỏ. Tuy nhiên không mô tả chính xác ứng xử của các hạt không đều (dài, dẹt, góc cạnh).

- Hạt dạng đa diện: Đây là mô hình hạt phổ biến nhất trong DEM vì đơn giản, dễ tính toán, tốc độ mô phỏng nhanh và dễ kiểm soát các tham số tiếp xúc. Đơn giản hóa tính toán, giúp giảm thời gian mô phỏng. Dễ kiểm soát tương tác và lực tiếp xúc. Phù hợp với các vật liệu rời có hình dạng gần tròn hoặc kích thước nhỏ. Không mô tả chính xác ứng xử của các hạt không đều (dài, dẹt, góc cạnh).

- Hạt dạng khối: Đây là mô hình trung gian giữa đa cầu và đa diện, bằng cách gộp nhiều hình cầu thành khối kết hợp. Mô tả khá chính xác hình học không đều. Giảm tải tính toán so với polyhedron. Dễ điều chỉnh, thường dùng trong mô phỏng thực tế công nghiệp. Nhưng việc tính toán, mô phỏng phức tạp hơn so với hạt tròn. Độ chính xác hình học phụ thuộc số lượng và cách sắp xếp các hình cầu.



Hình 1- 5. Mô hình DEM sử dụng mô hình hạt khối

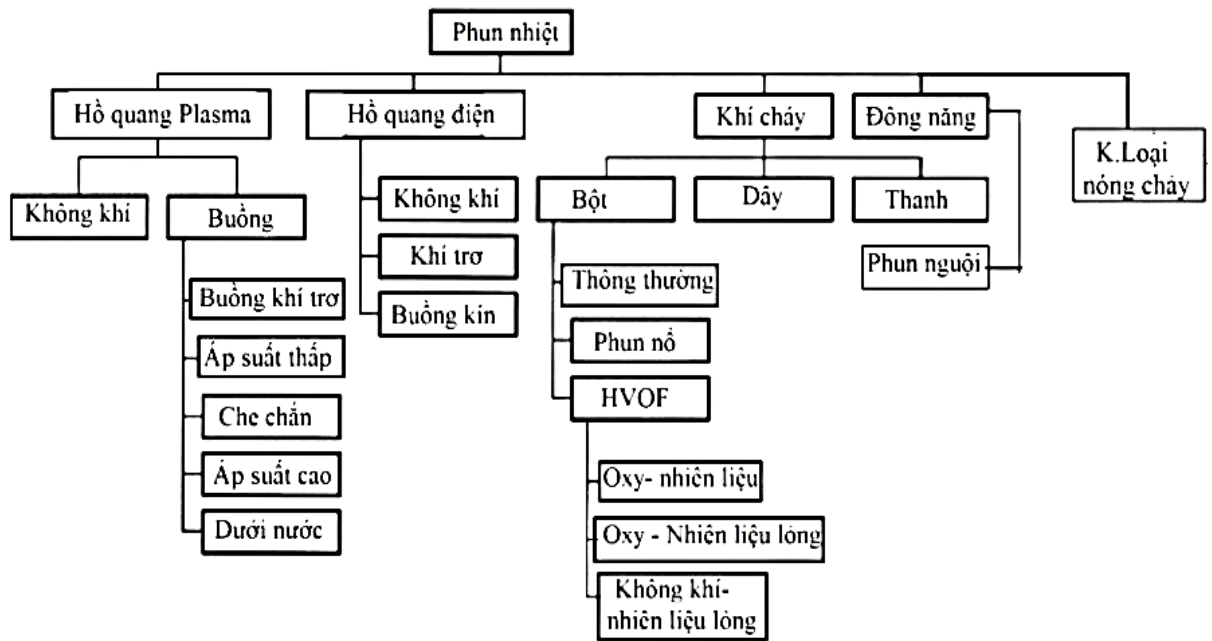
Trong mô phỏng vít ép tải trọng cao, đặc biệt khi sử dụng vật liệu rời rạc như mùn cưa có kích thước và hình dạng không đều, dễ tạo kết cấu liên kết chặt và dễ bị tắc nghẽn. Do đó thường sử dụng mô hình đa cầu hoặc mô hình dạng khối [20].

Các phương pháp thiết kế vít ép tải trọng cao, từ cách tiếp cận hình học truyền thống, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM), cho đến mô phỏng bằng phương pháp phần tử rời rạc (DEM). Đặc biệt, DEM được đánh giá có khả năng mô tả chi tiết hiện tượng dòng vật liệu rời rạc như mùn cưa, phân bố lực, quá

trình nén và mài mòn bề mặt, hỗ trợ tối ưu hóa thiết kế hình học và nâng cao độ tin cậy. Việc kết hợp các phương pháp thiết kế hình học, mô phỏng số DEM và xử lý bề mặt đã tạo nên một hướng nghiên cứu toàn diện và tiên tiến, qua đó đặt nền tảng cho các giải pháp nâng cao tuổi thọ và hiệu suất làm việc của vít ép tải trọng cao.

1.3. Cơ sở lý thuyết về công nghệ phun phủ HVOF

Trong công nghiệp cơ khí, đặc biệt đối với các chi tiết làm việc trong điều kiện khắc nghiệt và bị mài mòn mạnh như vít ép tải trọng cao, việc áp dụng các giải pháp tăng cường bề mặt là rất cần thiết nhằm nâng cao khả năng chống mài mòn, chống ăn mòn và kéo dài tuổi thọ chi tiết. Trong số các công nghệ hiện có, phun phủ nhiệt là một hướng xử lý bề mặt phù hợp và đã được ứng dụng rộng rãi. Các phương pháp phun phủ nhiệt được thể hiện trong sơ đồ phân loại như hình 1- 6, bao gồm mạ điện, thấm nhiệt (như thấm nitơ, thấm cacbon), phun phủ hồ quang điện, phun phủ plasma, phun phủ chân không (VPS), phun nguội (cold spray) và phun phủ nhiệt tốc độ cao (HVOF). Mạ điện có ưu điểm chi phí thấp, dễ kiểm soát chiều dày nhưng lại có độ bám dính và độ cứng hạn chế, không phù hợp cho chi tiết chịu tải trọng và ma sát lớn. Thấm nhiệt giúp tăng độ cứng bề mặt, chống mài mòn khá tốt song chỉ tạo lớp mỏng, không đảm bảo hiệu quả khi làm việc với áp lực và ma sát liên tục như trong vít ép tải trọng cao. Các phương pháp phun hồ quang và plasma có thể phủ được nhiều loại vật liệu, song lớp phủ thường có độ xốp cao, độ bám dính chưa thực sự vượt trội, dễ bị nứt hoặc bong tróc khi chịu ứng suất lớn. Phun phủ chân không (VPS) và phun nguội (cold spray) mang lại chất lượng lớp phủ tốt, độ xốp thấp và ít biến đổi pha, tuy nhiên chi phí cao, quy trình phức tạp và khó áp dụng với chi tiết lớn hoặc bề mặt phức tạp.

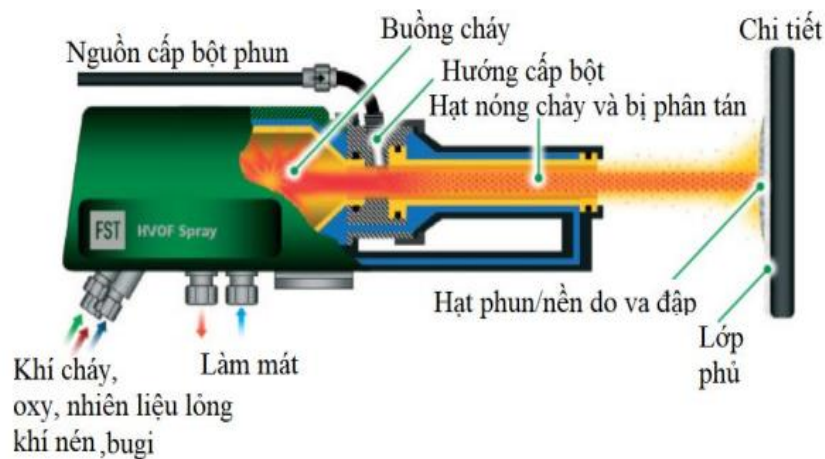


Hình 1- 6. Sơ đồ phân loại phương pháp phun phủ nhiệt [55]

Trong các công nghệ phun phủ nhiệt, HVOF nổi bật nhờ khả năng tạo ra lớp phủ đặc chắc, độ xốp thấp, độ bám dính cao và khả năng chống mài mòn tốt. Phương pháp này sử dụng hỗn hợp khí cháy để tạo dòng khí tốc độ rất lớn, giúp các hạt bột phủ ở trạng thái nóng chảy hoặc bán nóng chảy va đập mạnh vào bề mặt nền và hình thành lớp phủ chất lượng cao. So với nhiều phương pháp khác, lớp phủ HVOF thường có cấu trúc đặc hơn, độ cứng cao hơn và khả năng làm việc tốt hơn trong môi trường chịu ma sát và tải trọng lớn. Đây là lý do công nghệ này được xem là phù hợp đối với bề mặt làm việc của vít ép tải trọng cao.

Kỹ thuật phun nhiệt HVOF làm tan chảy và tăng tốc vật liệu dạng bột ở tốc độ cao, sử dụng oxy và hỗn hợp khí nhiên liệu, phun đến bề mặt. Hệ thống HVOF bao gồm súng phun, bộ nạp bột, đồng hồ đo lưu lượng và bộ cấp khí. Máy cấp bột bao gồm cụm phễu, máy rung không khí, đồng hồ đo tốc độ cấp liệu và tủ điều khiển. Loại bột mong muốn được đưa từ bộ nạp bột vào súng, nơi xảy ra quá trình đốt cháy. Lượng bột cần thiết để lắng đọng có thể được điều chỉnh bằng cách sử dụng tốc độ nạp bột. Trong vùng đốt cháy, vật liệu dạng bột đi vào ngọn lửa, nơi nó trở nên nóng chảy hoặc bán nóng chảy, tùy

thuộc vào nhiệt độ nóng chảy và tốc độ nạp của vật liệu. Nhiệt độ ngọn lửa cho quy trình HVOF là khoảng 3000°C. Sau đó, các hạt nóng chảy hoặc bán nóng chảy được đẩy ra khỏi vòi súng ở tốc độ siêu thanh về phía vật liệu nền, nơi vật liệu được lắng đọng. Các hạt bột, điển hình trong khoảng $10 \div 63 \mu\text{m}$, đạt tốc độ $300 \div 800 \text{ m/s}$ ở bề mặt được phủ. Sơ đồ cơ bản của hệ thống phun HVOF được thể hiện như hình 1- 7. Với thiết kế dạng ống Laval có cấu trúc hội tụ – phân kỳ, súng phun HVOF hiện đại cho phép hạt phun đạt vận tốc rất cao và ngày càng được quan tâm nghiên cứu để tiếp tục cải tiến.



Hình 1- 7. Thiết bị phun phủ HVOF [38]

Chất lượng của lớp phủ phụ thuộc đáng kể vào vận tốc và nhiệt độ của các hạt bột tiếp xúc với bề mặt chất nền, do đó có liên quan đến áp suất khí được tạo ra trong buồng đốt. Lớp phủ HVOF có độ cứng cao. Các lớp phủ WC-Co hoặc WC-CoCr từ HVOF còn mang lại khả năng chống mài mòn tốt, đồng thời có thể đạt chiều dày từ 0,1 đến 4 mm tùy yêu cầu. Phương pháp này đã được nhiều nước tiên tiến trên thế giới áp dụng trong nhiều lĩnh vực như hàng không, vũ trụ, dầu khí, và trong những lĩnh vực khác, mang lại hiệu quả kinh tế kỹ thuật to lớn. Cơ chế bám dính của lớp phủ HVOF được đặc trưng bởi lực bám dính. Do đó HVOF giữ ưu thế vượt trội vì có thể tạo lớp phủ bám chặt trên bề mặt vít ép xoắn phức tạp, đảm bảo khả năng chịu mài mòn ở vùng nén chịu áp suất cao, đồng thời giữ được cơ tính ổn định và giảm nguy cơ nứt gãy.

So với nhiều quy trình phun nhiệt khác, HVOF có các ưu điểm nổi bật như: vận tốc hạt phun cao, mức độ oxy hóa thấp hơn, hạn chế biến đổi pha, độ bám dính với nền tốt, mật độ lớp phủ cao, khả năng tạo chiều dày phủ phù hợp và thuận lợi cho tự động hóa quá trình. Tuy vậy, phương pháp này cũng tồn tại một số hạn chế như nhiệt độ ngọn lửa vẫn bị giới hạn, độ ồn lớn trong quá trình vận hành và yêu cầu làm nguội chi tiết khi phun đối với một số trường hợp cụ thể.

- So sánh các quá trình phun phủ nhiệt

Mỗi phương pháp phun nhiệt đều có những đặc trưng và tính chất riêng. Trong thực tiễn ứng dụng lớp phủ phun nhiệt, việc lựa chọn công nghệ phun thích hợp phụ thuộc vào nhiều yêu cầu khác nhau như đặc tính lớp phủ cần đạt được, mục đích ứng dụng và các yếu tố thương mại. Các thuộc tính chủ yếu của những công nghệ phun nhiệt phổ biến cùng đặc điểm của lớp phủ tương ứng được trình bày trong Bảng 1- 1.

Bảng 1- 1. Các đặc tính lớp phủ [38]

Quá trình phun	Nhiệt độ nguồn nhiệt (°C)	Vận tốc hạt (m/s)	Độ bền bám dính (MPa)	Hàm lượng ô xít (%)	Độ xốp (%)	Xếp hạng chi phí phun	Chiều dày lớp phủ (mm)
PFS	3000	40	8	10÷15	2÷6	1	0.1÷1.5
WFS	1000	100	12	10÷20	10	2	0.1÷1.5
HVOF	3000	800	>70	1÷5	1÷2	3	0.1÷4
DGS	1000	800	>70	1÷5	1÷2	4	0.05÷0.3
AS	3000	240	>60	5÷10	5	1	
APS	12000	200÷400	10÷70	1÷3	1÷5	4	0.1÷1
VPS	12000	100÷600	>70	0	<0.5	5	0.1÷1
CS	< 500	550÷1000	20÷70	0	<0.5	3	0.1÷2

So sánh các phương pháp phun trong Bảng 1- 1 cho thấy HVOF là công nghệ đạt chất lượng lớp phủ cao trong khi chi phí chỉ ở mức trung bình so với nhiều phương pháp khác. Công nghệ này còn thích hợp với nhiều loại vật liệu phun dạng bột, bao gồm cả các vật liệu nhạy nhiệt như gốm kim loại, do có nhiệt độ nguồn nhiệt thấp hơn. Phun nguội (CGS) cũng tạo được lớp phủ chất lượng cao nhờ sử dụng nguồn nhiệt thấp, trong khoảng $300\div1000^{\circ}\text{C}$. Đối với phun plasma trong chân không (VPS), chất lượng lớp phủ thu được tương đương HVOF, thậm chí có độ xốp thấp hơn, nhưng yêu cầu môi trường áp suất thấp làm tăng chi phí đầu tư, giảm tính cơ động và hạn chế khả năng ứng dụng. Phun plasma trong không khí tuy cho chất lượng lớp phủ thấp hơn HVOF và VPS nhưng vẫn được sử dụng phổ biến nhờ nhiệt độ nguồn nhiệt cao, thích hợp với các vật liệu có nhiệt độ nóng chảy lớn. Trong khi đó, các phương pháp như phun hồ quang điện và phun khí cháy thường phù hợp hơn với những lớp phủ bảo vệ có yêu cầu chất lượng thấp hơn.

Do tốc độ cao và năng lượng tác động của quy trình HVOF, lớp phủ thu được dày đặc, liên kết tốt và có các đặc tính được cải thiện như độ cứng, khả năng chống mài mòn và khả năng chống ăn mòn.

Nhờ những đặc tính vượt trội, HVOF trở thành giải pháp bảo vệ bề mặt hiệu quả, đặc biệt phù hợp cho các vít ép tải trọng cao làm việc với vật liệu rời khác nghiệt. Việc kết hợp lớp phủ HVOF với thiết kế hình học tối ưu và mô phỏng DEM không chỉ nâng cao khả năng chống mài mòn mà còn cải thiện hiệu suất nén, kéo dài tuổi thọ vít, giảm chi phí bảo trì và đảm bảo chất lượng sản phẩm đầu ra ổn định, khẳng định tính khoa học, mới và giá trị thực tiễn cao của hướng nghiên cứu.

Bên cạnh việc lựa chọn và áp dụng lớp phủ HVOF cho vít ép tải trọng cao thì việc đánh giá hiệu quả thực tế của lớp phủ, cũng như tối ưu hóa thông số thiết kế đặt ra yêu cầu phải tiến hành thử nghiệm thực tế và phân tích thống kê có hệ thống. Trong các nghiên cứu, phương pháp thực nghiệm được sử dụng

rộng rãi nhằm kiểm chứng mô hình tính toán, mô phỏng và xác minh giả thuyết khoa học. Phương pháp thực nghiệm hiện đại không chỉ dừng ở việc kiểm tra từng yếu tố riêng lẻ mà còn hướng đến phân tích tác động đồng thời nhiều yếu tố, từ đó xác định điều kiện tối ưu cho quá trình. Các thông số hình học, vận hành và đặc tính lớp phủ đều ảnh hưởng đến hiệu suất nén, mức độ mài mòn và tuổi thọ vít ép. Trong đó, phương pháp Taguchi được sử dụng thiết kế thí nghiệm hiệu quả, được phát triển bởi Genichi Taguchi [56]. Phương pháp này dựa trên ma trận trực giao, cho phép xác định nhanh ảnh hưởng của nhiều thông số với số lượng thí nghiệm tối thiểu.

Vít ép thiết kế sẽ được thử nghiệm dự kiến sẽ được thực hiện tại nhà máy sản xuất than sạch tại Việt Nam. Tại đây, vít ép tải trọng cao sẽ được lắp đặt trực tiếp vào dây chuyền nén mùn cưa và thử nghiệm liên tục với các thông số thiết kế khác nhau kết hợp phân tích độ bền cơ học, tốc độ hao mòn bề mặt vít ép, và năng suất ép. Bên cạnh đó, lớp phủ HVOF sẽ được đánh giá về mức độ bám dính, tỷ lệ mài mòn, khả năng duy trì áp suất nén. Việc triển khai thực nghiệm tại nhà máy không chỉ khẳng định tính ứng dụng thực tiễn của mô hình nghiên cứu mà còn giúp kiểm chứng sự phù hợp giữa kết quả mô phỏng DEM, thiết kế hình học và thực tế sản xuất trong công nghiệp. Đây cũng là bước quan trọng để hoàn thiện giải pháp tổng thể, góp phần nâng cao hiệu quả vận hành, giảm chi phí bảo trì và tăng tính cạnh tranh sản phẩm than sạch trên thị trường.

1.4. Tình hình nghiên cứu ngoài nước và Việt Nam

1.4.1. Tình hình nghiên cứu ngoài nước

Trên thế giới, nhiều nghiên cứu đã tập trung vào tối ưu hóa thiết kế, mô phỏng dòng vật liệu và nâng cao hiệu suất vận hành các loại vít tải, vít trộn và vít ép.

Nazerke Muratzhankyzy (2021) và các cộng sự [37] đã trình bày quá trình thiết kế và xây dựng thuật toán tính toán kỹ thuật cho máy ép trục vít nhằm chiết xuất nước ép từ quả hắc mai biển. Nghiên cứu mô tả cấu trúc thiết bị gồm trục vít, vỏ hình nón, bộ điều chỉnh áp suất và phễu nạp liệu, đồng thời phát triển mô hình tính toán lý thuyết

để xác định thông số vận hành tối ưu. Nghiên cứu đã lựa chọn được vận tốc quay của trục vít và lỗ lưới. Tác giả Wu (2021) [61] thiết kế vít ép trong máy ép trái cây tự động, chia trục vít thành ba vùng chức năng: vùng cấp liệu, vùng tăng áp và vùng ổn định áp suất tiếp cận theo hướng mô phỏng dòng chảy và tối ưu kết cấu trục vít nhằm tiết kiệm năng lượng. Thiết kế này tối ưu hóa khả năng thoát nước ép và giảm bã. Công trình nghiên cứu của Pezo (2018) [42] đã xây dựng mô hình DEM cho vít đơn, phân tích quá trình vận chuyển và trộn sơ cấp, nhấn mạnh vai trò chiều dài và bước xoắn trong kiểm soát chất lượng hỗn hợp. Nghiên cứu của Muhammad Firdaus (2017) và các cộng sự [36] đã thiết kế sơ bộ và mô phỏng một mô hình máy ép trục vít dùng trong quá trình chiết xuất dầu cọ. Nghiên cứu sử dụng phần mềm SolidWorks 2016 để phát triển mô hình và thực hiện các tính toán thiết kế. Nghiên cứu đã phân tích các cấu hình khác nhau của trục vít nhằm giảm chi phí bảo trì và tăng tuổi thọ của máy ép. Kretz (2016) [30] đã mô phỏng vít cấp liệu bằng DEM, phân tích mối quan hệ giữa hình học vít, lưu lượng vật liệu và lực tác động, đề xuất cải tiến để hạn chế tắc nghẽn. Dellinger (2016) [19] đã tối ưu hóa thiết kế vít trong quá trình tạo điện tại nhà máy thủy điện, phân tích ảnh hưởng của số lượng và góc lệch để tăng khả năng khuấy đến độ đồng nhất. Nghiên cứu của Aca Jovanović (2015) [13] là một trong những nghiên cứu ứng dụng DEM phân tích vít trộn, làm rõ ảnh hưởng của tốc độ quay và góc cánh vít đến hiệu quả trộn và đường đi của hạt. Milos Matus và Peter Krizan (2011) [33] đã phân tích hình học vít đùn bằng lý thuyết, đánh giá được lực ma sát và công suất làm việc, đề xuất ba hình dạng vít tốt hơn. Nghiên cứu tập trung phân tích hình học của trục vít trong các máy ép đùn, đặc biệt là trong quá trình ép viên sinh khối. Nghiên cứu xác định các thông số thiết kế quan trọng như đường kính trục, bước vít và góc nghiêng, nhằm tối ưu hóa hiệu suất và tuổi thọ của máy. Bằng cách sử dụng mô hình toán học và phân tích lực tác động trong quá trình ép, bài báo cung cấp cơ sở cho việc thiết kế và cải tiến trục vít, giúp nâng cao hiệu quả sản xuất và chất lượng sản phẩm. Nghiên cứu của Stosic (2011) [54] đã phát triển hình học vít cho máy nén, tối ưu hiệu suất và giảm rò rỉ. Gaspar-Cunha (2020) [24] đã phát triển phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu sử dụng

giải thuật di truyền (GA) cho vít đùn, nhằm cân bằng áp suất nén, năng suất và tiêu hao năng lượng. Nhóm tác giả Potente (2006) và Thümen [44] đã phát triển phương pháp tối ưu hóa hình học phần tử vít đôi, tập trung tăng áp suất, giảm gia nhiệt và giảm tiêu hao năng lượng, kết hợp mô hình tính toán và thực nghiệm, mô hình một chiều và sử dụng phần mềm mô phỏng SIGMA. Rorres (2000) [48] đã xây dựng mô hình lý thuyết hình học vít Archimedes, phân tích mối quan hệ giữa bán kính trong và bước vít giúp hiệu suất vận chuyển tăng.

Nhìn chung, các nghiên cứu quốc tế đạt được nhiều thành tựu trong việc tối ưu vận chuyển, trộn và kiểm soát dòng chảy vật liệu, nhưng ít tập trung vào vít ép tải trọng cao, đặc biệt trong điều kiện làm việc khắc nghiệt với vật liệu rời có tính kết dính và mài mòn cao như trong sản xuất than sạch. Bên cạnh đó, các công trình này chưa đi sâu vào việc mô phỏng chính xác vật liệu rời rạc bằng phương pháp DEM trong trạng thái nén chặt, và hiện chưa có nghiên cứu nào tích hợp đồng thời thiết kế hình học vít tối ưu cùng mô phỏng số DEM để dự đoán mài mòn.

Vu-Quoc và Zhang (2002) [58] đã nghiên cứu mô hình phụ thuộc của hệ số phục hồi (coefficient of restitution) vào vận tốc va chạm trong va chạm đàn hồi – dẻo, từ đó phát triển nền tảng mô phỏng tiếp xúc hạt trong DEM. Công trình nghiên cứu của Oka, Okamura (2005), Yoshida [62] đã thực hiện ước tính thực nghiệm thiệt hại mòn do va chạm hạt rắn (Phần 1), tập trung vào các thông số va chạm và xây dựng phương trình dự đoán. Tuy nhiên, nghiên cứu này chỉ dừng ở phân tích mòn cơ bản. Nhóm tác giả Oka, Okamura, Yoshida (2005) [63] tiếp tục phân tích các ứng xử của vật liệu liên quan trực tiếp đến mòn (Phần 2), làm rõ ảnh hưởng tính chất vật liệu. Tác giả Zhu (2007) [64] đã cung cấp tổng quan lý thuyết chi tiết về DEM, phát triển các mô hình tiếp xúc, lý thuyết va chạm và ma sát cho mô phỏng hạt rời. Andrew Grima (2013) [14] đã nghiên cứu dự đoán dòng chảy khối và ứng xử của vật liệu rời rạc trong thiết kế và vận hành thiết bị xử lý. Tuy nhiên, nghiên cứu này tập trung vào silo, băng tải và không đi sâu vào vít ép. Tác giả Krizan (2013) [40] đã phân tích mối quan hệ giữa các thông số công nghệ và thông số vật liệu trong quá trình nén mùn cưa, hỗ trợ hiệu cơ

ché nén chặt sinh khối. D. Kretz (2015) và các cộng sự [17] đã thực hiện mô phỏng DEM và xác minh thực nghiệm cho hệ thống vít cấp liệu, làm rõ phân bố lực và lưu lượng. Nghiên cứu của tác giả Pezo (2019) [43] đã xây dựng mô hình DEM cho vít cải tiến, nghiên cứu quá trình vận chuyển và trộn sơ bộ. Perazzo (2019) [39] đã mô phỏng DEM để dự đoán mô hình mài mòn và tốc độ mài mòn trên tấm thép, sử dụng mô hình Archard. Tuy nhiên, nghiên cứu này chưa áp dụng cho vít ép tải trọng cao, chưa mô phỏng dòng vật liệu rời rạc, và chưa kết hợp tối ưu thiết kế hình học. F. Schramm và Klonowski (2020) [23] đã mô phỏng mất vật liệu do mài mòn trong quá trình xới đất bằng DEM kết hợp thử nghiệm scratch test, giúp dự đoán cơ chế mài mòn. Radjai. F (2014) và Dubois. F [46] đã giới thiệu ứng dụng DEM trong kỹ thuật quá trình, mô tả nguyên lý, phương trình cơ sở và ứng dụng điển hình nhưng nghiên cứu này chỉ mang tính tổng quan. Cundall (1971) [15] đã giới thiệu mô hình DEM phân tích các vấn đề cơ học đá, kiểm chứng bằng phân tích photoelastic, tạo nền tảng quan trọng cho các mô phỏng sau này. Cundall và Strack (1979) [16] đã trình bày mô hình DEM tương tự trên, khẳng định tính khả thi khi so sánh với kết quả thực nghiệm photoelastic. EDEM (2020) [20] đã minh họa cách tích hợp mô hình Archard, hỗ trợ đánh giá mài mòn bề mặt thiết bị.

Những phân tích trên cho thấy, mặc dù các công trình đã nghiên cứu sâu về DEM, mô hình mài mòn và mô phỏng dòng vật liệu rời rạc, chưa có nghiên cứu nào kết hợp đồng thời DEM, mô hình thiết kế hình học vít kết hợp phun phủ HVOF cho vít ép tải trọng cao.

Do đặc điểm làm việc khắc nghiệt dẫn tới mòn nhanh của vít ép, người ta thường phải có những biện pháp bề mặt để tăng bền cho nó. Trong đó, như đã phân tích ở trên phương pháp phun phủ HVOF (High Velocity Oxygen – Fuel) là một trong các phương pháp phù hợp (2016) [50]. Đã có nhiều công trình nghiên cứu về công nghệ phun HVOF được đăng ký và bảo hộ sáng chế. Chẳng hạn, Warren Nelson và cộng sự (2005) đã nghiên cứu độ xốp của lớp phủ hai lớp MCrAlY/polyester chế tạo bằng phương pháp phun HVOF. Kết quả cho thấy cấu trúc phủ hai lớp có khả năng làm tăng

tuổi thọ của lớp phủ cũng như kéo dài tuổi thọ của vật liệu nền.[59]. J. Pulsford (2019) và cộng sự đã tìm ra việc áp dụng lớp phủ WC-Co-Cr bằng phương pháp HVOF lên bề mặt bên trong của các hình dạng hình trụ có đường kính nhỏ. Nghiên cứu tập trung vào việc đánh giá ảnh hưởng của đường kính trong (ID) của các hình trụ đến tính chất của lớp phủ, đặc biệt là độ cứng vi mô, độ dai gãy và khả năng chống mài mòn trượt khô [28]. Vasileios Katranidis (2018) và cộng sự [57] trình bày việc phát triển phần mềm phân tích cho phép dự đoán các tính chất của lớp phủ WC-Co được phun nhiệt trên bất kỳ hình dạng hình học nào. Công cụ này hoạt động bằng cách phân tích hình học đầu vào từ thiết kế có sự hỗ trợ của máy tính (CAD) và liên kết các điều kiện động học kết quả với các phép đo thực nghiệm. Kết quả của công cụ đã được xác thực thông qua các lớp phủ WC-17Co được phun bằng HVOF, cụ thể là độ dày lớp phủ, độ cứng vi mô, phần trăm thể tích WC và tỷ lệ mài mòn trượt cụ thể được kiểm tra và dự đoán cho trường hợp phun bên ngoài của một mô hình dạng rô-to. J. Pulsford và S. Kamnis, J. Murray (2018) [27] cho rằng ảnh hưởng của kích thước hạt bột và kích thước hạt carbide đến cấu trúc vi mô và khả năng chống mài mòn của lớp phủ WC-10Co-4Cr được phun bằng công nghệ HVOF, với mục tiêu ứng dụng trên các bề mặt bên trong có hình dạng phức tạp. Kết quả cho thấy lớp phủ từ bột có hạt nhỏ đạt độ cứng vi mô cao hơn nhưng lại có độ dai gãy thấp hơn do hiện tượng khử cacbon mạnh. Việc lắng đọng ba loại lớp phủ cermet thương mại (WC-Co-Cr, WC-Co và WC-Cr₃C₂-Ni) lên hợp kim magie AZ31 bằng phương pháp HVOF, mục tiêu là cải thiện tính chất cơ học và khả năng chống ăn mòn của hợp kim magie, vốn có độ bền và khả năng chống ăn mòn kém, kết quả cho thấy tất cả các lớp phủ đều có cấu trúc đồng nhất, độ xốp thấp và bám dính tốt với nền magie cho thấy lớp phủ WC-Co-Cr thể hiện khả năng chống ăn mòn tốt nhất, tiếp theo là WC-Co và WC-Cr₃C₂-Ni [21] tìm ra bởi Ewa Jonda (2024) và các cộng sự. Vẫn là Ewa Jonda (2023) [22] nghiên cứu ảnh hưởng của ba loại lớp phủ cermet nền tungsten carbide (WC) – gồm WC-Co, WC-Co-Cr và WC-Cr₃C₂-Ni – được lắng đọng bằng phương pháp HVOF lên hợp kim magie AZ91. Mục tiêu là cải thiện khả năng chống ăn mòn và mài mòn của hợp kim magiê, lớp phủ WC-Co-Cr có

khả năng chống ăn mòn tốt nhất, tiếp theo là WC-Co và WC-Cr₃C₂-Ni. Thành phần ảnh hưởng chủ yếu là kích thước, hàm lượng và liên kết các hạt. Công bố của Wenxiang Shu (2022) [60] và các cộng sự đã nghiên cứu hiệu quả của lớp phủ WC-10Co-4Cr được phun bằng công nghệ HVOF nhằm nâng cao khả năng chống mài mòn cho hợp kim titan Ti-6Al-4V. Kết quả cho thấy lớp phủ có vi cấu trúc đặc, độ cứng cao, và khả năng bám dính tốt, giúp cải thiện rõ rệt độ bền mài mòn so với vật liệu nền. Lớp phủ thể hiện hiệu quả đặc biệt trong điều kiện ma sát lớn và tải trọng cao, qua đó cho thấy tiềm năng ứng dụng trong các ngành yêu cầu tính bền cơ học và chống mài mòn như hàng không, y sinh và công nghiệp. A.G. Lekatou (2023) [12] tập trung so sánh tính chất chống ăn mòn và chống mài mòn của lớp phủ WC-10Co-4Cr được phun bằng công nghệ HVOF lên hợp kim nhôm Al7075-T6, sử dụng hai loại bột: cấu trúc nano và cấu trúc thông thường. Trong nghiên cứu này lớp phủ được tạo ra nhằm tăng độ bền cơ học và khả năng chịu môi trường khắc nghiệt cho vật liệu nền nhôm vốn có tính nhẹ nhưng độ bền bề mặt hạn chế. Kết quả cho thấy lớp phủ từ bột nano WC-10Co-4Cr có độ cứng cao hơn, mật độ lớp phủ dày đặc hơn, và khả năng chống ăn mòn trong dung dịch muối cũng như chống mài mòn cơ học tốt hơn so với lớp phủ từ bột cấu trúc thông thường. Nghiên cứu so sánh mài mòn trượt khô của hai loại lớp phủ cứng: WC-(WCr)₂C-Ni và WC-CoCr, được phun bằng công nghệ HVOF đã được Giovanni Bolelli (2014) và các cộng sự tìm ra [25]. Công trình đã đánh giá hiệu suất chống mài mòn của lớp phủ trong điều kiện không bôi trơn, môi trường thường gặp trong công nghiệp. Kết quả chỉ ra rằng cả hai lớp phủ đều cho thấy khả năng chống mài mòn tốt, nhưng lớp phủ WC-(WCr)₂C-Ni thể hiện tốc độ mài mòn thấp hơn, ma sát nhỏ hơn, và ít nứt bề mặt hơn so với lớp WC-CoCr. Công trình nghiên cứu của Shui Cao (2024) [51] đã nghiên cứu ảnh hưởng của các pha nền liên kết đến vi cấu trúc và đặc tính mài mòn trượt của lớp phủ nền WC được phun bằng công nghệ HVOF. Các hệ chất liên kết như Co, CoCr, NiCr được so sánh nhằm đánh giá sự khác biệt về khả năng kết dính, phân bố hạt WC,

độ cứng và khả năng chịu mài mòn. Kết quả cho thấy pha liên kết không chỉ ảnh hưởng đến độ đặc khít và vi cấu trúc lớp phủ mà còn quyết định đến cơ chế và tốc độ mài mòn trong điều kiện làm việc trượt khô. Trong đó, lớp phủ sử dụng nền NiCr hoặc CoCr thường có khả năng kháng oxy hóa và chống mài mòn tốt hơn nhờ vào tính ổn định hóa học cao hơn so với nền Co truyền thống.

Giải thuật di truyền [34] (Genetic Algorithm – GA) là một phương pháp tối ưu hóa dựa trên nguyên lý chọn lọc tự nhiên và di truyền sinh học, được Mitchell giới thiệu từ năm 1975. Thuật toán này mô phỏng quá trình tiến hóa qua nhiều thế hệ thông qua các phép toán chọn lọc, lai ghép và đột biến để tìm ra nghiệm tối ưu hoặc gần tối ưu cho các bài toán phức tạp.

Trong lĩnh vực cơ khí và kỹ thuật, GA đã được ứng dụng rộng rãi để tối ưu hóa hình học thiết bị, thông số công nghệ, hoặc tối ưu đa mục tiêu. Gaspar-Cunha [24] đã áp dụng GA để tối ưu hóa thiết kế vít đùn đơn, cân bằng đồng thời giữa áp suất nén, năng suất và tiêu hao năng lượng, chứng minh tính khả thi và hiệu quả của phương pháp. Deb (2002) và các cộng sự [18] đã phát triển giải thuật di truyền phân loại không trội NSGA-II, đặt nền tảng quan trọng cho các bài toán tối ưu đa mục tiêu, hiện được sử dụng rất phổ biến trong thiết kế thiết bị, tối ưu hóa cấu trúc và hình học. Trong lĩnh vực gia công, Rajakumar và Kumar (2013) [47] đã ứng dụng GA để tối ưu thông số quá trình ma sát khuấy, đạt được độ bền kéo và độ cứng tối ưu, cho thấy tính ứng dụng rộng của GA trong kỹ thuật chế tạo. Montgomery và Runger (2010) [35] cũng đã khẳng định GA là một phương pháp hữu hiệu để tối ưu hóa thiết kế sản xuất và điều khiển quá trình, nhờ khả năng linh hoạt và thích ứng cao. Đặc biệt, Jin (2017) [29] đã chứng minh GA có thể kết hợp với các mô phỏng số như FEM hoặc DEM để tối ưu hóa các mô hình đa vật lý, giúp cải thiện thiết kế hình học, phân bố lực và tối ưu lớp phủ bảo vệ bề mặt.

Bằng cách kết hợp với mô phỏng DEM, GA cho phép lựa chọn các biên dạng hình học nhằm tối ưu vít ép và giảm mài mòn, điều này nâng cao tính chính xác và hiệu quả thiết kế.

Phương pháp Taguchi được phát triển bởi Genichi Taguchi, là một phương pháp thiết kế thí nghiệm (DOE — Design of Experiment) dựa trên ý tưởng giảm thiểu biến thiên và nâng cao chất lượng thông qua kiểm soát các yếu tố ảnh hưởng chính. Taguchi sử dụng các ma trận trực giao (orthogonal array) để xác định ảnh hưởng của nhiều thông số với số lần thí nghiệm tối thiểu. Phương pháp này đã được sử dụng rộng rãi để tối ưu thông số quy trình sản xuất, điều chỉnh điều kiện công nghệ, và tối ưu hóa thiết kế ban đầu. Taguchi rất phù hợp khi kết hợp với GA và mô phỏng DEM nhằm giảm số lượng phép thử (và số lần mô phỏng). Xác định nhanh các tham số chính ảnh hưởng đến chất lượng nén và mài mòn. Hỗ trợ tinh chỉnh kết quả GA hoặc kiểm chứng mô hình DEM. Các nghiên cứu như Rajakumar và Kumar đã kết hợp GA và Taguchi để tối ưu hóa tham số công nghệ hàn ma sát khuấy, cho kết quả vượt trội về độ bền và độ cứng mối hàn. Ngoài ra, Montgomery và Runger cũng chứng minh khả năng ứng dụng Taguchi trong tối ưu hóa sản xuất và thiết kế kỹ thuật.

Có thể thấy hướng đi nghiên cứu tổng hợp, bao gồm tối ưu thiết kế hình học, mô phỏng DEM để dự đoán mài mòn, kết hợp công nghệ phun phủ bề mặt tiên tiến (HVOF), và thực nghiệm xác thực. Đây là phương pháp tiếp cận toàn diện, kết hợp chặt chẽ giữa tính toán lý thuyết, mô phỏng số và kiểm chứng thực tế. Cách tiếp cận này không chỉ đảm bảo tính khoa học, khả thi, mà còn làm tăng tính thực tiễn và giá trị ứng dụng của nghiên cứu.

1.4.2. Tình hình nghiên cứu tại Việt Nam

Trong những năm gần đây, nhu cầu nghiên cứu và ứng dụng các thiết bị nén, ép vật liệu rời rạc đặc biệt là vít ép tải trọng cao ngày càng tăng, nhằm đáp ứng yêu cầu về sản phẩm có mật độ cao, độ bền cơ học tốt và thân thiện môi trường. Tuy nhiên, tại Việt Nam, các công trình nghiên cứu về thiết kế tối ưu vít ép tải trọng cao, mô phỏng dòng chảy vật liệu rời rạc, cũng như các giải pháp chống mài mòn cho vít ép vẫn còn rất hạn chế.

Trong nghiên cứu [9] Nguyễn Văn Thảo (2018) và các cộng sự đã thực hiện khảo sát thực nghiệm ảnh hưởng của hình học vít đến hiệu suất ép than

sạch, phân bố áp lực và độ kín khít sản phẩm. Nghiên cứu đã chỉ ra vai trò của cấu trúc cánh vít trong khả năng nén, đồng thời đề xuất các thay đổi hình học nhằm nâng cao hiệu quả ép. Nguyễn Tuấn Linh và cộng sự (2018) [8] đã nghiên cứu tối ưu hóa biên dạng vít ép trong máy ép mùn cưa phục vụ sản xuất than không khói bằng giải thuật di truyền (GA), qua đó cân bằng giữa thể tích ép và áp suất nén nhằm cải thiện chất lượng sản phẩm. Nghiên cứu này đã làm rõ mối quan hệ giữa hình học vít và các thông số công nghệ, hỗ trợ nâng cao năng suất.

Một số nghiên cứu khác trong nước cũng đã bước đầu quan tâm đến thiết kế hình học vít, khảo sát thực nghiệm lực ép và năng suất, song phần lớn vẫn chưa triển khai mô phỏng số, chưa dự đoán mài mòn, và chưa nghiên cứu lớp phủ bề mặt phù hợp. Đặc biệt, chưa có công trình nào tích hợp đồng thời thiết kế tối ưu hình học, mô phỏng DEM (cho vật liệu rời rạc) giải pháp xử lý bề mặt để giải quyết vấn đề tuổi thọ và hiệu suất của vít ép tải trọng cao trong sản xuất than sạch.

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về xử lý bề mặt vít ép tải trọng cao bằng công nghệ phun phủ HVOF còn khá hạn chế. Trong thực tế, công nghệ phun nhiệt mới chủ yếu được áp dụng cho một số chi tiết công nghiệp như thân turbine thủy lực, cánh bơm, trục bơm, cánh khuấy cỡ lớn, trục phân phối bia, trục khuỷu, trục bơm ép vữa và các loại trục cam. Mặc dù đã có một số thiết bị phun được triển khai, sự phát triển của công nghệ phun phủ nhiệt vẫn chưa tương xứng với nhu cầu thực tế do tính chất công nghệ phức tạp, đòi hỏi đầu tư và nghiên cứu sâu rộng. Đồng thời, quá trình phun và hình thành lớp phủ còn chịu tác động của nhiều yếu tố như thiết bị, công nghệ và vật liệu, làm cho tính ứng dụng thực tiễn chưa cao.

Đã có một số đề tài được triển khai nghiên cứu tại các trung tâm, viện nghiên cứu như: “Nghiên cứu chế tạo lớp phủ hợp kim niken crôm bằng công nghệ phun phủ hồ quang điện để bảo vệ chống ăn mòn cho các chi tiết máy

bơm công nghiệp làm việc trong môi trường axit” [5] của Viện Kỹ thuật Nhiệt đới chủ trì do tác giả Lê Thu Quý (2012) làm chủ nhiệm đề tài. Nghiên cứu đã chế tạo thành công lớp phủ hợp kim NiCr bằng công nghệ phun phủ hồ quang điện, có khả năng chống ăn mòn trong môi trường axit cho các chi tiết gang hợp kim của máy bơm hóa chất trong ngành than. Việc ứng dụng lớp phủ trên 6 cụm chi tiết máy bơm tại 3 cơ sở sản xuất đã chứng minh hiệu quả thực tế của công nghệ phun nhiệt. Tác giả Lê Thu Quý (2004) ứng dụng lớp phủ phun bởi hồ quang điện cho vật liệu giả hợp kim Zn-Al trên nền thép CT3 cho khả năng bảo vệ chống ăn mòn [3]. Ngoài ra, lớp phủ kẽm, kẽm nhôm chống ăn mòn còn được nghiên cứu và công bố trong những nghiên cứu tương tự (2007) [4]. Đề tài, mã số KC 05.10 [1], Nghiên cứu về lớp phủ bột hợp kim ZRO-182 trên nền vật liệu Nimonic 263, có lớp trung gian NiCrAlY, cho thấy lớp phủ đạt độ bám dính với kim loại nền là 378 kG/cm² và độ xốp lớp trung gian khoảng 2%. Tuy nhiên, các kết quả này mới chỉ dừng lại ở quy mô phòng thí nghiệm. Ngoài ra, Đề tài mã số 01C-01/04-2009-2 [2] đã khảo sát ảnh hưởng của khoảng cách phun, vận tốc phun và lưu lượng phun đến độ xốp và độ bám dính của lớp phủ bột hợp kim Cr20Ni3 trên nền thép 40Cr bằng phương pháp phun nổ. Việc ứng dụng kết quả nghiên cứu vào phục hồi trục khuỷu xe tải CAT 773E của Tập đoàn Than – Khoáng sản Việt Nam đã giúp tăng tuổi thọ chi tiết lên 4 lần so với mua mới và giá thành chỉ bằng 30% mua mới. Đối với phương pháp HVOF đã có một số luận án tiến sỹ có đề cập và nghiên cứu như Phạm Văn Liệu (2016) [10] đã nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ trong phương pháp phun HVOF, gồm tốc độ phân tử phun, khoảng cách phun và lưu lượng phun, đến độ bền bám dính, độ xốp và độ cứng của lớp phủ NiCrBSiFe. Từ đó, các mối quan hệ toán học giữa tính chất lớp phủ và thông số phun đã được xây dựng dưới dạng hàm bậc hai. Nguyễn Chí Bảo (2016) [6] đã nghiên cứu ảnh hưởng của tốc độ quay chi tiết, bước dịch chuyển đầu phun và khoảng cách phun đến chất lượng lớp phủ HVOF thông qua các chỉ tiêu độ

bền bám dính, độ xốp và độ cứng. Nghiên cứu được thực hiện trên nền trục thép 40Cr với 27 thí nghiệm bố trí theo phương pháp quy hoạch trực giao, sử dụng bột phun 75CrC25Ni. Kết quả cho thấy mức độ ảnh hưởng của các thông số công nghệ và cho phép xây dựng các hàm toán học bậc hai mô tả mối quan hệ giữa thông số phun với từng tính chất lớp phủ. Nguyễn Thanh Phú (2019) [7] đã nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ phun phủ HVOF đến chất lượng lớp phủ trên các chi tiết làm việc trong môi trường khắc nghiệt có mài mòn. Đồng thời, nhiều cơ sở đào tạo và nghiên cứu như Đại học Bách khoa Hà Nội, Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên, Đại học Công nghiệp Hà Nội và Viện Nghiên cứu Cơ khí đã đưa công nghệ này vào giảng dạy và nghiên cứu thông qua các môn học, đề tài, luận văn thạc sĩ và luận án tiến sĩ. Những hoạt động này góp phần tạo nền tảng phát triển nguồn nhân lực chuyên môn phục vụ cho sự phát triển của công nghệ phun phủ nhiệt, đặc biệt là phun phủ HVOF.

Trong các công nghệ xử lý bề mặt hiện nay, cho thấy công nghệ phun phủ nhiệt, đặc biệt là HVOF, nổi bật với khả năng tạo lớp phủ có độ cứng cao, bám dính tốt và khả năng chống mài mòn. Công nghệ này phù hợp với các chi tiết làm việc trong điều kiện mài mòn, chịu tải lớn và môi trường khắc nghiệt, như vít ép tải trọng cao. Đây chính là giải pháp then chốt giúp kéo dài tuổi thọ, giảm chi phí bảo trì và đảm bảo ổn định sản xuất.

Tổng quan các công trình nghiên cứu trong và ngoài nước cho thấy lĩnh vực thiết kế và tối ưu hóa vít ép, mô phỏng dòng vật liệu rời rạc bằng DEM, cũng như các phương pháp tăng cường độ bền bề mặt như HVOF đã được quan tâm mạnh mẽ trong những năm gần đây. Trên thế giới, nhiều tác giả đã tập trung vào mô phỏng cơ chế chuyển động của hạt trong vít ép, phân tích lực – ứng suất trong quá trình ép viên sinh khối, mô hình hóa mài mòn và đánh giá vai trò của vật liệu phủ trong điều kiện tải trọng cao. Các nghiên cứu quốc tế cũng nhấn mạnh đến việc sử dụng DEM kết hợp thực nghiệm để dự đoán phân bố lực, mật độ nén, nhiệt sinh ra và cơ chế phá hủy hạt. Ở trong nước, các công

trình chủ yếu tập trung vào thiết kế sơ bộ vít ép, mô phỏng quá trình ép viên sinh khối và đánh giá chất lượng viên; tuy nhiên các nghiên cứu thường dừng lại ở mức mô phỏng đơn giản hoặc thực nghiệm đơn lẻ, chưa kết hợp đầy đủ giữa mô hình DEM – thực nghiệm – tối ưu thiết kế và chưa đi sâu vào đánh giá mài mòn trong điều kiện tải trọng cao điển hình của ngành sản xuất than sạch. Mặc dù đã có nhiều kết quả quan trọng, vẫn tồn tại những khoảng trống nghiên cứu đáng kể. Có ít nghiên cứu mô phỏng chi tiết phân bố lực pháp tuyến, lực tiếp tuyến, ứng suất tiếp xúc, nhiệt và động năng của hệ hạt trong vít ép tải trọng cao bằng DEM để lý giải toàn diện cơ chế làm việc của vít ép. Các nghiên cứu về mài mòn vít ép hiện chủ yếu mang tính định tính, thiếu mô hình dự đoán và chưa gắn kết với điều kiện làm việc thực tế của máy ép viên sinh khối công suất lớn. Thứ ba, giải pháp sử dụng lớp phủ HVOF cho vít ép – mặc dù đã được ứng dụng trong một số lĩnh vực – gần như chưa được nghiên cứu trong ngành than sạch ở Việt Nam. Những khoảng trống này là cơ sở khoa học và thực tiễn để luận án triển khai nghiên cứu toàn diện hơn, kết hợp mô phỏng – thiết kế – thực nghiệm nhằm nâng cao độ bền mòn của vít ép tải trọng cao sử dụng trong sản xuất viên nén than sạch.

Tổng hợp các công trình đã công bố cho thấy phần lớn nghiên cứu hiện nay mới chỉ tập trung riêng lẻ vào một số khía cạnh như thiết kế hình học, mô phỏng chuyển động vật liệu hoặc xử lý bề mặt chống mài mòn. Trong khi đó, các nghiên cứu tích hợp đồng thời giữa tối ưu hóa hình học vít ép, mô phỏng cơ chế mài mòn dưới tải trọng cao và kiểm chứng thực nghiệm trong điều kiện làm việc thực tế vẫn còn rất ít. Đây chính là khoảng trống mà luận án hướng tới giải quyết.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

Chương 1 đã trình bày một cách có hệ thống những vấn đề lý luận và thực tiễn liên quan đến vít ép tải trọng cao, bao gồm cấu tạo, nguyên lý làm việc, đặc điểm chịu tải cũng như các yếu tố ảnh hưởng đến quá trình mài mòn trong

sản xuất than sạch. Kết quả tổng quan cho thấy vít ép làm việc trong môi trường có tải trọng lớn, ma sát cao và tiếp xúc liên tục với vật liệu rời có tính mài mòn mạnh, do đó hiện tượng suy giảm biên dạng và hư hỏng bề mặt là khó tránh khỏi. Điều này ảnh hưởng trực tiếp đến năng suất, độ ổn định và chi phí vận hành của hệ thống. Bên cạnh đó, các cơ sở lý thuyết về thiết kế hình học, mô phỏng DEM và công nghệ phun phủ HVOF đã được phân tích để làm rõ tiềm năng ứng dụng trong việc nâng cao độ bền mòn của vít ép. Tổng quan nghiên cứu trong và ngoài nước cũng cho thấy vẫn còn thiếu các công trình tích hợp đầy đủ giữa thiết kế, mô phỏng, dự báo mài mòn, xử lý bề mặt và kiểm chứng thực nghiệm. Vì vậy, Chương 1 đã xác lập được cơ sở khoa học cần thiết và định hướng rõ vấn đề nghiên cứu cho các chương tiếp theo của luận án.

Từ các phân tích trên, có thể khẳng định rằng Chương 1 đã xây dựng cơ sở lý luận và thực tiễn vững chắc cho luận án. Các nội dung tổng quan không chỉ làm rõ đặc điểm làm việc và những thách thức của vít ép tải trọng cao, mà còn xác định rõ vấn đề nghiên cứu và khoảng trống khoa học cần giải quyết. Đây là nền tảng để triển khai các nghiên cứu mô phỏng, thiết kế tối ưu và thực nghiệm lớp phủ HVOF trong các chương tiếp theo của luận án.

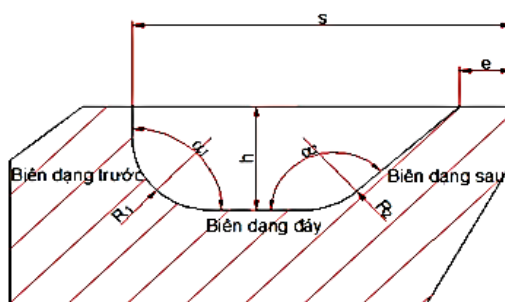
CHƯƠNG 2. NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP THIẾT KẾ VÀ MÔ PHỎNG NHẪM CẢI THIỆN ĐỘ BỀN MÒN CHO VÍT ÉP TẢI TRỌNG CAO

2.1. Phân tích các chỉ tiêu làm việc của vít ép

Trong quá trình làm việc, hệ thống vít ép – bu lông ép trong dây chuyền sản xuất than sạch phải đồng thời bảo đảm được áp suất nén vật liệu và không gian (thể tích) cần thiết để vật liệu di chuyển dọc theo chiều dài bu lông ép. Đây là hai chỉ tiêu kỹ thuật quan trọng, cũng chính là hai mục tiêu tối ưu chủ yếu trong luận án này khi thiết kế, tối ưu hóa hình học vít ép – bu lông ép. Các yếu tố khác như nhiệt độ, tốc độ quay của vít, công suất, lưu lượng của vật liệu trong bu lông ép... được xem như những điều kiện biên đặc trưng cho chế độ làm việc tải trọng cao. Từ đó, vấn đề đặt ra cho luận án là phải xác định được bộ thông số thiết kế và giải pháp lớp phủ bề mặt phù hợp để vừa duy trì được áp suất nén yêu cầu, vừa tạo điều kiện dịch chuyển ổn định của vật liệu, đồng thời giảm thiểu lượng mòn của vít ép trong những điều kiện làm việc nói trên.

2.1.1. Thể tích ép

Giả sử khoảng không gian được giới hạn bởi biên dạng trước, biên dạng đáy và biên dạng sau của rãnh vít luôn được lấp đầy bởi vật liệu, thì thể tích của vùng không gian đó được xem là thể tích nguyên liệu được vận chuyển qua một đơn vị tiết diện dọc; các thông số đặc trưng được minh họa tại Hình 2-1.



Hình 2- 1. Biện dạng mặt cắt dọc vít ép

Giải thích các thông số trong hình 2- 1:

α_1, α_2 : góc trước và góc sau

R_1, R_2 : bán kính lượn góc trước và bán kính lượn góc sau

s: bước vít

e: chiều rộng đỉnh cánh vít

h: chiều sâu rãnh vít.

Gọi thể tích của phần nguyên liệu được điền đầy trong buồng ép là V, D là đường kính ngoài của vít ép, i là số bước ren của vít ép, tỷ số $\frac{V}{\pi D^3}$ được tính theo công 2.1 [33]:

$$\begin{aligned} \frac{V}{\pi D^3} = & \left(1 - \frac{h}{D}\right) \frac{h}{D} \left[\frac{s}{D} \left(1 - \frac{ie}{s}\right) + \frac{1}{2} \frac{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{\sin \alpha_1 \sin \alpha_2} \right] - \left[\frac{1}{2} \frac{h}{D} - \left(\frac{h}{D}\right)^2 + \frac{2}{3} \left(\frac{h}{D}\right)^3 \right] \frac{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}{\sin \alpha_1 \sin \alpha_2} \\ & - \left(1 - \frac{2h}{D}\right) \left(\frac{r_1}{D}\right)^2 \left[\frac{1 - \cos \alpha_1}{\sin \alpha_1} - \frac{\pi}{360} (180 - \alpha_1) \right] - \left(1 - \frac{2h}{D}\right) \left(\frac{r_2}{D}\right)^2 \left[\frac{1 - \cos \alpha_2}{\sin \alpha_2} - \frac{\pi}{360} (180 - \alpha_2) \right] \\ & - \frac{1}{6} \left(\frac{r_1}{D}\right)^3 \left[\frac{10 \sin \alpha_1 - \sin 2\alpha_1}{1 - \cos \alpha_1} - \frac{\pi}{30} (180 - \alpha_1) \right] - \frac{1}{6} \left(\frac{r_2}{D}\right)^3 \left[\frac{10 \sin \alpha_2 - \sin 2\alpha_2}{1 - \cos \alpha_2} - \frac{\pi}{30} (180 - \alpha_2) \right] \end{aligned} \quad (2.1)$$

Trong trường hợp đặc biệt, nếu $\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\pi}{2}$ hoặc $\frac{R_1}{D} = \frac{R_2}{D} \rightarrow 0$, ta có:

$$\frac{V}{\pi D^3} = \left(1 - \frac{h}{D}\right) \cdot \frac{h}{D} \cdot \left[\frac{s}{D} \left(1 - \frac{ie}{s}\right) \right] \quad (2.2)$$

Do đó:

$$V = \pi \cdot h(D - h)(s - ie) \quad (2.3)$$

Như vậy, biên dạng thể tích theo phương dọc trục của trục vít có thể được điều chỉnh thông qua việc thay đổi một trong các thông số sau:

- Thay đổi đường kính ngoài (tức là làm vít hình nón)
- Thay đổi chiều sâu rãnh vít (lỗ vít hình nón)
- Thay đổi bước vít

Những thông số trên không chỉ có thể thay đổi riêng lẻ mà còn có thể được điều chỉnh đồng thời để bảo đảm tỷ số nén đạt giá trị hợp lý. Trong đó, tỷ

lệ giữa thể tích phần rãnh vít và thể tích phần nguyên liệu dịch chuyển qua được xác định là tỷ số nén.

$$k = \frac{V}{V_i} \quad (2.4)$$

2.1.2. Áp suất nén

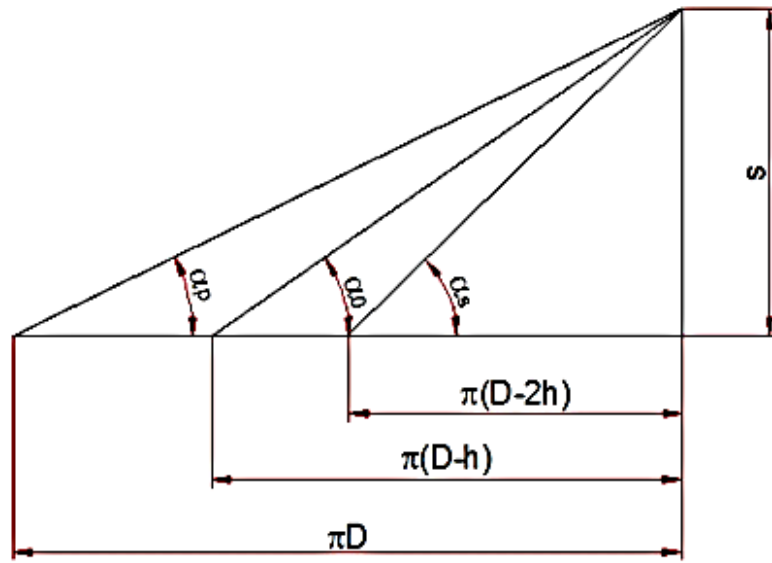
Áp suất nén được tính theo công thức 2.5 [33]:

$$p = p_0 \cdot e^{\frac{A \cdot l}{d}} \quad (2.5)$$

Trong biểu thức trên: p_0 là áp suất ban đầu; l là chiều dài của vít; A là hệ số tỷ lệ:

$$A = \frac{f_p}{\frac{h}{D} \operatorname{tg} \alpha_p \cos \alpha_0 \frac{D-h}{D}} [\cos \varphi - f_z \sin \varphi - \operatorname{tg} \alpha_p (\sin \varphi - f_z \cos \varphi)] - \frac{2 f_z}{\frac{s}{D} (1 - \frac{i \cdot e}{s}) \sin \alpha_0 \cos \alpha_0} - \frac{f_z \frac{D-2h}{D-h}}{\frac{h}{D} \cos \alpha_0 \operatorname{tg} \alpha_z} \quad (2.6)$$

Trong biểu thức trên f_p và f_z tương ứng là hệ số ma sát giữa nguyên liệu với buồng ép và nguyên liệu với vít ép; φ là góc ma sát. Các góc α_p , α_0 và α_z là các góc đặc trưng trên biên dạng vít ép ứng với chiều dài $\pi \cdot D$, $\pi \cdot (D - h)$ và $\pi \cdot (D - 2h)$, thể hiện như Hình 2- 2.



Hình 2- 2. Bước góc trên biên dạng vít ép
 Từ Hình 2- 2 ta có các công thức sau [33]:

$$\operatorname{tg} \alpha_p = \frac{s}{\pi D} \quad (2.7)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{s}{\pi(D-h)} = \operatorname{tg} \alpha_p \cdot \frac{1}{1 - \frac{h}{D}} \quad (2.8)$$

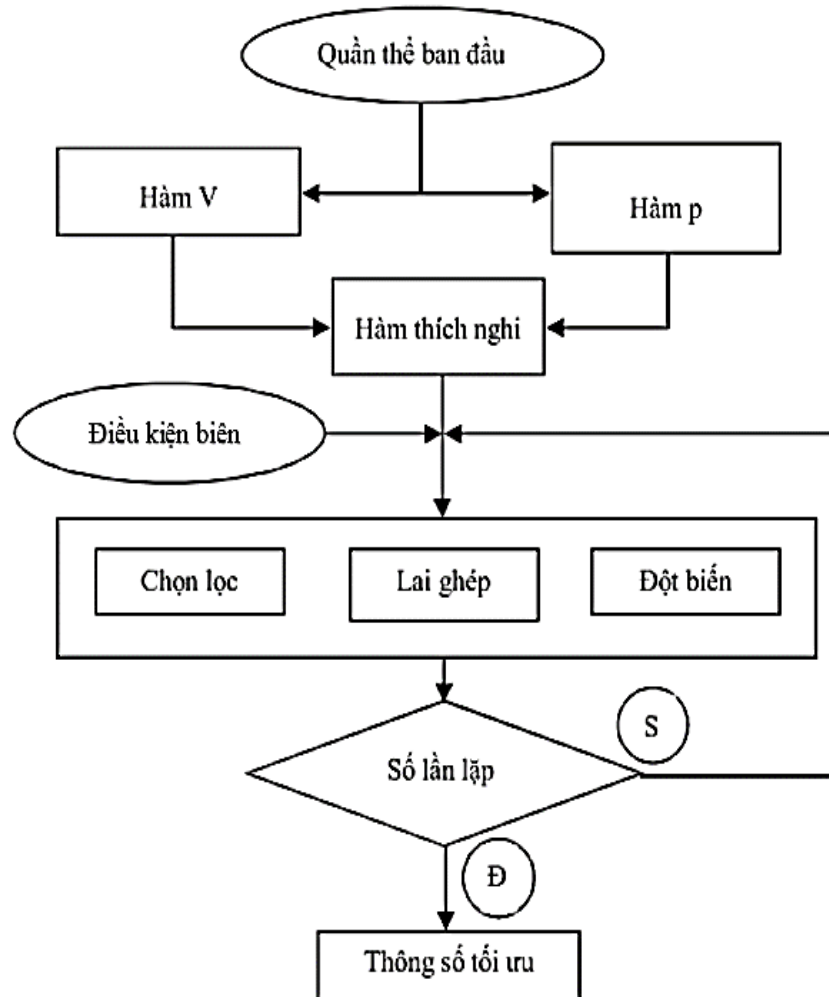
$$\operatorname{tg} \alpha_s = \frac{s}{\pi(D-2h)} = \operatorname{tg} \alpha_p \cdot \frac{1}{1 - \frac{2h}{D}} \quad (2.9)$$

2.2. Xây dựng phương pháp xác định biên dạng vít ép

2.2.1. Sơ đồ khối giải bài toán xác định biên dạng vít ép

Để giải bài toán tối ưu đa mục tiêu đối với biên dạng vít ép, luận án sử dụng giải thuật di truyền (GA) [34], [47] kết hợp với phương pháp trọng số; sơ đồ khối của quá trình tối ưu được thể hiện trong Hình 2-3. Bài toán được thiết lập với hai tiêu chí tối ưu chủ yếu là thể tích ép và áp suất nén. Về bản chất, biên dạng vít ép được xem như biến thiết kế, còn hàm mục tiêu phụ thuộc vào hai thông số đặc trưng nói trên. Thực tế cho thấy, khi gia tăng thể tích buồng ép thì

năng suất của quá trình ép có thể được cải thiện, nhưng áp suất nén lại có xu hướng suy giảm



Hình 2- 3. Sơ đồ khối xác định biên dạng vít ép bằng GA

Ngược lại, việc tăng áp suất nén sẽ nâng cao mức độ liên kết giữa các hạt vật liệu rời rạc, song lại làm giảm thể tích làm việc, tăng ma sát tiếp xúc và đẩy nhanh quá trình mài mòn của vít ép. Do đó, hai tiêu chí này tồn tại mối quan hệ đánh đổi lẫn nhau. Để dung hòa đồng thời cả hai mục tiêu, hàm mục tiêu tổng hợp M được xây dựng theo phương pháp trọng số [34] và được viết dưới dạng sau:

$$M = w_1 \cdot \frac{V}{V^*} + w_2 \cdot \frac{P_n}{P_n^*} \rightarrow \text{Max} \quad (2.10)$$

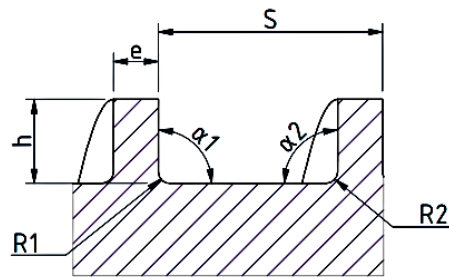
Với V^* và P_n^* là các giá trị giới hạn của thể tích và áp suất, được lựa chọn dựa trên điều kiện làm việc thực tế của hệ vít ép tại cơ sở sản xuất $V^* = 2880000 \text{ mm}^3$; $P_n^* = 6,6 \text{ Mpa}$. Với trọng số $w_1 = w_2 = 0,5$.

Xây dựng bài toán theo phương pháp ứng dụng giải thuật di truyền (GA), trong đó coi các biến thiết kế $X = [\alpha_1, \alpha_2, R_1, R_2, h]^T = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T$ chính là các quần thể ban đầu, hàm thích nghi trong sơ đồ khối ở Hình 2- 3 trùng với hàm đa mục tiêu M. Các điều kiện biên $\alpha_1 = 60^\circ \div 120^\circ$; $\alpha_2 = 60^\circ \div 120^\circ$; $R_1 = 1 \div 20$; $R_2 = 1 \div 40$; $h = 8 \div 15$.

2.2.2. Các kết quả về biên dạng vít ép

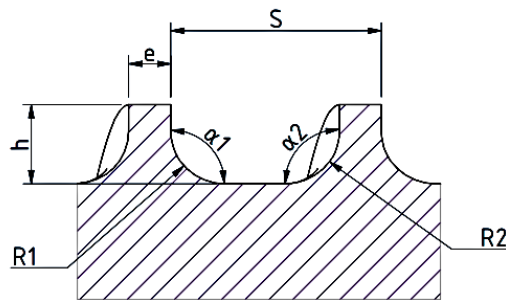
Quá trình tối ưu được lập trình và thực hiện trên phần mềm MATLAB thông qua mô-đun Optimization Tool/Multiobjective Optimization using Genetic Algorithm. Các điều kiện biên của bài toán được thiết lập dựa trên điều kiện làm việc thực tế của vít ép tại cơ sở sản xuất. Việc tính toán thử nghiệm được tiến hành với các thông số ban đầu của vít ép gồm: $D = 66 \text{ mm}$; đường kính trong của vít ép $d = 36 \text{ mm}$, chiều rộng đỉnh cánh vít $e = 8 \text{ mm}$. Trong đó coi các biến thiết kế $X = [\alpha_1, \alpha_2, R_1, R_2, h]^T = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T$ là các cá thể và tạo thành 1 quần thể ban đầu và tiến hành lai ghép để đạt độ tin cậy cho kết quả thì tỷ lệ đột biến được lựa chọn trong khoảng 2% đến 4%, phần trăm đột biến trong khoảng 2% đến 5%, phần trăm chéo giữa các quần thể từ 60% đến 80%. Để đạt được kết quả đó thì cần 800 thế hệ. Các tham số tối ưu là $\alpha_1, \alpha_2, R_1, R_2, h$.

Ta có các kết quả tương ứng với các trường hợp $\frac{R_1}{D} = \frac{R_2}{D} \rightarrow 0, \alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$, trường hợp $\frac{R_1}{D} \neq 0$ và $\alpha_1 \neq \alpha_2$. Trường hợp thứ nhất, áp suất tăng nhanh, nhưng do góc $\frac{R_1}{D} = \frac{R_2}{D} \rightarrow 0$ hệ quả là sự dịch chuyển của nguyên liệu qua bước vít tiếp theo bị hạn chế, làm tăng ma sát tiếp xúc và đẩy nhanh quá trình mài mòn tại vùng biên dạng phía sau, có thể dẫn đến hiện tượng mòn cục bộ trên vít ép (Hình 2- 4).



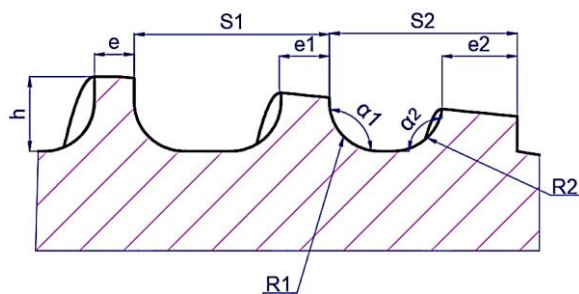
Hình 2- 4. Trường hợp thứ nhất, $\frac{R_1}{D} = \frac{R_2}{D} \rightarrow 0$

Trong trường hợp thứ hai, do $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$ Do đó, áp lực được phân bố đồng đều hơn trên toàn bộ biên dạng của vít so với trường hợp thứ nhất, tuy nhiên vẫn gây mòn chủ yếu tại các cánh vít và chân cánh vít ở vùng ép (Hình 2- 5).



Hình 2- 5. Trường hợp thứ hai, $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$

Trong trường hợp thứ 3 khi kết hợp các thông số của biên dạng hình học, áp suất tăng nhanh và ổn định, quá trình vận chuyển nguyên liệu qua bước tiếp theo cũng thuận lợi hơn (Hình 2- 6).



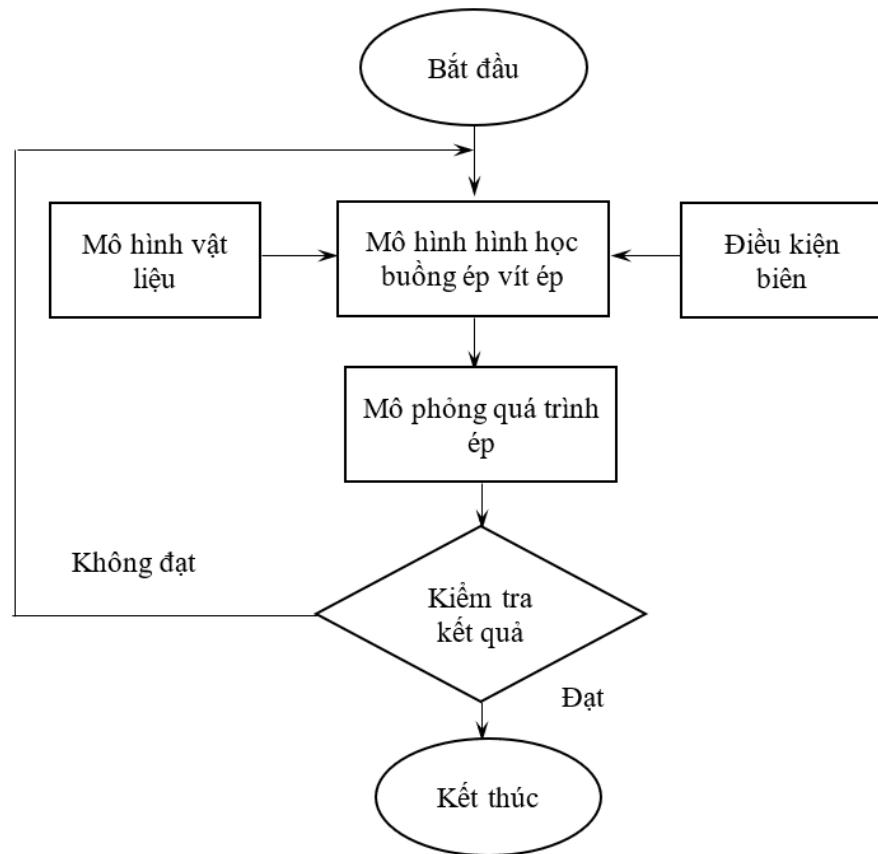
Hình 2- 6. Trường hợp thứ ba $\frac{R}{D} \neq 0$ và $\alpha_1 \neq \alpha_2$

Ở trường hợp thứ nhất có thể thấy trong quá trình làm việc do $\frac{R_1}{D} = \frac{R_2}{D} \rightarrow 0$ nên khả năng vận chuyển vật liệu tốt, áp suất tăng nhanh hơn nhưng có thể khó khăn cho bước vít tiếp theo khiến vít ép bị mòn cục bộ, các vị trí mòn có thể là nơi tập trung ứng suất (vị trí đáy vít) và tập trung chính ở ba cánh vít cuối. Trường hợp thứ 2 hiện tượng mòn cục bộ sẽ ít hơn. Trường hợp thứ 3 áp suất tăng nhanh, quá trình vận chuyển nguyên liệu qua bước tiếp theo cũng thuận lợi hơn và các vị trí mòn cũng được phân bố đều hơn. Khi lựa chọn được các kích thước tối ưu phù hợp thì phương án 3 có thể là phương án tốt nhất.

Từ các trường hợp 1, 2, 3 sẽ thiết kế mô hình thứ nhất, mô hình thứ 2, mô hình thứ 3 để tiến hành mô phỏng số nhằm đánh giá, dự đoán quá trình làm việc của vít ép.

2.3. Nghiên cứu mô phỏng quá trình ép vật liệu rời rạc

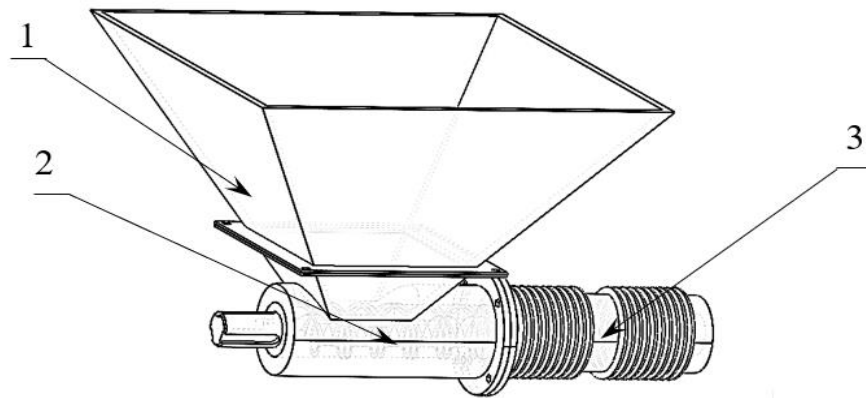
Để xây dựng được bài toán mô phỏng số, tiến hành xây dựng các thông số đầu vào, các điều kiện biên để phần mềm EDEM có thể tính toán chính xác nhất. Sơ đồ khối bài toán mô phỏng ép vật liệu mùn cưa trong hệ thống vít ép – buồng ép được biểu diễn như Hình 2- 7.



Hình 2- 7. Sơ đồ khối bài toán mô phỏng ép vật liệu mùn cưa trong hệ thống vít ép – buồng ép

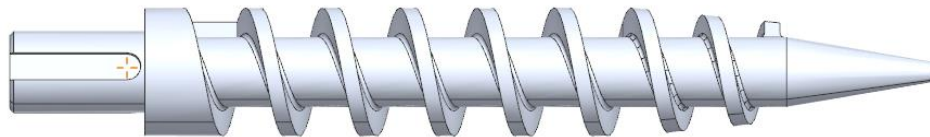
2.3.1. Xây dựng mô hình hình học vít ép – buồng ép

Mô hình hình học vít ép – buồng ép được thể hiện như Hình 2- 8 gồm 3 phần chính gồm: Phễu nạp liệu 1 đảm bảo vật liệu rời rạc (mùn cưa) được dẫn xuống trục vít một cách đồng đều, hạn chế hiện tượng tắc nghẽn. Vít ép 2 được thiết kế tạo lực nén dọc trục lên vật liệu, giúp gia tăng mật độ và tạo hình viên nén. Buồng ép và ống dẫn 3 giữ vai trò định hình và kiểm soát dòng chảy vật liệu ra ngoài, đảm bảo viên thành phẩm đạt kích thước, hình dạng ổn định. Thông qua mô hình này có thể dễ dàng đánh giá thiết kế hình học của vít ép và buồng ép từ đó lựa chọn phương án cấu trúc phù hợp nhằm giảm mài mòn, tăng tuổi thọ thiết bị, đồng thời đảm bảo viên nén đạt chất lượng cao.



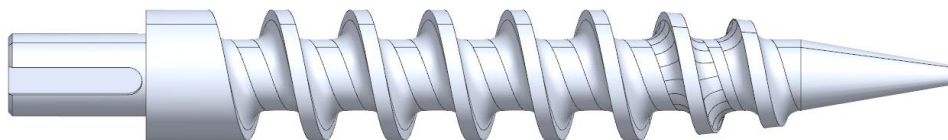
Hình 2- 8. Mô hình hình học hệ thống vít ép – buồng ép
 trong nghiên cứu này, 03 mô hình mô phỏng được thiết lập trên phần mềm EDEM [32], [45], bao gồm:

- Mô hình mô phỏng thứ nhất: Là mô hình mô phỏng quá trình ép vật liệu mùn cưa với mô hình hình học của vít ép khi $\frac{R_1}{D} = \frac{R_2}{D} \rightarrow 0$. Mô hình vít ép được thể hiện như Hình 2- 9.



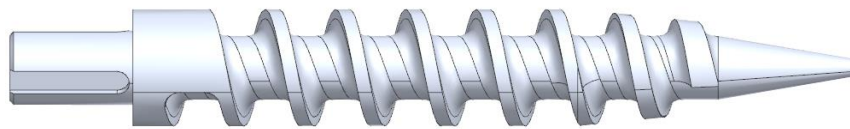
Hình 2- 9. Hình ảnh mô hình vít ép thứ nhất

- Mô hình mô phỏng thứ hai: Là mô hình mô phỏng quá trình ép vật liệu mùn cưa với mô hình hình học của vít ép $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$ như hình 2- 10.



Hình 2- 10. Hình ảnh mô hình vít ép thứ hai

- Mô hình mô phỏng thứ ba: Là mô hình mô phỏng quá trình ép vật liệu mùn cưa với mô hình hình học của vít ép trong trường hợp thứ ba $\frac{R}{D} \neq 0$ và $\alpha_1 \neq \alpha_2$. Mô hình vít ép được thể hiện như Hình 2- 11.



Hình 2- 11. Hình ảnh mô hình vít ép thứ 3

2.3.2. Xây dựng mô hình vật liệu

Vật liệu trong bài toán mô phỏng có 2 dạng vật liệu: Vật liệu mùn cưa và vật liệu chế tạo vít ép.

2.3.2.1. Mô hình vật liệu mùn cưa

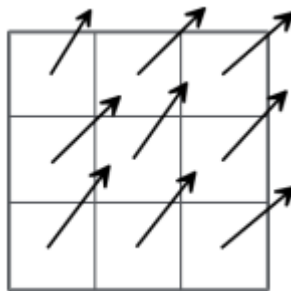
Mùn cưa có kích thước bất định nên thành phần trong mùn cưa có thể thay đổi tùy thuộc vào loại gỗ và quy trình chế tạo sản phẩm. Qua phân tích hình ảnh mùn cưa như hình 2- 12 ta thấy rằng mùn cưa có hình dạng bất định với kích thước dài rộng trong khoảng từ 0,08 – 0,6 mm để xây dựng mô hình mô phỏng.

Do các hạt mùn cưa có kích thước bất định nên trong quá trình nghiên cứu thì thấy phương pháp mô phỏng vật liệu rời rạc là phù hợp nhất để tiến hành xây dựng mô hình và mô phỏng số. Trong lĩnh vực mô phỏng vật liệu rời rạc, có hai phương pháp chính để mô tả ứng xử của vật liệu là phương pháp liên tục và phương pháp rời rạc.



Hình 2- 12. Hình ảnh mùn cưa trên kính hiển vi quang học Leica độ phóng đại 50 lần

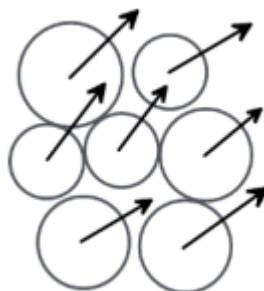
Phương pháp liên tục là cách tiếp cận giả định rằng vật liệu là một môi trường liên tục và đồng nhất – không có sự tồn tại rời rạc của từng hạt riêng biệt. Vật liệu được xem là một "khối đặc" trải đều trong không gian, và có thể mô tả bằng các đại lượng vật lý thay đổi liên tục được thể hiện như hình 2- 13.



Hình 2- 13. Phương pháp liên tục trong mô phỏng DEM [20]

Phương pháp liên tục giúp mô tả ứng xử vật liệu thông qua các trường cơ học liên tục, sử dụng phương trình vi phân và giải bằng FEM/FVM.

Trong khi đó phương pháp phần tử rời rạc tiếp cận vật liệu như là một tập hợp các hạt riêng biệt. Mỗi hạt được mô hình hóa như một đối tượng độc lập như hình 2- 14. Đặc biệt phương pháp này không cần mô hình toán học cho toàn hệ, vì ứng xử tổng thể sẽ tự hình thành từ sự va chạm, ma sát, dính... giữa các hạt. Càng nhiều hạt thì sẽ cho kết quả càng giống thực tế nhưng đòi hỏi thời gian tính toán. Phương pháp này hữu ích khi các hiện tượng xảy ra ở quy mô kích cỡ hạt nhỏ (cm, mm...) đặc biệt khi các hạt có kích thước bất định và khác nhau. Hạn chế chính của phương pháp này là thời gian tính toán lớn hơn so với phương pháp liên tục do phải theo dõi đồng thời rất nhiều hạt và tính toán tại mỗi bước thời gian rất nhỏ.



Hình 2- 14. Phương pháp rời rạc trong mô phỏng DEM [20]

Rõ ràng phương pháp rời rạc được lựa chọn là phù hợp nhất. Phương pháp rời rạc không chỉ cho phép theo dõi từng hạt trong quá trình tiếp xúc mà còn cung cấp khả năng mô phỏng quá trình mài mòn theo thời gian, biên dạng hình học của chi tiết bị mài mòn, cũng như các yếu tố ảnh hưởng như lực, vận tốc va chạm, nhiệt... Đây là điều mà phương pháp liên tục không thể thể hiện rõ được.

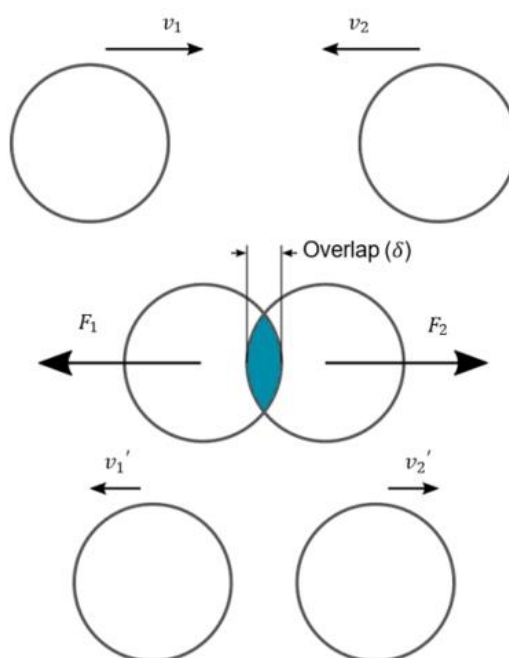
Bên cạnh đó việc xác định và lựa chọn đúng các điều kiện làm việc cho mô hình mô phỏng là bước quan trọng, mang tính quyết định đến độ chính xác và tính khả thi của kết quả mô phỏng. Các điều kiện này không chỉ đóng vai trò tái hiện môi trường làm việc thực tế của vít ép tải trọng cao mà còn giúp phản ánh chính xác quá trình vận chuyển, nén chặt, dòng chảy vật liệu và sự phân bố áp suất dọc theo buồng ép. Đặc biệt, khi đối tượng nghiên cứu là vật liệu rời rạc như mùn cưa, với đặc điểm hình học không đều thì điều kiện biên càng cần được lựa chọn sát thực tế. Việc xác định chính xác các thông số như: hình dạng và kích thước hạt, khối lượng riêng, mô đun đàn hồi, hệ số Poisson, hệ số ma sát (hạt – hạt và hạt – vít), lực kết dính, hệ số phục hồi sẽ quyết định khả năng dự đoán đúng ứng xử dòng chảy, mức độ nén và mài mòn bề mặt vít.

Thông số tham khảo của vật liệu mùn cưa như Bảng 2- 1 [11], [26], [31], [45], [53]:

Bảng 2- 1. Thông số vật liệu mùn cưa

TT	Thông số	Giá trị
1	Kích thước mùn cưa	0,08 ÷ 0,6 mm
2	Độ ẩm toàn phần	3 ÷ 10%
3	Hàm lượng tro	2 ÷ 3%
4	Nhiệt lượng tổng trên mẫu khô	4500 ÷ 5000 Kcal/kg
5	Khối lượng riêng	300 ÷ 700 kg/m ³
6	Moduls Young	1 ÷ 10 pa
7	Hệ số dẫn nhiệt	0,3 W/(m.K)
8	Hệ số liên kết	20 J/m ³
9	Hệ số Poisson	0,2 ÷ 0,3
10	Hệ số ma sát hạt – hạt	0,4 ÷ 0,6
11	Hệ số ma sát hạt – vít	0,5 ÷ 0,7
12	Hệ số phục hồi	0,2 ÷ 0,5
13	Lực kết dính hạt với hạt	0 ÷ 0,2 N

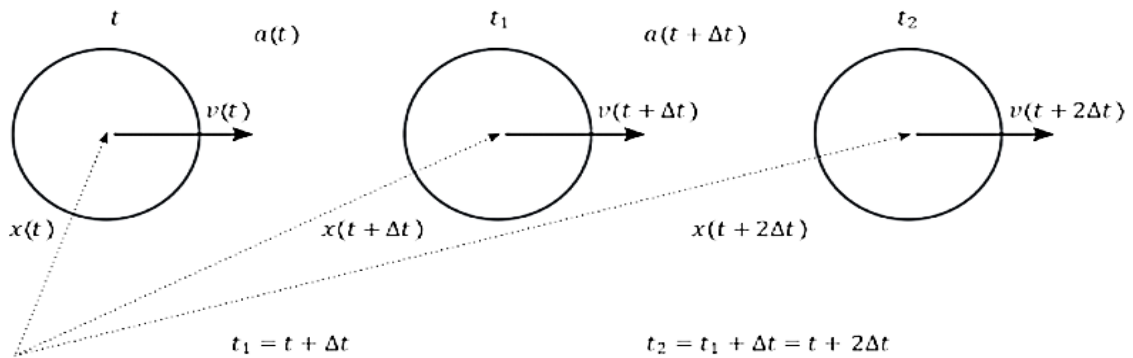
Có hai trường hợp trong mô phỏng số DEM là các hạt cứng tuyệt đối và cứng tương đối. Các hạt cứng tuyệt đối không cho phép chồng lấn, va chạm giữa các hạt xảy ra tức thời, không kéo dài theo thời gian và chỉ trao đổi động lượng khi tiếp xúc, không tính toán lực tiếp xúc theo thời gian, không có mô hình biến dạng hay ma sát thực sự. Thì ngược lại trường hợp cứng tương đối các hạt vẫn được coi là cứng, nhưng cho phép một lượng chồng lấn nhỏ trong quá trình tương tác. Từ độ chồng lấn và tốc độ tương đối, ta tính được lực tiếp xúc theo thời gian như hình 2- 15. Ưu điểm của phương pháp này là có thể tính được biến dạng cục bộ, ma sát, mài mòn, kết dính, va đập... Việc mô phỏng ứng xử hạt trong DEM được xây dựng trên nền tảng của định luật Newton về chuyển động quay và tịnh tiến. Sự cập nhật vận tốc – vị trí từng hạt được thực hiện thông qua tích phân số theo thời gian, tạo nên mô hình hóa chính xác chuyển động rời rạc của vật liệu trong quá trình va chạm, chảy, mài mòn...



Hình 2- 15. Phương pháp rời rạc trong mô phỏng DEM [20]

Để mô phỏng chuyển động thực của từng hạt rời rạc, gia tốc được tích phân theo từng bước thời gian nhỏ Δt theo công thức 1.16 và 1.17 để cập nhật

vận tốc và vị trí mới của hạt như hình 2- 16. Với mỗi bước thời gian Δt , vị trí và vận tốc của hạt được tính toán từ gia tốc hiện tại. Đây là cơ chế cốt lõi để thể hiện chính xác chuyển động và tương tác của các hạt trong môi trường rời rạc phức tạp. Các bước thời gian này lặp lại hàng triệu lần giúp tái hiện dòng chảy, mài mòn...



Hình 2- 16. Nguyên lý bước thời gian trong mô phỏng DEM [20]

Việc lựa chọn bước thời gian Δt là yếu tố then chốt ảnh hưởng đến độ chính xác và ổn định số. Để đảm bảo không xảy ra giao thoa quá mức giữa các hạt và ngăn chặn sự lan truyền của sóng Rayleigh gây nhiễu mô phỏng, Δt cần được chọn nhỏ hơn một phần của bước thời gian Rayleigh như hình 2- 17. Bước thời gian Rayleigh (Rayleigh time step) là một giá trị đặc trưng trong mô phỏng bằng phương pháp phần tử rời, dùng để xác định giới hạn trên cho bước thời gian Δt trong mô phỏng, nhằm đảm bảo, tính ổn định số, tính chính xác vật lý, tránh giao thoa lực không thực. Với bước thời gian Rayleigh được tính theo công thức 2.11 và Δt thường lấy $0,1 \div 0,3 T_R$ [20].

$$T_R = \frac{\pi \cdot R_h \cdot (\rho / G)^{1/2}}{0,1631 \cdot \nu + 0,8766} \quad (2.11)$$

Trong đó:

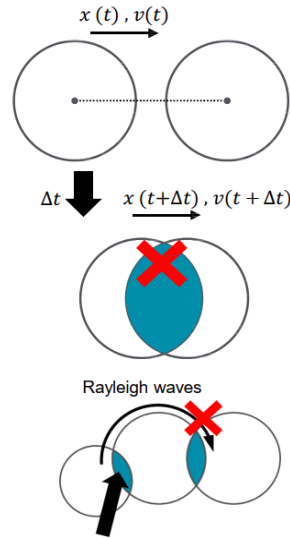
T_R : Bước thời gian Rayleigh, s.

R_h : Bán kính hạt, m.

ρ : Tỷ trọng (khối lượng riêng) của vật liệu hạt, kg/m^3

G : Mô đun cắt (shear modulus) của vật liệu, N/m^2 .

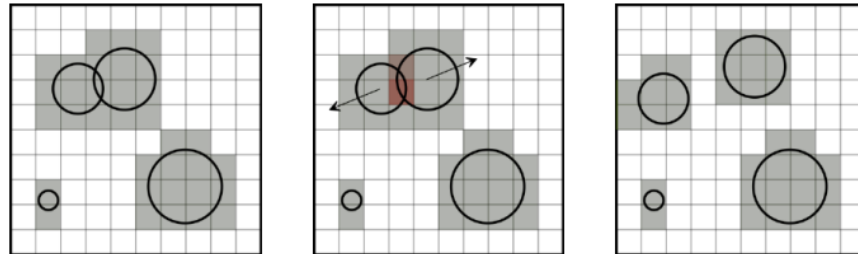
ν : Hệ số Poisson.



Hình 2- 17. Nguyên lý bước thời gian Rayleigh trong mô phỏng DEM [20]

Trong mô phỏng động lực học rời rạc (DEM), phát hiện va chạm giữa các hạt là một trong những bước tính toán quan trọng và mất thời gian tính toán. Đối với các hạt có hình cầu, va chạm xảy ra khi khoảng cách giữa tâm của hai hạt nhỏ hơn tổng bán kính của chúng. Do đó, quá trình phát hiện va chạm yêu cầu kiểm tra khoảng cách giữa tất cả các cặp hạt trong hệ, dẫn đến thời gian tính toán rất lớn khi số lượng hạt tăng vì việc này chiếm tới 70–80% tổng thời gian tính toán của một mô phỏng DEM. Do đó các thuật toán phát hiện va chạm hiện đại trong DEM sử dụng phương pháp chia không gian tính toán thành các ô lưới ba chiều. Mỗi ô có kích thước được xác định dựa trên đặc điểm phân bố kích thước hạt, thường là từ 3 đến 5 lần bán kính của hạt nhỏ nhất trong hệ. Các hạt được gán vào các ô tương ứng theo vị trí của chúng tại mỗi bước thời gian. Tại mỗi bước tính, chỉ những ô có chứa hạt (gọi là ô hoạt động) mới được đưa vào xem xét. Việc phát hiện va chạm được giới hạn trong nội bộ từng ô hoặc giữa các ô lân cận, từ đó giảm đáng kể số lượng cặp hạt cần kiểm tra. Khi phát hiện có va chạm, các lực tiếp xúc được tính toán và dùng để cập nhật vận tốc,

gia tốc, và vị trí của từng hạt thông qua tích phân số. Sau khi các hạt được cập nhật vị trí mới, thuật toán tiếp tục xác định lại các ô hoạt động và lặp lại quy trình cho bước thời gian tiếp theo như hình 2- 18.



Hình 2- 18. Nguyên lý phát hiện va chạm trong mô phỏng DEM [20]

Lượng mòn vít ép có thể được tính dựa trên tỷ lệ sai lệch khối lượng vít ép trước và sau khi làm việc với khối lượng vít ép ban đầu như công thức 2.12.

$$W = \frac{M - M_1}{M} \quad (2.12)$$

Bằng mô phỏng số chúng ta có thể dựa trên lượng mòn mô phỏng để kiểm tra khối lượng mòn được xác định bởi công thức 2.13 và đánh giá lượng mòn đó so với thực tế.

$$M_m = d_w \cdot A_1 \cdot M \quad (2.13)$$

Trong đó d_w : là độ sâu mòn, mm được tính theo công thức (2.13)

A_1 : Diện tích bề mặt mòn, mm^2 .

M : khối lượng riêng vật liệu vít ép (kg/m^3)

Nhưng ở đây lượng mòn có thể được tính theo chiều sâu mòn d_w được tính như sau [4], [62], [63]:

$$d_w = \frac{E(\alpha) \cdot m_p}{A} \quad (2.14)$$

$$\text{Trong đó: } E(\alpha) = 65 \cdot W^{-k_1} \cdot \left(\frac{v}{104}\right)^{2,3 \cdot H_v^{0,038}} \cdot \left(\frac{D}{0,326}\right)^{0,19} \cdot g(\alpha) \quad (2.15)$$

$g(\alpha)$ là hệ số phụ thuộc góc tác động ảnh hưởng đến lượng mòn được tính theo công thức (2.16) [4], [62], [63].

$$g(\alpha) = \sin(\alpha)^{0,71 \cdot H_v^{0,14}} \cdot [1 + H_v \cdot (1 - \sin(\alpha))]^{2,4 \cdot H_v^{-0,94}} \quad (2.16)$$

Trong đó:

A: Diện tích, mm^2 .

m_p : Khối lượng hạt, kg.

α : Góc tác động của hạt, rad.

v: Vận tốc hạt, m/s.

D: Đường kính hạt, mm.

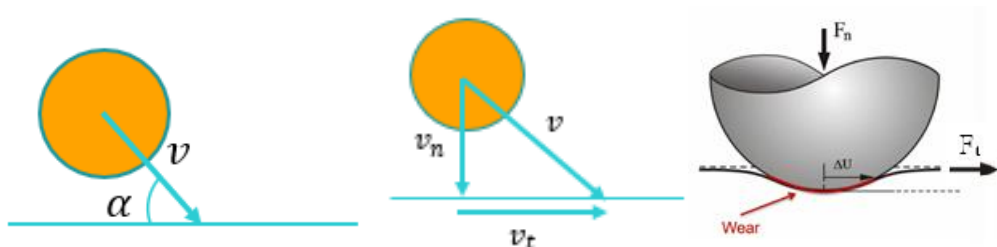
Hv: Hệ số Vickers hardness của vật liệu, Gpa.

w – Hệ số mòn vật liệu

ΔU – Khoảng cách trượt của hạt khi tiếp xúc (mm)

Hệ số mòn Oka: $W_{Oka} \approx 3$ đối với thép C45 [20], [26], [53], [62], [63].

Trong quá trình ép vật liệu, các hạt mùn của được chuyển động từ buồng cấp liệu và tương tác với bề mặt của vít dẫn, di chuyển dọc theo trục vít của vít ép. Khi chúng tiếp xúc với vùng dẫn, nơi chưa có sự tăng cao về nhiệt độ và áp suất, các hạt vật liệu có thể di chuyển với vận tốc V lệch với phương ngang một góc α nào đó. Điều này dẫn đến việc mòn bề mặt của vít. Để dễ dàng tính toán, chúng ta có thể phân thành hai thành phần vận tốc vuông góc với nhau V_t và V_n . Tùy thuộc vào vận tốc và hướng chuyển động, vít có thể bị cào và gây ra hiện tượng mòn bề mặt, thay vì biến dạng dẻo. Quá trình này được mô hình hóa như trong hình 2- 19.



Hình 2- 19. Mô hình mòn vít ép khi tương tác vật liệu rời rạc [20]

Mô hình mài mòn Archard được xây dựng dựa trên giả thiết mài mòn trượt trong điều kiện tiếp xúc khô, không xét đến ảnh hưởng của nhiệt và oxy hóa. Trong luận án này, mô hình Archard được sử dụng như một công cụ đánh

giá định lượng tương đối nhằm so sánh mức độ mài mòn giữa các phương án thiết kế vít ép. So với các mô hình mài mòn khác như Oka hay Finnie, vốn phù hợp hơn cho xói mòn do va đập hạt ở vận tốc cao, mô hình Archard có ưu điểm là cấu trúc đơn giản và dễ tích hợp với DEM, phù hợp với điều kiện làm việc của vít ép tải trọng cao.

Trong đó động lực học hạt được tính theo công thức 2.17. Đây là phương trình cơ bản trong cơ học Newton mô tả chuyển động của từng hạt riêng lẻ

$$m_i \frac{d^2 r_i}{dt^2} = F_i \quad (2.17)$$

Trong đó m_i là khối lượng hạt i (g); r_i là vị trí của hạt i ; F_i (N) là tổng lực. Lực pháp tuyến F_n được tính theo công thức 2.18:

$$F_n = k_n \cdot \delta_n - \gamma_n \cdot v_n \quad (2.18)$$

Trong đó F_n : Lực pháp tuyến tác dụng tại điểm tiếp xúc giữa hai hạt.

k_n : Hệ số đàn hồi pháp tuyến, mô tả độ cứng của vật liệu.

δ_n : Độ lún giữa hai hạt tại điểm tiếp xúc (khoảng cách mà hai bề mặt hạt nén vào nhau).

γ_n : Hệ số suy giảm pháp tuyến, mô tả sự mất mát năng lượng trong quá trình va chạm.

v_n : Vận tốc tương đối giữa hai hạt theo phương pháp tuyến.

Lực tiếp tuyến được tính theo công thức 2.19.

$$F_t = k_t \cdot \delta_t - \gamma_t \cdot v_t \quad (2.19)$$

Trong đó F_t : Lực tiếp tuyến tác dụng tại điểm tiếp xúc.

k_t : Hệ số đàn hồi tiếp tuyến, mô tả độ cứng vật liệu theo phương tiếp tuyến.

δ_t : Biến dạng trượt giữa hai hạt tại điểm tiếp xúc.

γ_t : Hệ số suy giảm pháp tuyến, mô tả sự mất mát năng lượng trong quá trình ma sát

Lực kết dính giữa các hạt được tính theo công thức 2.20:

$$F_c = \sigma.A \quad (2.20)$$

Trong đó F_c : là lực kết dính giữa các hạt (N)

σ : Ứng suất liên kết của vật liệu (N/mm²)

A: Diện tích tiếp xúc giữa hai hạt (mm²)

Trong nghiên cứu này, phương pháp phần tử rời rạc (DEM) được sử dụng nhằm phân tích xu hướng phân bố lực tiếp xúc, áp suất nén và mài mòn tương đối của vít ép tải trọng cao giữa các phương án thiết kế khác nhau trong cùng điều kiện làm việc. Mục tiêu của mô phỏng không nhằm dự đoán chính xác tuyệt đối các giá trị lực hay lượng mài mòn, mà tập trung so sánh và đánh giá hiệu quả cải tiến hình học và giải pháp bề mặt. Cách tiếp cận này phù hợp với mục tiêu tối ưu thiết kế và được kiểm chứng thông qua các kết quả thực nghiệm trình bày ở các chương sau.

Các tham số DEM trong mô hình được lựa chọn trên cơ sở kết hợp giữa tài liệu tham khảo đã công bố đối với vật liệu sinh khối dạng mùn cưa, kết quả quan sát hành vi dòng chảy và nén của vật liệu trong mô phỏng, cùng với các khuyến nghị kỹ thuật của phần mềm nhằm đảm bảo điều kiện ổn định tính toán. Do đặc tính của mùn cưa là vật liệu rời có tính biến dạng phức tạp, mô hình DEM trong luận án chưa xét đầy đủ các cơ chế biến dạng vi mô. Tuy nhiên, các tham số được lựa chọn vẫn đảm bảo khả năng phản ánh hợp lý xu hướng phân bố tải và mài mòn tương đối giữa các cấu hình vít ép.

Trong mô phỏng DEM, việc lựa chọn phương thức mô tả hình dạng hạt giữ vai trò then chốt, bởi nó quyết định độ tin cậy của kết quả mô phỏng và hiệu quả tính toán. Biểu diễn bằng hình cầu đơn có ưu điểm là đơn giản, nhanh và tiết kiệm tài nguyên, nhưng không phản ánh được tính bất quy tắc và cơ chế gài cơ học của vật liệu thực. Ngược lại, mô hình hình học chính xác (đa diện, hình dạng thực) cho độ chính xác cao nhưng yêu cầu tính toán lớn, khó áp dụng cho các hệ vật liệu dạng rời có kích thước nhỏ. Vì vậy, mô hình cân bằng đại

diện (Representative calibrated model) được lựa chọn như hình 2- 20, kết hợp ưu điểm của cả hai cách tiếp cận.”

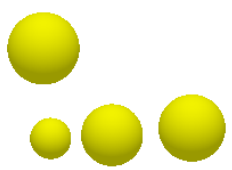
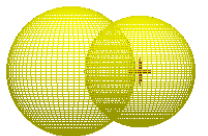


Hình 2- 20. Nguyên tắc xây dựng mô hình vật liệu rời rạc

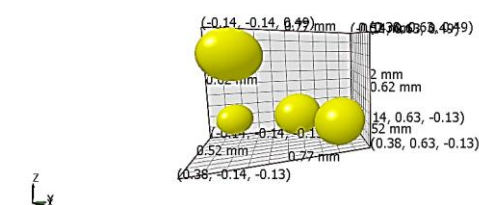
Phương pháp này mô tả được đặc điểm hình học bất quy tắc của hạt nhờ tổ hợp nhiều hình cầu, đồng thời vẫn đảm bảo hiệu suất tính toán hợp lý. Để mô hình phản ánh đúng ứng xử vật liệu rời ngoài thực tế, quá trình hiệu chỉnh vật liệu (material calibration) là bắt buộc. Khi mô phỏng các hạt sẽ được thiết kế theo hình dạng điển hình của mùn cưa gồm nhiều hạt cầu giống và khác nhau kết hợp lại như bảng 2- 2 và hình 2- 15. Phần mềm lựa chọn ngẫu nhiên các hạt để mô phỏng.

Bảng 2- 2. Mô hình hạt mùn cưa

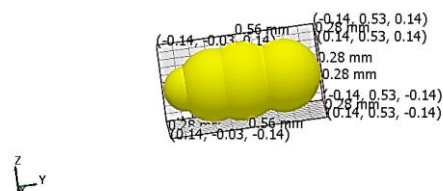
TT	Hình ảnh hạt	Kích thước cầu (mm)	Ghi chú
1		$R = 0.08$	
2		$R = 0.12$	
3		$R = 0.08$	
4		$R = 0.12$ $R = 0.13$ $R = 0.14$	
5		$R = 0.08$	
6		$R = 0.12$ $R = 0.13$ $R = 0.08$	

7		$R = 0.12$ $R = 0.13$ $R = 0.14$ $R = 0.08$	
8		$R = 0.12$ $R = 0.14$	
9		$R = 0.12$ $R = 0.13$ $R = 0.14$ $R = 0.08$	

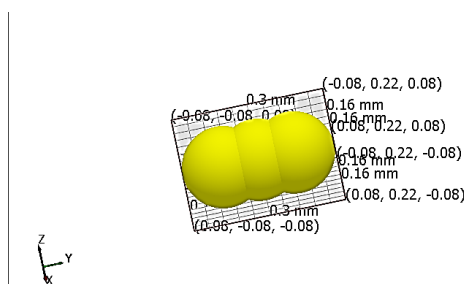
Time: 0 s



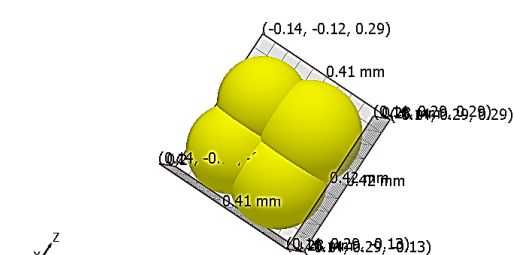
New Particle 1 Spheres				
☐ Edit Contact Radius				
Name	Position X (mm)	Position Y (mm)	Position Z (mm)	Physical Radius (mm)
0 sphere 0	0	0	0	0.08
1 sphere 1	0	0.3	0	0.12
2 sphere 2	0.25	0.5	0	0.13
3 sphere 3	0	0	0.35	0.14



New Particle 1 Spheres				
☐ Edit Contact Radius				
Name	Position X (mm)	Position Y (mm)	Position Z (mm)	Physical Radius (mm)
0 sphere 0	0	0.05	0	0.08
1 sphere 1	0	0.15	0	0.13
2 sphere 2	0	0.25	0	0.14
3 sphere 3	0	0.3	0	0.12



New Particle 1 Spheres				
☐ Edit Contact Radius				
Name	Position X (mm)	Position Y (mm)	Position Z (mm)	Physical Radius (mm)
0 sphere 0	0	0	0	0.08
1 sphere 1	0	0.07	0	0.08
2 sphere 2	0	0.14	0	0.08



New Particle 1 Spheres				
☐ Edit Contact Radius				
Name	Position X (mm)	Position Y (mm)	Position Z (mm)	Physical Radius (mm)
0 sphere 0	0	0	0	0.12
1 sphere 1	0	0.15	0	0.13
2 sphere 2	0	0	0.15	0.12
3 sphere 3	0	0.15	0.15	0.14

Hình 2- 21. Gán mô hình vật liệu mền cưa

Trong mô hình DEM, các điều kiện biên và ràng buộc được thiết lập nhằm phản ánh sát điều kiện làm việc thực tế của vít ép tải trọng cao. Chuyển động

quay của vít, điều kiện tiếp xúc giữa vật liệu và bề mặt vít, cũng như các ràng buộc hình học của bu lông ép được mô hình hóa thống nhất cho tất cả các phương án nghiên cứu. Mô hình vật liệu mún của được lựa chọn nhằm phản ánh hành vi cơ học đặc trưng của vật liệu sinh khối dạng rời trong quá trình nén và vận chuyển dưới tải trọng cao.

2.3.2.2. Vật liệu vít ép

Vít ép được chế tạo bằng thép C45. Thành phần hóa học và cơ tính của thép C45 được thể hiện như bảng 2- 3 [45]:

Bảng 2- 3. Thông số vật liệu thép C45

Mác thép	Tiêu chuẩn	Giới hạn bền σ_b (pa)	Giới hạn chảy σ_c (pa)	Độ giãn dài tương đối δ (%)	Độ cứng HRC
C45	TCVN 1766-75	610	360	16	23

Thành phần nguyên tố hóa học của thép C45 được thể hiện như bảng 2- 4 [45]:

Bảng 2- 4. Thành phần nguyên tố hóa học thép C45

Mác thép	Hàm lượng các nguyên tố %						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
	Không lớn hơn						
C45	0,42÷0,50	0,17÷0,37	0,50÷0,80	0,040	0,040	0,25	0,25

2.3.3. Xây dựng điều kiện biên

Ngoài các điều kiện liên quan đến vật liệu rời rạc thì thông số của các chi tiết cứng như vít và bu lông ép (làm bằng thép C45) cũng cần được khai báo chính xác về tính chất cơ học (mô đun Young, tỷ lệ Poisson, khối lượng riêng)

và điều kiện tiếp xúc, nhằm đảm bảo mô hình mô phỏng phản ánh đầy đủ tương tác thực tế. Nhờ việc lựa chọn điều kiện biên hợp lý, mô hình DEM không chỉ cung cấp thông tin về khả năng vận chuyển và nén của vật liệu, mà còn giúp dự đoán phân bố lực dọc trục, vùng áp suất cao, vùng dễ xảy ra mài mòn. Đây chính là cơ sở khoa học quan trọng để đánh giá, phân tích và cải tiến thiết kế. Với các thông số của vít ép qua khảo sát thực tế được lựa chọn như bảng 2- 5 để tiến hành mô phỏng:

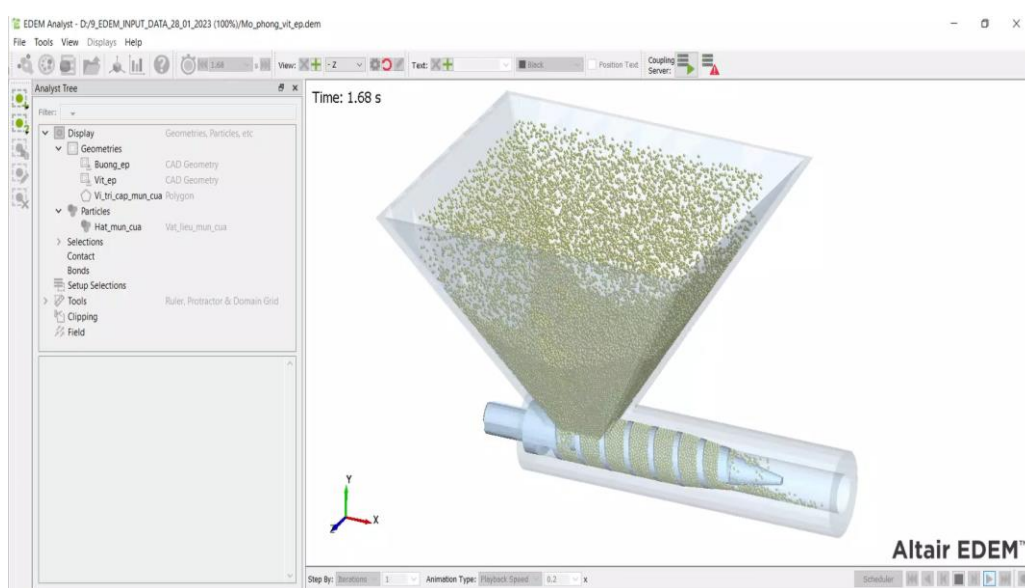
Bảng 2- 5. Điều kiện biên trong quá trình mô phỏng

TT	Nội dung	Thông số
1	Hệ số dẫn nhiệt	$37 \div 48 \text{ W/(m.K)}$
2	Nhiệt độ làm việc vít ép	$220 \div 300 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$
3	Hệ số mòn tương tác lên vít ép	$0,01 \div 0,001 \text{ Pa}^{-1}$
4	Lưu lượng cấp mùn cưa	$200 \div 300 \text{ kg/h}$
5	Khối lượng riêng thép C45	$7,850 \text{ kg/m}^3$
6	Modun Young thép C45	210 GPa
7	Hệ số Poisson thép C45	$0,1 \div 0,3$
8	Hệ số ma sát hạt – vít	$0,5 \div 0,7$
9	Độ cứng tiếp xúc	$\geq 10^5 \div 10^6 \text{ N/m}$
10	Hệ số phục hồi	$0,1 \div 0,3$

Khảo sát dây chuyền sản xuất thực tế, viên nén tại nhà máy được tạo ra bởi hệ thống vít ép – buồng ép làm việc với động cơ công suất 22 kW, tốc độ động cơ $n = 1450$ vòng/phút, truyền động để đạt tốc độ quay vít ép 350 vòng/phút, nhiệt độ đầu ra viên nén $220 \div 300^{\circ}\text{C}$, năng suất trung bình khoảng 3 tạ mùn cưa/giờ, áp suất nén tại cửa khuôn xấp xỉ 4,5 MPa. Các viên nén này được sử dụng làm nhiên liệu sinh khối (than sạch) cho mục đích đốt lò công nghiệp, sấy nông sản, chế biến thực phẩm và phục vụ nhu cầu sưởi ấm, nấu ăn dân dụng, đồng thời hướng tới đáp ứng các yêu cầu về mật độ năng lượng, độ bền cơ học và độ ẩm theo các tiêu chuẩn hiện hành về nhiên liệu sinh khối nén.

Các thông số này được sử dụng làm cơ sở để xác định điều kiện biên trong mô phỏng EDEM, bao gồm dải tốc độ quay vít ép, áp suất nén đặc trưng tại vùng cửa khuôn, lưu lượng cấp liệu và dải nhiệt độ làm việc, nhằm tái hiện sát nhất trạng thái làm việc tải trọng cao của hệ thống vít ép – buồng ép trong môi trường mô phỏng số và phục vụ mục tiêu thiết kế, tối ưu hóa vít ép theo hướng nâng cao độ bền viên nén và kéo dài tuổi thọ vít.

Sau khi thiết lập các thông số, tiến hành mô phỏng quá trình ép mùn cưa trên phần mềm EDEM và lựa chọn hệ số tỷ lệ với mô phỏng là 1:1 như hình 2- 16 trong thời gian 60 giờ với bước thời gian mô phỏng là Δt 10^{-6} giây tương ứng với 60 triệu bước tính toán cho ra 60 giây kết quả mô phỏng trên máy tính giúp đánh giá, phân tích và dự đoán những vị trí quan trọng cần điều chỉnh trong quá trình làm việc của hệ thống.



Hình 2- 22. Mô hình mô phỏng quá trình ép trên phần mềm EDEM

Thiết lập tương tự với 2 mô hình hình học đã đưa ra, với thời gian chạy mô phỏng trên máy tính là thời gian như nhau 60 giờ các kết quả sẽ được đánh giá, phân tích và so sánh.

2.4. Phân tích kết quả mô phỏng

Trong quá trình vận hành thực tế, độ bền và tuổi thọ của vít ép chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi nhiều chỉ tiêu kỹ thuật quan trọng. Những chỉ tiêu này

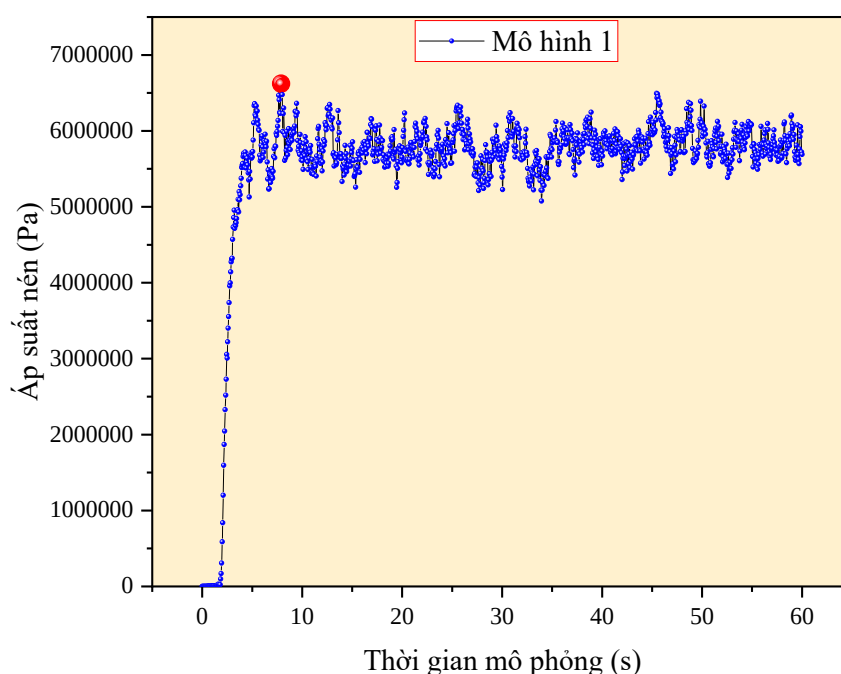
không chỉ quyết định khả năng nén, chất lượng viên thành phẩm mà còn tác động lớn đến độ mài mòn, biến dạng và hư hỏng của vít ép. Các chỉ tiêu cơ bản bao gồm: áp suất, lực nén lên vít, tổng lực tác dụng lên vít ép, ứng suất dọc trục, lực nén trung bình tác dụng lên vật liệu rời rạc được vận chuyển (sau đây gọi là hạt), thông lượng nhiệt, tensor ứng suất, vận tốc trung bình hạt, và cuối cùng là lượng mòn trung bình. Việc phân tích toàn diện các chỉ số trên không chỉ giúp đánh giá chất lượng sản phẩm cuối cùng, mà còn là căn cứ khoa học để lựa chọn mô hình tối ưu, nhằm giảm mài mòn, nâng cao độ bền mòn, kéo dài tuổi thọ vận hành của vít ép. Do đó việc phân tích và so sánh kết quả mô phỏng từng mô hình, từ đó làm cơ sở đánh giá để lựa chọn phương án phù hợp nhất với mục tiêu chống mài mòn cho vít ép.

Mô hình thứ nhất (mô hình 1), thứ 2 và thứ 3 được mô phỏng với các điều kiện đã phân tích. Các kết quả mô phỏng sẽ được đánh giá và phân tích sau khi quá trình mô phỏng kết thúc.

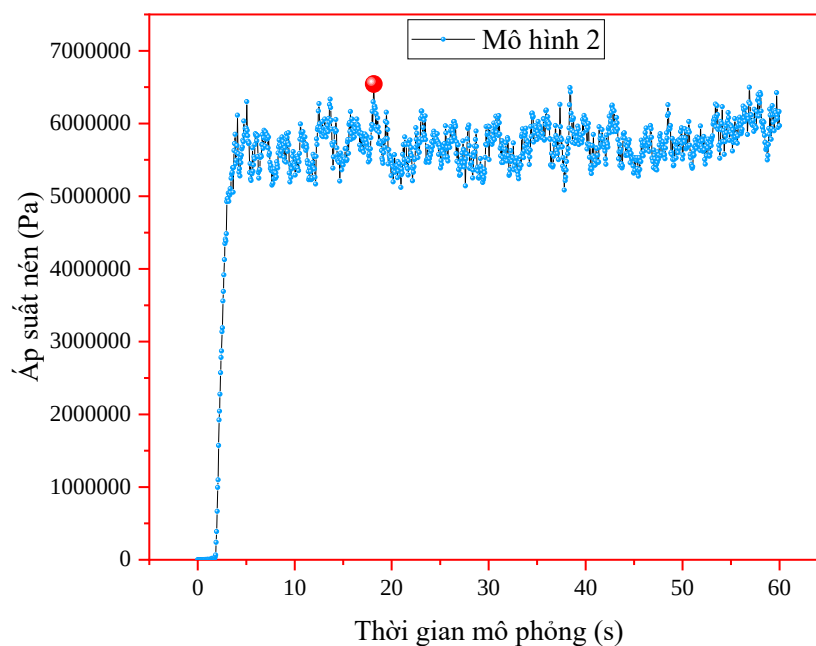
Các kết quả mô phỏng DEM được phân tích theo một chuỗi logic nhằm làm sáng tỏ cơ chế hình thành mài mòn trên bề mặt vít ép tải trọng cao và đánh giá hiệu quả của các phương án thiết kế hình học. Trước hết, mô phỏng xác định phân bố áp suất nén trong buồng ép, từ đó suy ra lực pháp tuyến tác dụng lên vít và lực nén lên từng hạt vật liệu rời rạc. Các thành phần lực này cùng với lực tiếp tuyến do ma sát sinh ra tổng lực tác dụng lên vít, quyết định mức độ tải trọng và là cơ sở để tính trường ứng suất tiếp xúc, ứng suất trượt trên bề mặt làm việc của vít. Đồng thời, chuyển động của dòng hạt DEM cho phép xác định vận tốc, năng lượng va chạm và trường nhiệt ma sát trong vùng nén – thoát liệu. Tất cả các đại lượng cơ – nhiệt – động học nói trên cuối cùng được tổng hợp trong mô hình mài mòn DEM, cho phép so sánh trực tiếp mức độ mòn giữa ba mô hình vít ép, nhận diện các vùng mòn nguy hiểm và chứng minh tính ưu việt về độ bền mòn của mô hình thiết kế tối ưu so với các phương án còn lại.

2.4.1. Phân tích kết quả áp suất nén 3 mô hình mô phỏng.

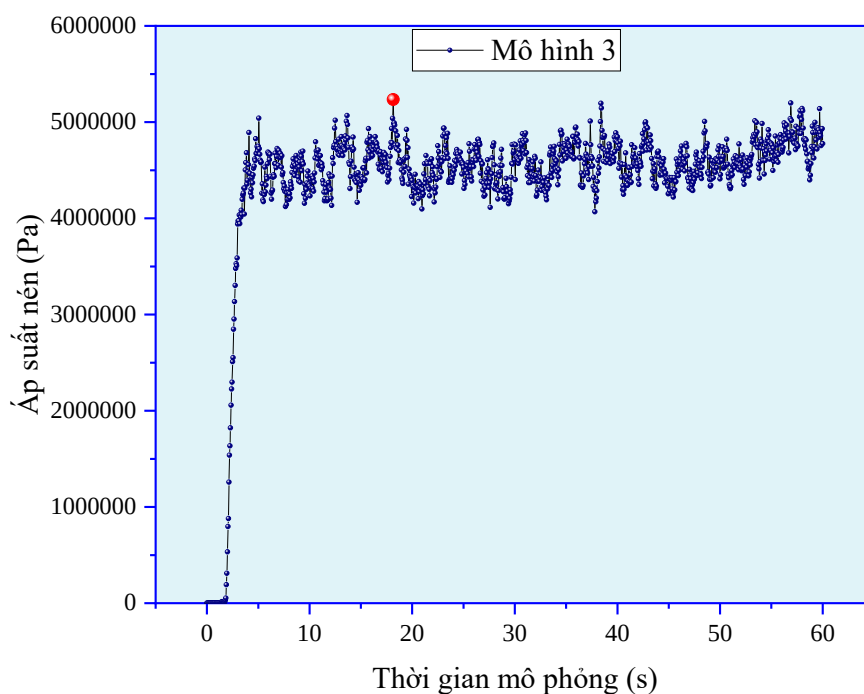
Áp suất nén là một trong những chỉ tiêu quan trọng và cơ bản nhất ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả làm việc của vít ép. Áp suất nén thể hiện áp lực tác dụng lên vật liệu theo phương pháp tuyến, khi áp suất nén cao làm tăng mật độ và khả năng kết dính cho sản phẩm nhưng sẽ làm bề mặt của vít phải chịu mài mòn nhiều hơn. Áp suất nén trong buồng ép của mô hình 1, thứ 2, thứ 3 được thể hiện như hình 2- 23, hình 2- 24, hình 2- 25.



Hình 2- 23. Đồ thị kết quả mô phỏng áp suất nén mô hình 1



Hình 2- 24. Đồ thị kết quả mô phỏng áp suất nén mô hình thứ 2

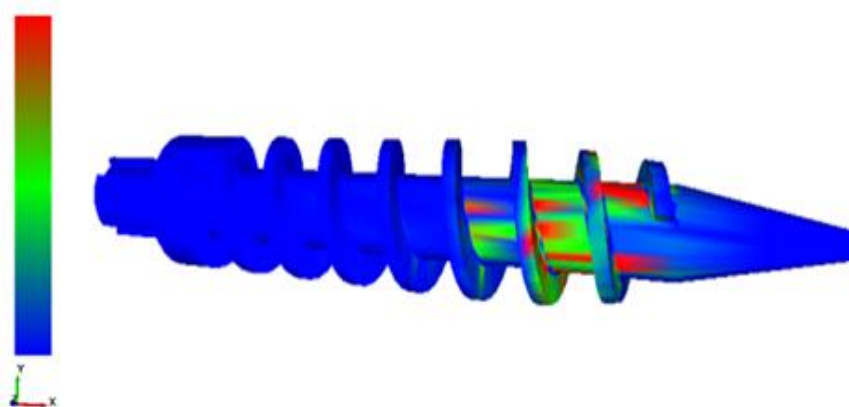


Hình 2- 25. Đồ thị kết quả mô phỏng áp suất nén mô hình thứ 3

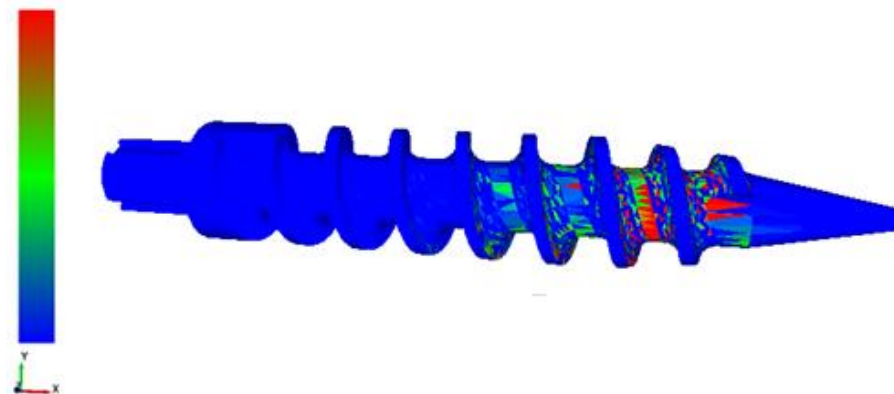
Có thể thấy áp suất trên mô hình 1 lớn nhất 6,6 Mpa, khoảng tăng rộng cho thấy áp suất không ổn định đến một thời điểm áp suất đủ lớn nên cần thời

gian để đạt áp suất cần thiết, điều này có thể dẫn đến dòng vật liệu rời rạc bị dồn ứ dẫn đến tắc nghẽn cục bộ và sinh nhiệt lớn. Áp suất nén trong buồng ép của mô hình thứ 2 nhỏ hơn mô hình 1 vào khoảng 6,2 Mpa giai đoạn nén ban đầu diễn ra rất nhanh, sau đó áp suất duy trì ổn định với dao động nhỏ. Điều này chứng tỏ quá trình ép vật liệu rời rạc đã đạt trạng thái nén chặt, các hạt được sắp xếp lại và giảm tối đa khoảng rỗng. Tuy nhiên điều này kéo theo vít ép bị tăng mài mòn nhất là các vị trí chịu lực nén lớn. Trong khi đó áp suất nén trong buồng ép mô hình thứ 3 mô tả giai đoạn nén ban đầu diễn ra rất nhanh, sau đó áp suất duy trì ổn định với dao động nhỏ, áp suất tối đa trong vùng ép đã giảm đáng kể so với mô hình 2 chỉ ở khoảng 5,2 Mpa.

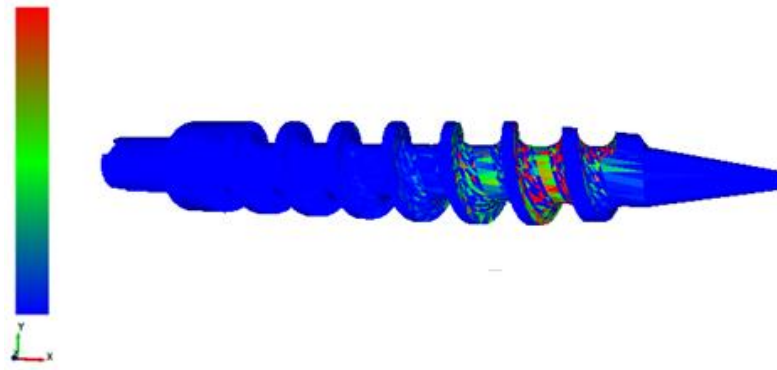
Các vị trí tập trung áp suất nén của ba mô hình được thể hiện như hình 2- 26, hình 2- 27, hình 2- 28.



Hình 2- 26. Áp suất trong buồng ép của mô hình vít ép thứ 1



Hình 2- 27. Áp suất trong buồng ép của mô hình vít ép thứ 2

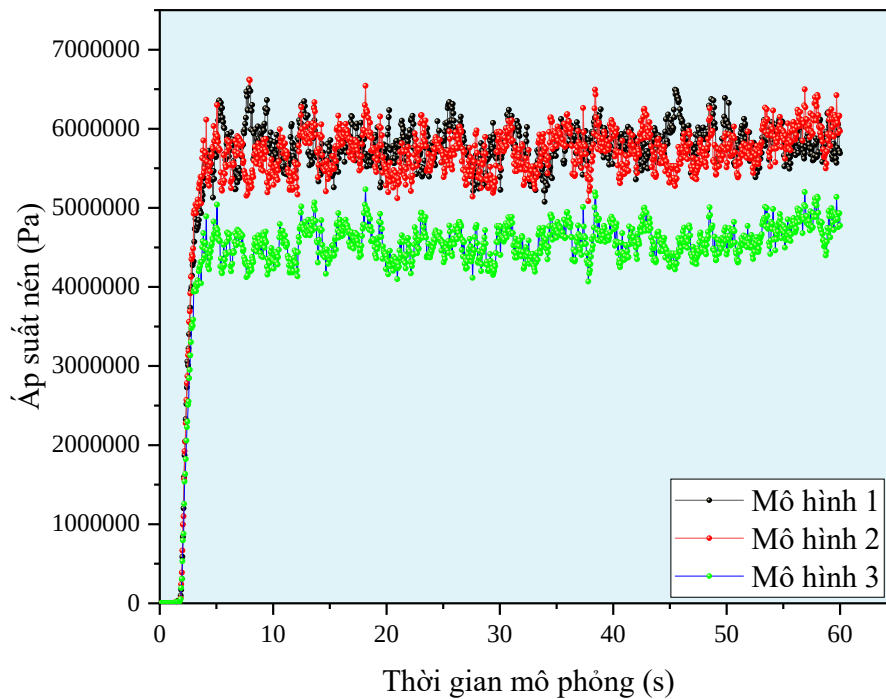


Hình 2- 28. Áp suất trong buồng ép của mô hình vít ép thứ 3

Qua kết quả hình ảnh cho thấy áp suất và lực ép trong buồng ép tăng dần khi dòng vật liệu đi vào từ phần vít dẫn sang phần vít ép và tăng mạnh nhất ở phần cánh vít ép thứ 2 và cánh vít ép thứ 1, sau đó giảm dần ở phần cửa khuôn. Điều đó cho thấy áp lực tập trung chủ yếu vào phần cánh vít ép thứ nhất và thứ 2 của vít ép. Ở mô hình thứ 1 áp suất tập trung cục bộ và phân bố không đều trên vít, ở mô hình thứ 2 áp suất đã phân bố rộng và đều hơn. Trong khi đó ở hình thứ 3 áp suất giảm so với mô hình vít ép thứ nhất và thứ 2 vùng phân bố đều hơn trên toàn bộ vùng ép của vít. Trên cơ sở kết quả mô phỏng chi tiết đã trình bày, việc phân tích đối chiếu chi tiết này không chỉ giúp đánh giá hiệu quả làm việc tổng thể của từng mô hình mà còn cung cấp cơ sở khoa học quan trọng để lựa chọn vít tối ưu, từ đó định hướng cải tiến thiết kế, nâng cao tuổi thọ thiết bị và chất lượng sản phẩm đầu ra. Giá trị tổng áp suất của 3 mô hình sau 60 giờ mô phỏng thể hiện như bảng 2- 6.

Bảng 2- 6. Tổng áp suất nén của 3 mô hình vít ép

Thời gian mô phỏng (s)	11,5 s	23,65 s	35,75 s	47,9 s	60 s
Áp suất nén mô hình 1 (Pa)	5598182,8	5903942,4	5719518,7	6008124,2	5690139,5
Áp suất nén mô hình 2 (Pa)	5254133,6	5506963,7	5365159,3	5677044,2	5969164,9
Áp suất nén mô hình 3 (Pa)	4203306,9	4405571	4292127,4	4541635,4	4775331,9



Hình 2- 29. Đồ thị áp suất 3 mô hình

Qua đồ thị hình 2-29 trên, có thể thấy rằng mô hình 1 và mô hình 2 đều đạt tổng áp suất cao, đảm bảo khả năng ép chặt và tạo hình viên nén với mật độ tốt. Mô hình 1 cần thời gian đạt áp suất ở mức cao, và cho áp suất lớn nhất nhưng đồng thời làm tăng đáng kể mức độ mài mòn vít ép và chi phí bảo trì. Trong khi đó, mô hình 2 thể hiện xu hướng tăng áp suất liên tục theo chiều dài trục vít, điều này thuận lợi khi muốn gia tăng lực ép dần, giúp kiểm soát quá trình nén từng bước và cải thiện sự đồng đều của viên nén. Tuy nhiên, áp suất tăng cao ở đoạn cuối cũng tiềm ẩn nguy cơ mài mòn cục bộ mạnh hơn. Đặc biệt, Mô hình 3 duy trì mức áp suất thấp và ổn định suốt chiều dài trục vít. Đây là ưu điểm nổi bật khi mục tiêu chính là giảm áp lực tác động và giảm mòn cho vít ép.

Các giá trị định lượng thể hiện trên hình cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các phương án thiết kế vít ép. Phương án cải tiến có xu hướng giảm giá trị áp suất và mài mòn cực đại, đồng thời phân bố đều hơn vùng chịu tải dọc theo chiều dài

vít. Kết quả này cho phép đánh giá định lượng hiệu quả của giải pháp thiết kế được đề xuất.

Kết quả mô phỏng cho thấy việc cải tiến hình học vít ép giúp phân bố lại tải tiếp xúc dọc theo chiều dài vít, làm giảm ứng suất cực đại tại các vùng nguy hiểm. Xu hướng này phù hợp với nguyên lý cơ học tiếp xúc và là cơ sở khoa học cho việc giảm mài mòn cục bộ, góp phần nâng cao độ bền mòn và tuổi thọ làm việc của vít ép tải trọng cao.

2.4.2. Phân tích kết quả lực tác dụng lên ba mô hình vít ép

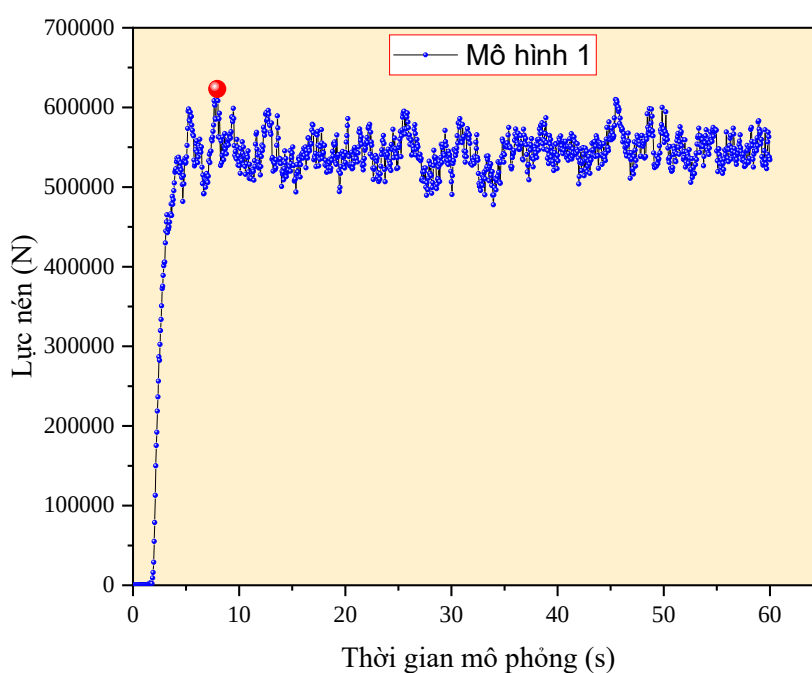
Dựa trên mô hình DEM đã xây dựng và các điều kiện biên được xác lập phù hợp với thông số vận hành thực tế của vít ép, bước tiếp theo của nghiên cứu là phân tích các kết quả mô phỏng nhằm làm rõ cơ chế tương tác giữa vít và hệ hạt rời rạc trong buồng ép. Trong số các đại lượng thu được từ mô phỏng, lực nén, lực pháp tuyến, lực tiếp tuyến và tổng lực tác dụng lên vít là những thông số quan trọng, vì chúng phản ánh trực tiếp mức độ chịu tải của vít, trạng thái chuyển động và nén chặt của vật liệu, cũng như khả năng hình thành viên nén tại cửa khuôn.

Việc phân tích các lực này không chỉ giúp đánh giá điều kiện làm việc thực tế của vít ép mà còn cung cấp cơ sở khoa học để lý giải sự phân bố ứng suất, cơ chế tạo ma sát, mức độ xáo trộn của dòng vật liệu và những vùng có nguy cơ mài mòn cao. Đây cũng chính là nền tảng để so sánh hiệu quả của các mô hình vít khác nhau và định hướng cho các nghiên cứu tối ưu hình học, thiết kế bề mặt hoặc áp dụng lớp phủ chống mòn trong các chương tiếp theo. Trên cơ sở đó, phần dưới đây trình bày chi tiết kết quả lực nén và tổng lực tác dụng lên vít trong suốt thời gian mô phỏng.

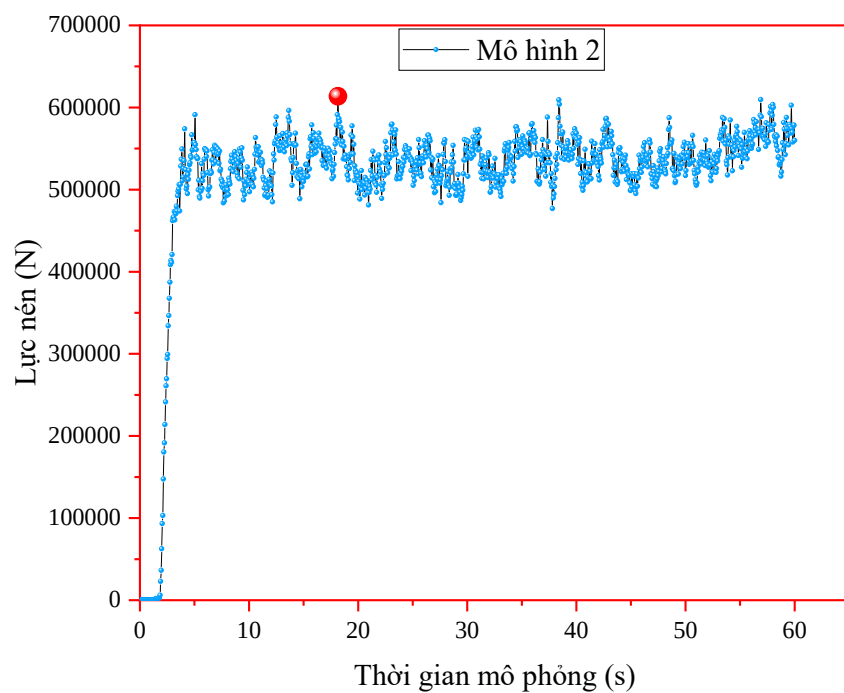
2.4.2.1. Phân tích kết quả lực nén.

Lực nén là một trong những chỉ tiêu cơ bản ảnh hưởng đến hiệu quả làm việc của vít ép. Trong phạm vi luận án, lực nén được hiểu là lực tổng hợp tác

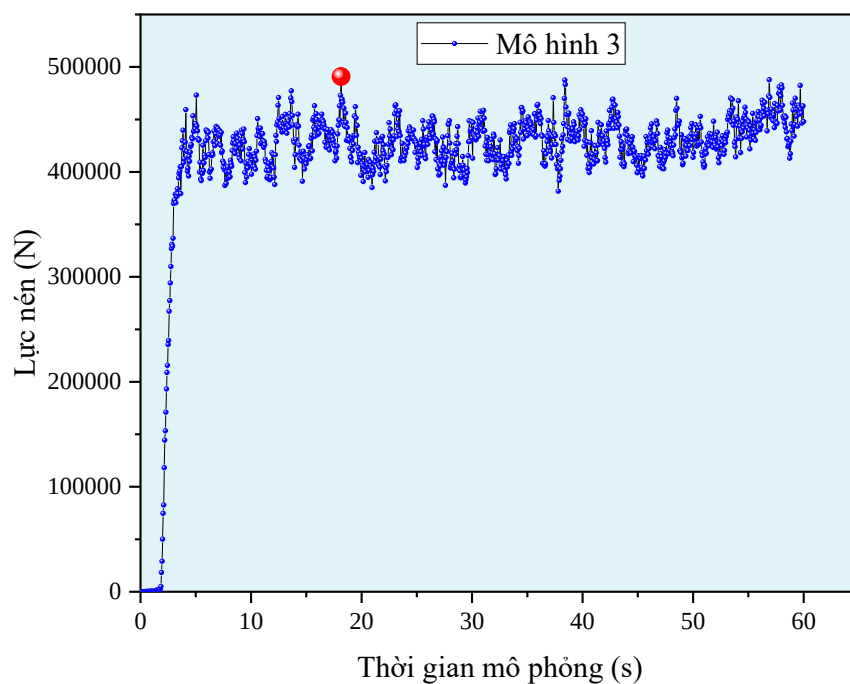
dụng lên khối vật liệu khi bị ép chặt trong buồng ép bởi vít quay, được đặc trưng bằng áp suất nén tại vùng cửa khuôn. Lực nén là đại lượng then chốt phản ánh điều kiện tạo viên, ảnh hưởng đến ứng suất làm việc của vít, mức độ mòn bề mặt và chất lượng sản phẩm nén. Khi lực nén lớn, sẽ làm tăng mật độ nén và khả năng tạo viên chắc chắn cho sản phẩm, đồng thời cải thiện độ ổn định hình học sau khi ép. Tuy nhiên, lực nén cao cũng dẫn đến tăng tải trọng tác dụng lên bề mặt vít, khiến vít dễ bị mài mòn, biến dạng hoặc hư hỏng nếu không được gia cố phù hợp. Tổng lực nén tác dụng trong buồng ép lớn nhất ở mô hình 1, mô hình thứ 2, mô hình thứ 3 lần lượt là 621895 N, 613637 N và 490909 N được thể hiện như hình 2-30, hình 2-31, hình 2-32.



Hình 2- 30. Đồ thị kết quả tổng lực nén mô hình thứ 1



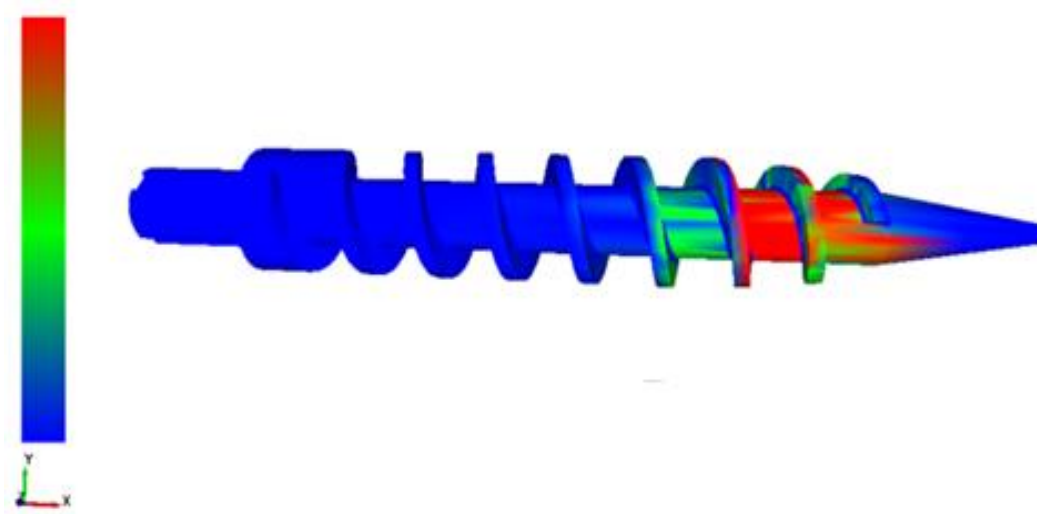
Hình 2- 31. Đồ thị kết quả tổng lực nén mô hình thứ 2



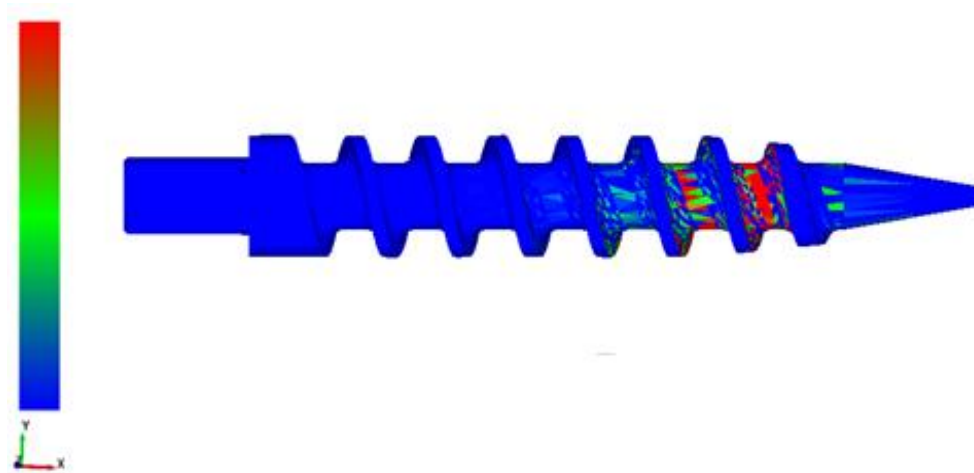
Hình 2- 32. Đồ thị kết quả tổng lực nén mô hình thứ 3

Các vị trí lực nén lớn được thể hiện như hình 2- 33, hình 2- 34, hình 2- 35.
Lực nén mà khối hạt rời tác động lên các bề mặt vít ép chủ yếu tập trung ở ba

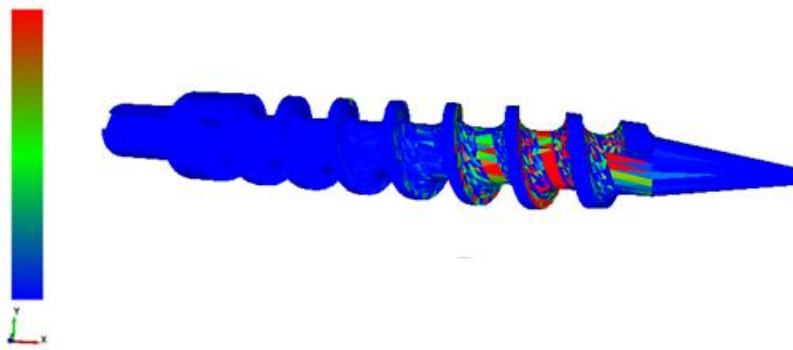
bước vít cuối của mô hình 1, đặc biệt lực nén bắt đầu tăng dần khi vào vùng ép và tăng mạnh ở bước vít thứ 2 như hình 2- 33. Ở mô hình 2 và mô hình 3 rõ ràng lực nén đã giảm và phân bố đều hơn trên vùng ép, ở hai mô hình này lực nén xuất hiện sớm hơn. Lực nén lớn cho thấy vật liệu đang nén mạnh vào vít ép khiến thiết bị phải chịu ứng suất cao có thể dẫn đến mài mòn nhanh hoặc hư hỏng sớm. Nếu giá trị nhỏ, tải trọng nhẹ hơn, vít ép an toàn hơn, ít biến dạng.



Hình 2- 33. Lực nén lên bề mặt vít của mô hình vít ép thứ 1



Hình 2- 34. Lực nén lên bề mặt vít của mô hình vít ép thứ 2

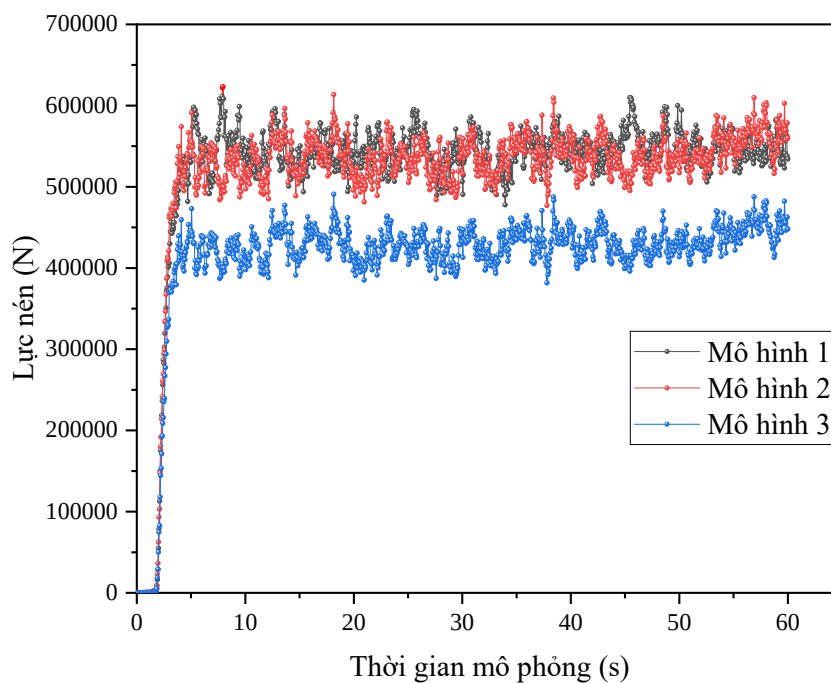


Hình 2- 35. Lực nén lên bề mặt vít của mô hình vít ép thứ 3

Kết quả tổng lực nén của 3 mô hình được thể hiện như bảng 2- 7.

Bảng 2- 7. Tổng lực nén của 3 mô hình vít ép

Thời gian mô phỏng (s)	11,5 s	23,65 s	35,75 s	47,9 s	60 s
Tổng lực nén vít ép mô hình 1 (N)	525944,3	554623,9	536943,4	564237,2	534137,8
Tổng lực nén vít ép mô hình 2 (N)	49431,54	516825,7	503420,2	532865,5	559978,8
Tổng lực nén vít ép mô hình 3 (N)	395452,3	413460,6	402736,2	426292,4	447983



Hình 2- 36. Đồ thị tổng lực nén 3 mô hình

Qua đồ thị hình 2- 36, có thể thấy rằng mô hình thứ 1 và mô hình thứ 2 duy trì lực nén trung bình ở mức cao giúp viên đạt được độ chắc cao và khả năng chịu va đập tốt. Đặc biệt, mô hình thứ 2 thể hiện xu hướng lực nén trung bình tăng dần theo chiều dài trục vít và đạt giá trị cao nhất ở cuối. Xu hướng này thuận lợi khi cần gia tăng khả năng nén ở giai đoạn cuối, đảm bảo viên được nén đồng đều và đạt mật độ tối đa ngay trước khi ra khỏi buồng ép. Tuy nhiên, điều này cũng đồng nghĩa với việc tải trọng và ứng suất lên vít ép ở đoạn cuối sẽ rất lớn khiến vít chịu mài mòn và biến dạng cục bộ. Mô hình thứ 1 giữ lực nén cao nhưng có sự dao động nhẹ, không tăng mạnh về cuối. Cách phân bố này giúp giảm phần nào nguy cơ tập trung ứng suất ở đầu ra, tuy nhiên vẫn duy trì tải trọng lớn tổng thể, dẫn đến mức độ mài mòn vít ép cao nếu làm việc lâu dài.

Trong khi đó, mô hình thứ 3 duy trì lực nén thấp và ổn định. Đây là đặc điểm thuận lợi để giảm lực tác động lên vít ép, hạn chế ma sát và mài mòn vít ép, đồng thời giúp kéo dài tuổi thọ thiết bị. Tuy nhiên, viên nén từ mô hình thứ 3 có thể kém chắc và mật độ thấp hơn hai mô hình còn lại.

Các giá trị định lượng thể hiện trên hình cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các phương án thiết kế vít ép. Phương án cải tiến có xu hướng giảm giá trị áp suất và mài mòn cực đại, đồng thời phân bố đều hơn vùng chịu tải dọc theo chiều dài vít. Kết quả này cho phép đánh giá định lượng hiệu quả của giải pháp thiết kế được đề xuất.

Kết quả mô phỏng cho thấy việc cải tiến hình học vít ép giúp phân bố lại tải tiếp xúc dọc theo chiều dài vít, làm giảm ứng suất cực đại tại các vùng nguy hiểm. Xu hướng này phù hợp với nguyên lý cơ học tiếp xúc và là cơ sở khoa học cho việc giảm mài mòn cục bộ, góp phần nâng cao độ bền mòn và tuổi thọ làm việc của vít ép tải trọng cao.

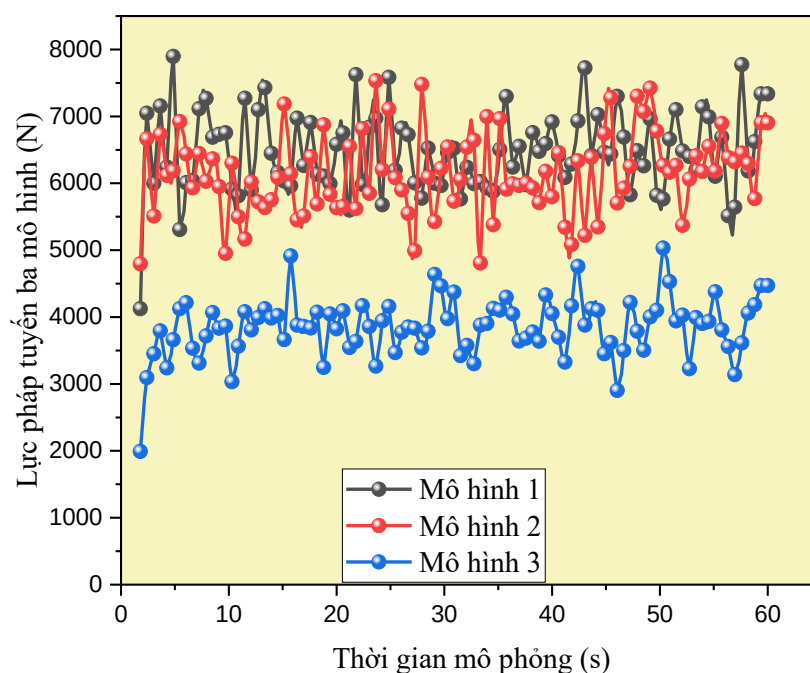
2.4.2.2. Phân tích các thành phần lực tác dụng lên vít ép.

Trong quá trình làm việc của vít ép tải trọng cao, vật liệu rời được vận chuyển dọc trục nhờ chuyển động quay của trục vít. Tại mỗi điểm tiếp xúc giữa vật liệu và bề mặt cánh vít, tồn tại hai thành phần lực chính là lực pháp tuyến và lực tiếp tuyến. Đây là hai đại lượng quyết định đến ứng suất làm việc của vít, mức độ tiêu hao năng lượng và tốc độ mài mòn trong suốt quá trình vận hành.

a) Lực pháp tuyến

Trong mô phỏng DEM, lực pháp tuyến (normal force) là thành phần lực xuất hiện tại bề mặt tiếp xúc giữa hạt vật liệu và bề mặt vít ép, hoặc giữa các hạt với nhau, có phương vuông góc với bề mặt tiếp xúc. Khi vít ép quay và vật liệu được vận chuyển dọc theo buồng ép, các hạt bị nén chặt vào bề mặt cánh vít; sự biến dạng đàn hồi – dẻo tại điểm tiếp xúc làm phát sinh lực pháp tuyến. Do đó, lực pháp tuyến trong DEM là đại lượng đại diện cho áp suất tiếp xúc tại từng vị trí tiếp xúc vi mô, khác với lực nén tổng thể của hệ thống.

Lực pháp tuyến có ý nghĩa đặc biệt quan trọng vì nó là nguyên nhân tạo ra áp suất nén lên bề mặt vít. Các kết quả mô phỏng trong luận án cho thấy lực pháp tuyến tập trung lớn nhất ở ba bước vít đầu tiên – vùng vật liệu bắt đầu nén mạnh – qua đó giải thích rõ cơ chế hình thành vùng mòn cục bộ quan sát trong thực nghiệm. Như vậy, lực pháp tuyến là đại lượng phản ánh mức độ tải trọng mà vít ép phải chịu tại từng điểm tiếp xúc, đồng thời là chỉ tiêu để đánh giá và tối ưu hóa thiết kế hình học vít ép nhằm giảm ứng suất tiếp xúc và nâng cao độ bền mòn cho vít ép.



Hình 2- 37. Đồ thị tổng lực pháp tuyến 3 mô hình

Đồ thị thể hiện sự biến thiên lực pháp tuyến theo thời gian mô phỏng đối với ba mô hình vít ép như hình 2- 37 cho thấy một số đặc điểm quan trọng về mức độ chịu tải và tính ổn định của lực trong quá trình làm việc. Ở Mô hình 1, giá trị lực pháp tuyến dao động quanh mức 6500–7500 N, thể hiện mức ép cao và phân bố lực không ổn định. Đây là mô hình có biên dạng vít ban đầu, nên lực pháp tuyến lớn phản ánh hiện tượng nén chặt mạnh và sự va đập hạt – bề mặt xảy ra thường xuyên, dẫn đến nguy cơ mài mòn cục bộ cao. Đối với Mô hình 2, mặc dù lực pháp tuyến vẫn duy trì ở mức cao nhưng đã có sự giảm nhẹ so với mô hình ban đầu, dao động trong khoảng 5500–6500 N. Sự giảm này cho thấy biên dạng điều chỉnh của Mô hình 2 đã góp phần cải thiện dòng chảy vật liệu, giảm mức độ nén ép cục bộ, từ đó làm giảm ứng suất tiếp xúc lên bề mặt vít. Tuy nhiên, lực vẫn biến thiên mạnh theo thời gian, chứng tỏ dòng vật liệu chưa hoàn toàn ổn định và khả năng mài mòn vẫn còn đáng kể. Mô hình 3 thể hiện sự giảm lực pháp tuyến rõ rệt nhất, với giá trị dao động ổn định hơn quanh 3500–4500 N. Đây là mức thấp nhất trong ba mô hình và cho thấy biên

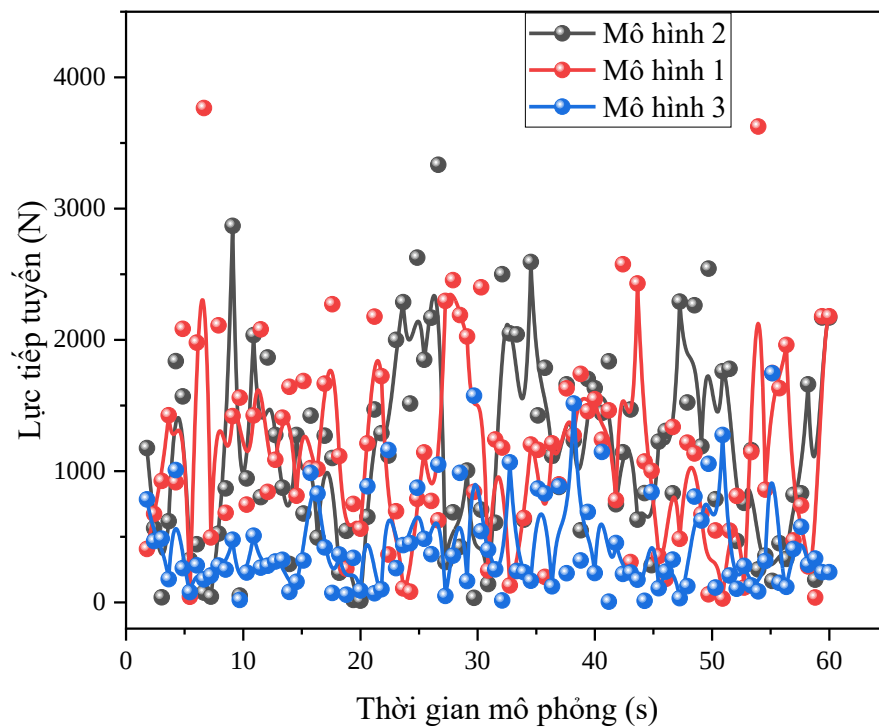
dạng vít tối ưu đã làm giảm đáng kể cường độ va đập và mức độ nén cục bộ lên bề mặt vít. Sự ổn định tương đối của đường lực theo thời gian chứng tỏ dòng vật liệu di chuyển tốt hơn, ít xảy ra tắc nghẽn cục bộ, từ đó hạn chế mài mòn dạng cào xước và va đập.

Tổng hợp lại, đồ thị chứng minh rằng Mô hình 3 là mô hình tối ưu nhất, với lực pháp tuyến trung bình giảm so với Mô hình 1 và Mô hình 2. Sự giảm này đồng nghĩa với việc áp suất tiếp xúc lên bề mặt vít giảm đáng kể, góp phần kéo dài tuổi thọ làm việc của vít và giảm mài mòn cục bộ. Kết quả đồ thị phù hợp hoàn toàn với xu hướng giảm mòn quan sát trong mô phỏng và thực nghiệm, chứng minh tính hợp lý của giải pháp tối ưu hóa biên dạng vít được đề xuất trong luận án.

b) Lực tiếp tuyến

Bên cạnh lực pháp tuyến, lực tiếp tuyến (tangential force) là một trong những thành phần lực quan trọng hình thành trong quá trình làm việc. Nếu lực pháp tuyến phản ánh mức độ nén ép cục bộ theo phương vuông góc với bề mặt, thì lực tiếp tuyến lại thể hiện mức độ ma sát và chuyển động trượt của vật liệu trên bề mặt vít theo phương song song với tiếp xúc. Chính lực này làm vít ép bị cào xước, trượt ma sát và là một trong những nguyên nhân gây ra mài mòn dạng trượt trên bề mặt. Do đó, phân tích lực tiếp tuyến trong mô phỏng DEM không chỉ giúp làm rõ cơ chế tương tác ma sát trong vùng làm việc mà còn cung cấp cơ sở để đánh giá khả năng chịu mài mòn của vật liệu bề mặt, từ đó định hướng thiết kế tối ưu biên dạng vít và lựa chọn vật liệu phủ nhằm nâng cao độ bền mòn cho vít ép tải trọng cao.

Kết quả lực tiếp tuyến tác dụng trên 3 mô hình được thể hiện như hình 2- 38.



Hình 2- 38. Đồ thị tổng lực tiếp tuyến 3 mô hình

Mô hình 1 có biên độ dao động lực tiếp tuyến lớn nhất, với nhiều đỉnh lực vượt quá 2000–3000 N, thậm chí có thời điểm gần 4000 N. Điều này phản ánh dòng vật liệu trong mô hình này xảy ra trượt mạnh và không ổn định do biên dạng vít chưa tối ưu, dẫn đến lực ma sát lớn và nguy cơ mài mòn dạng cào xước cao. Ở Mô hình 2, lực tiếp tuyến giảm hơn so với Mô hình 1 nhưng vẫn duy trì mức dao động khá cao trong khoảng 500–2500 N. Sự giảm lực này cho thấy biên dạng vít đã được cải thiện phần nào, làm cho chuyển động tương đối giữa hạt và bề mặt vít ổn định hơn. Tuy nhiên, các đỉnh lực cao vẫn xuất hiện thường xuyên, chứng tỏ ma sát trượt vẫn còn lớn và mài mòn vẫn diễn ra đáng kể. Mô hình 3 thể hiện mức lực tiếp tuyến thấp nhất và ổn định hơn, chủ yếu dao động trong khoảng 0–800 N, ít xuất hiện các đỉnh đột biến. Điều này cho thấy chuyển động của hạt trên bề mặt vít đã giảm hiện tượng trượt cục bộ và giảm ma sát. Lực tiếp tuyến nhỏ và ổn định phản ánh biên dạng vít tối ưu đã hạn chế đáng kể năng lượng tiêu hao vào ma sát, từ đó làm giảm tốc độ mài mòn bề mặt.

Lực tiếp tuyến giảm dần theo thứ tự Mô hình 1 → Mô hình 2 → Mô hình 3, hoàn toàn phù hợp với xu hướng giảm mài mòn của các mô hình trong phân tích DEM và thực nghiệm quét 3D. Sự giảm rõ rệt lực tiếp tuyến trong Mô hình 3 khẳng định hiệu quả của việc tối ưu biên dạng vít, giúp giảm ma sát trượt – một trong những cơ chế mài mòn quan trọng nhất đối với vít ép tải trọng cao.

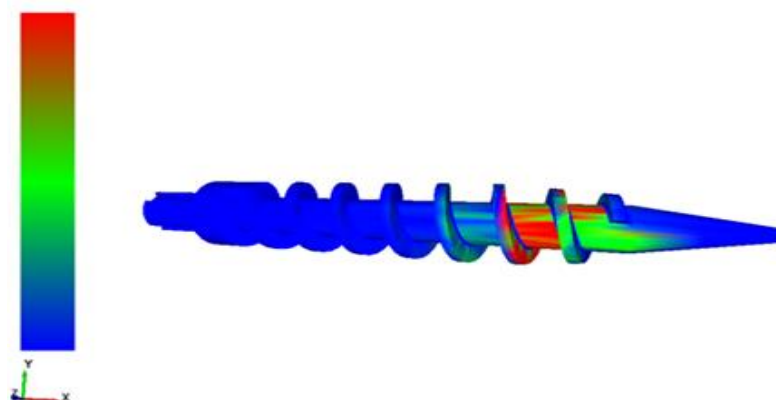
Xét tổng thể, sự khác biệt về biên độ và mức độ dao động lực tiếp tuyến phản ánh rõ rệt ảnh hưởng của hình học vít đến cơ chế ma sát: mô hình có bước xoắn hoặc biên dạng gây trượt mạnh sẽ phát sinh lực tiếp tuyến lớn, trong khi mô hình hướng dòng vật liệu đi ổn định hơn sẽ tạo ra lực ma sát thấp hơn. Đây là cơ sở quan trọng để đánh giá hiệu quả của từng thiết kế đối với khả năng chống mòn và lựa chọn mô hình phù hợp.

c) Tổng lực tác dụng lên vít ép

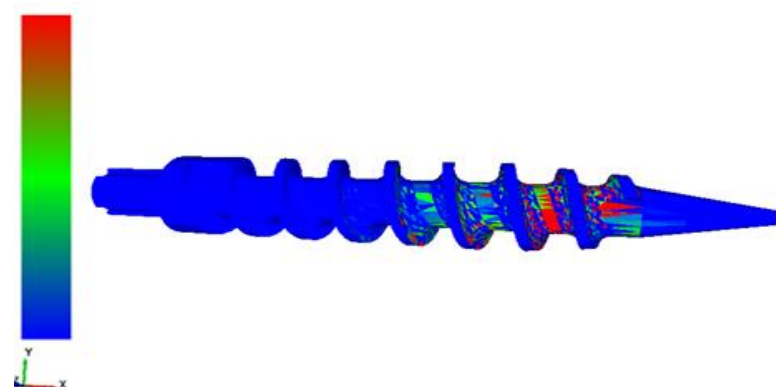
Từ kết quả phân tích lực pháp tuyến và lực tiếp tuyến có thể thấy, tổng lực tác dụng lên vít ép là đại lượng tổng hợp phản ánh đầy đủ nhất điều kiện chịu tải thực tế của vít trong quá trình làm việc. Về mặt cơ học, tại mỗi thời điểm mô phỏng, tổng lực là hợp lực của hai thành phần chính: lực pháp tuyến quyết định mức độ ép chặt và ứng suất tiếp xúc, còn lực tiếp tuyến đặc trưng cho ma sát trượt giữa vật liệu và bề mặt vít. Xét theo thời gian mô phỏng, tổng lực của các mô hình đều có giai đoạn quá độ ở những giây đầu, khi bu lông ép chưa được lắp đầy và mật độ vật liệu còn thay đổi nhanh; ở giai đoạn này, biên độ dao động của tổng lực lớn, xuất hiện các đỉnh cực trị do dòng hạt va đập và sắp xếp lại trong vùng nén. Sau khi hệ đạt trạng thái ổn định, tổng lực dao động quanh một giá trị trung bình đặc trưng cho từng mô hình vít ép. Mô hình nào có giá trị tổng lực trung bình lớn chứng tỏ vít phải làm việc trong điều kiện tải trọng cao, ứng suất tiếp xúc và ma sát đều lớn; ngược lại, mô hình có tổng lực trung bình nhỏ và biên độ dao động hẹp thể hiện sự phân bố lực hợp lý hơn, dòng vật liệu ổn định hơn. Tổng lực cao và dao động mạnh đồng nghĩa với việc ứng suất tác dụng lên vít thay đổi liên tục, làm tăng nguy cơ mỏi, nứt và mài

mòn cục bộ tại những vùng chịu tải trọng lớn (đặc biệt là 1/3 cuối chiều dài vít gần cửa khuôn). Ngược lại, các mô hình vít cho tổng lực nhỏ hơn và ổn định hơn sẽ giúp giảm tải cho trục vít, hạn chế tốc độ mài mòn và kéo dài tuổi thọ làm việc, đồng thời góp phần giảm tiêu hao năng lượng của hệ thống. Do đó, khi so sánh ba mô hình, mô hình có tổng lực thấp và dao động ít hơn sẽ là phương án thiết kế tối ưu trong luận án.

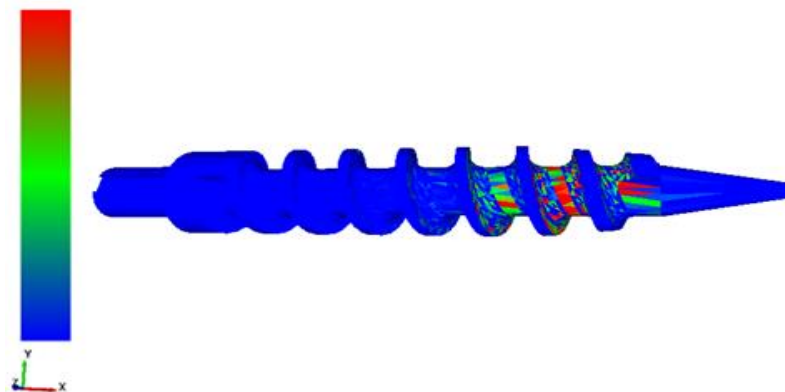
Tổng lực tác dụng lên vít ép bao gồm lực pháp tuyến, lực tiếp tuyến, lực ma sát các lực này tập trung chính ở vùng ép vật liệu rời rạc được thể hiện như hình 2- 39, hình 2- 40, hình 2- 41. Trong khi mô hình 1 tổng lực tập trung ở bước vít thứ 2, mô hình thứ 2 đã xuất hiện lực ở bước vít thứ 4, ở mô hình 3 bước vít thứ 4 xuất hiện lực nhỏ.



Hình 2- 39. Tổng lực tác dụng lên bề mặt vít của mô hình vít ép thứ nhất



Hình 2- 40. Tổng lực tác dụng lên bề mặt vít của mô hình vít ép thứ hai



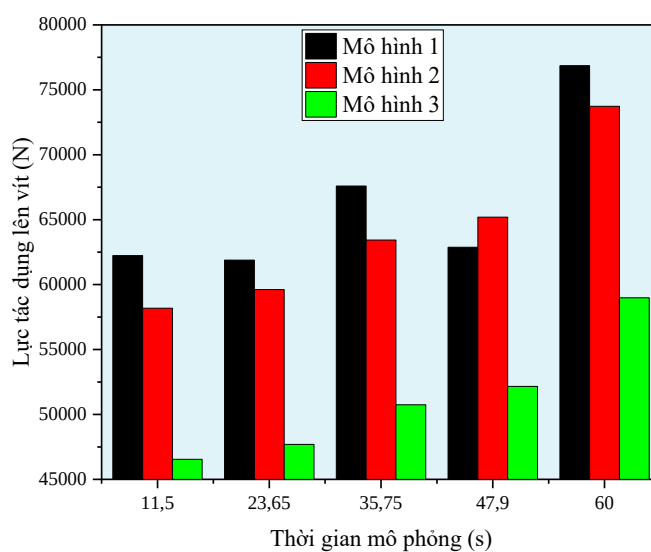
Hình 2- 41. Tổng lực tác dụng lên bề mặt vít của mô hình vít ép thứ ba

Kết quả tổng lực tác dụng lên vít ép của 3 mô hình được thể hiện như bảng 2-

8.

Bảng 2- 8. Tổng lực tác dụng lên vít của 3 mô hình vít ép

Thời gian mô phỏng (s)	11,5 s	23,65 s	35,75 s	47,9 s	60 s
Tổng lực tác dụng mô hình 1 (N)	62232,9	61882,1	67589,3	62872,2	76858,7
Tổng lực tác dụng mô hình 2 (N)	58186,8	59619,7	63428,9	65195,7	73730,02
Tổng lực tác dụng mô hình 3 (N)	46549,44	47695,76	50743,12	52156,56	58984,02



Hình 2- 42. Đồ thị tổng lực 3 mô hình

Qua đồ thị hình 2- 42, có thể thấy rằng tổng lực tác dụng lên vít ép ở mỗi vị trí dọc trục vít có sự khác biệt rõ rệt giữa ba mô hình. Mô hình thứ 1 cho thấy tổng lực luôn duy trì ở mức cao. Đặc biệt, lực tăng rõ rệt ở đoạn cuối đạt giá trị cao nhất. Điều này giúp đảm bảo viên nén được nén chặt, tăng mật độ và độ bền cơ học. Tuy nhiên, tổng lực lớn đồng nghĩa với tải trọng cơ học cao lên bề mặt vít, gây mài mòn vít ép nhanh chóng và tăng nguy cơ biến dạng cục bộ, nứt gãy bề mặt vít và buồng ép. Mô hình thứ 2 tổng lực có giảm so với mô hình thứ 1 nhưng vẫn tương đối cao, tăng dần từ đầu đến cuối. Xu hướng này cho phép quá trình nén được kiểm soát tuần tự, từng bước, giúp viên nén đạt chất lượng cao mà vẫn hạn chế phần nào hiện tượng lực tập trung đột ngột, có thể cải thiện được hiện tượng tắc nghẽn dòng vật liệu và mòn cục bộ nhưng kéo theo nguy cơ mài mòn mạnh ở vùng cuối trục vít. Tổng lực tập trung chính ở vùng ép vật liệu ở cả 3 mô hình vít ép.

Mô hình thứ 3 cho thấy tổng lực luôn thấp hơn hẳn so với hai mô hình còn lại. Đặc biệt, mô hình này không có xu hướng tăng mạnh về cuối mà duy trì tương đối ổn định. Đây là ưu điểm lớn khi mục tiêu chính là giảm tải trọng lên vít, hạn chế ma sát và mài mòn lên vít ép.

Các giá trị định lượng thể hiện trên hình cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các phương án thiết kế vít ép. Phương án cải tiến có xu hướng giảm giá trị áp suất và mài mòn cực đại, đồng thời phân bố đều hơn vùng chịu tải dọc theo chiều dài vít. Kết quả này cho phép đánh giá định lượng hiệu quả của giải pháp thiết kế được đề xuất.

Kết quả mô phỏng cho thấy việc cải tiến hình học vít ép giúp phân bố lại tải tiếp xúc dọc theo chiều dài vít, làm giảm ứng suất cực đại tại các vùng nguy hiểm. Xu hướng này phù hợp với nguyên lý cơ học tiếp xúc và là cơ sở khoa

học cho việc giảm mài mòn cục bộ, góp phần nâng cao độ bền mòn và tuổi thọ làm việc của vít ép tải trọng cao.

2.4.3. Phân tích kết quả các đại lượng tác động lên hạt.

Từ các phân tích về áp suất nén, lực pháp tuyến, lực tiếp tuyến và tổng lực tác dụng lên vít ép có thể thấy rằng cơ chế tải trọng trong buồng ép không chỉ ảnh hưởng đến điều kiện làm việc của vít mà còn chi phối mạnh mẽ quá trình tạo viên nén. Các lực này tác động đồng thời lên từng hạt và tạo nên những biến đổi đặc trưng về ứng suất, nhiệt độ và động năng trong vùng nén. Ứng xử của dòng vật liệu trong mô phỏng DEM chịu ảnh hưởng trực tiếp của phân bố lực theo chiều dài vít, và chính sự phân bố lực này quyết định mức độ nén chặt, ma sát, biến dạng và truyền năng lượng bên trong khối vật liệu.

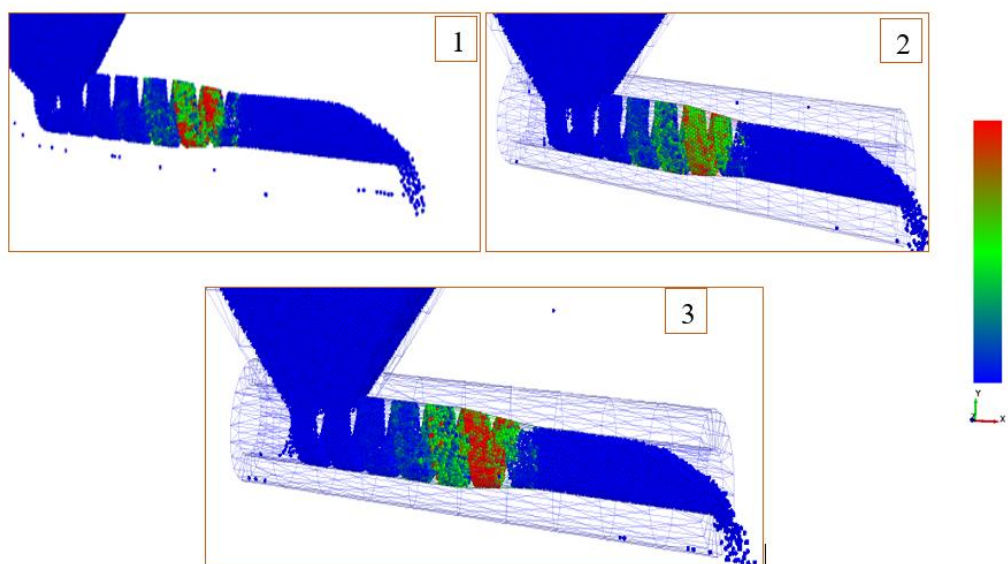
Ở những vùng mà lực pháp tuyến và tổng lực đạt giá trị cao – đặc biệt tại đoạn cuối của vít và vùng cận cửa khuôn – các hạt phải chịu nén mạnh theo cả phương vuông góc và dọc trục, dẫn đến sự gia tăng đáng kể của ứng suất dọc trục và lực nén cục bộ lên từng hạt. Đồng thời, sự dao động liên tục của lực tiếp tuyến gây ra ma sát trượt giữa hạt – hạt và hạt – bề mặt vít, làm phát sinh nhiệt cục bộ và làm thay đổi động năng của hệ hạt trong quá trình dịch chuyển.

Do đó, để lý giải đầy đủ cơ chế hình thành viên nén và đánh giá tác động của hình học vít ép lên chất lượng sản phẩm, luận án tiếp tục phân tích các tham số vi mô của hạt, bao gồm ứng suất dọc trục của hạt, lực nén tác dụng lên hạt, phân bố nhiệt và động năng của hệ hạt. Những kết quả này giúp làm rõ hơn mối quan hệ giữa tải trọng tác dụng đã phân tích với trạng thái làm việc của vật liệu rời.

2.4.3.1. Phân tích kết quả ứng suất dọc trục.

Khi vật liệu rời rạc (trong mô hình mô phỏng nghiên cứu sau đây gọi chung là hạt) bị nén trong buồng ép hoặc vít ép, nó nhận lực dọc trục từ các hạt khác hoặc từ vít ép. Ứng suất phát sinh bên trong từng hạt, theo phương dọc trục do lực nén hoặc lực tác động dọc trục truyền qua hạt. Lực này chia đều trên

diện tích mặt cắt ngang của hạt. Ứng suất này lớn có thể làm các hạt bị nén chặt hơn, ít khoảng rỗng và tăng mật độ tuy nhiên khi vượt quá giới hạn có thể tạo ra hạt mịn. Trên hình 2- 43 ứng suất tập trung vào vùng ép vật liệu rời rạc tập trung ở cánh thứ 2 và cánh vít thứ 3 ở cả ba mô hình.

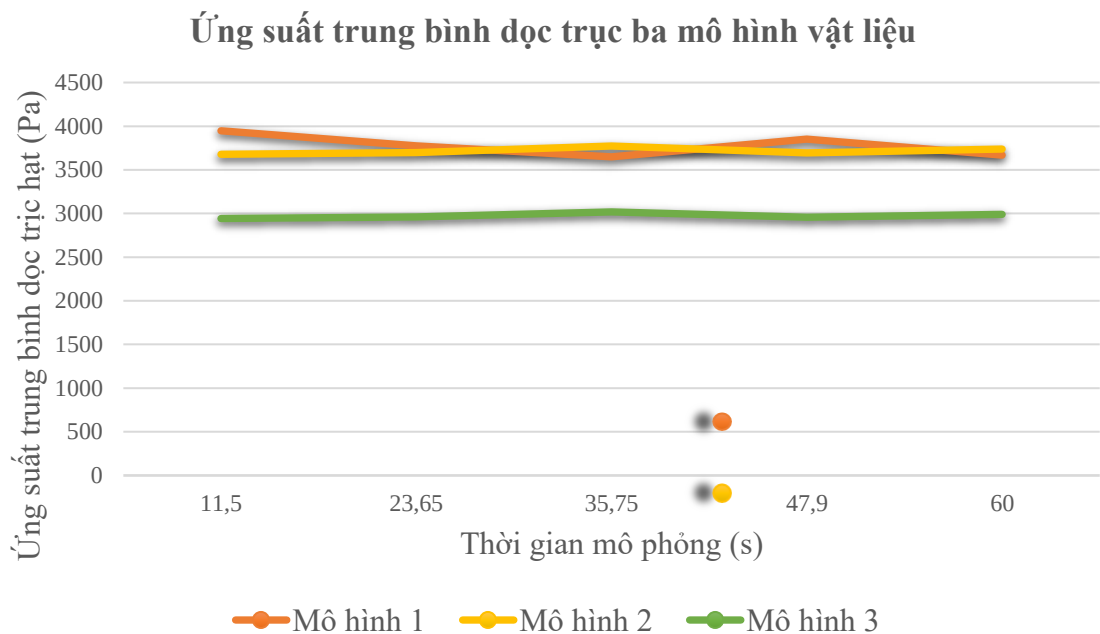


Hình 2- 43. Ứng suất dọc trục của hạt trên mô hình thứ 1, 2, 3

Ứng suất dọc trục trung bình của hạt vật liệu được thể hiện như bảng 2- 9.

Bảng 2- 9. Ứng suất dọc trục trung bình của hạt trên 3 mô hình vít ép

Thời gian mô phỏng (s)	11,5 s	23,65 s	35,75 s	47,9 s	60 s
Ứng suất dọc trục trung bình mô hình 1 (Pa)	3947,31	3773,59	3648,89	3851,21	3669,32
Ứng suất dọc trục trung bình mô hình 2 (Pa)	3678,09	3699,29	3772,81	3695,76	3738,13
Ứng suất dọc trục trung bình mô hình 3 (Pa)	2942,47	2959,43	3018,25	2956,61	2990,50



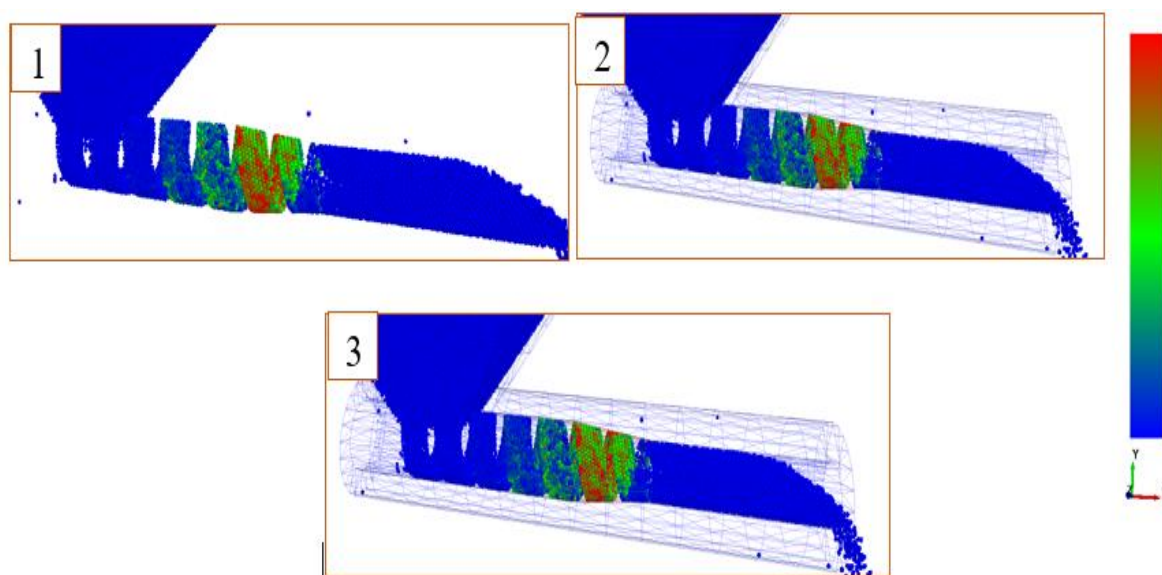
Hình 2- 44. Đồ thị ứng suất dọc trục 3 mô hình

Qua đồ thị hình 2- 44, có thể nhận thấy rõ sự khác biệt giữa ba mô hình. Mô hình thứ 1 ứng suất dọc trục duy trì ở mức cao. Mức ứng suất cao này giúp nâng cao khả năng nén dọc trục, tăng lực kết dính giữa các hạt vật liệu, tạo viên nén chắc và bền. Tuy nhiên, ứng suất lớn sẽ làm vít ép mài mòn nhanh. Mô hình thứ 2 ứng suất dọc trục thấp hơn mô hình thứ nhất. Mô hình này có sự ổn định và biến thiên nhẹ hơn so với mô hình thứ 1. Mô hình thứ 3 ứng suất dọc trục thấp nhất và ổn định. Mức ứng suất thấp đồng nghĩa với việc giảm đáng kể tải trọng dọc trục lên vít ép, hạn chế biến dạng tới vít ép. Đây chính là lợi thế giúp kéo dài tuổi thọ cho các chi tiết cơ khí đặc biệt là vít ép.

2.4.3.2. Phân tích kết quả lực nén tác dụng lên vật liệu rời rạc.

Lực nén (compressive force) mà mỗi hạt phải chịu do các tiếp xúc với hạt khác hoặc với bề mặt vít ép. Các lực này tác động lên hạt theo nhiều phương, nhưng thành phần chính là vuông góc với bề mặt tiếp xúc, tạo nên lực nén và gây ra hiện tượng cào xước bề mặt vít ép khi dòng vật liệu rời rạc di chuyển

dọc trục. Các hạt bắt đầu bị nén từ bước vít thứ 4 của vít ép dần tăng lên và bị ép lớn nhất ở cuối bước vít thứ 2 ở cả ba mô hình như hình 2- 45.



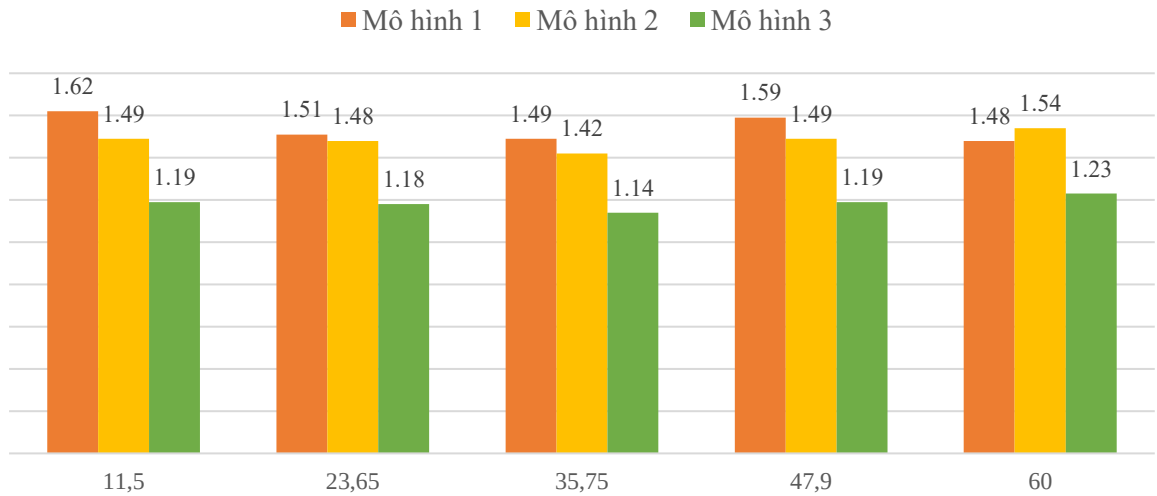
Hình 2- 45. Lực nén trung bình tác dụng lên hạt của mô hình vít thứ 1, 2, 3

Lực nén trung bình của hạt vật liệu được thể hiện như bảng 2- 10.

Bảng 2- 10. Lực nén trung bình tác dụng lên hạt của 3 mô hình vít ép

Thời gian mô phỏng (s)	11,5 s	23,65 s	35,75 s	47,9 s	60 s
Lực nén trung bình mô hình 1 (N)	1,62	1,51	1,49	1,59	1,48
Lực nén trung bình mô hình 2 (N)	1,49	1,48	1,42	1,49	1,54
Lực nén trung bình mô hình 3 (N)	1,19	1,18	1,14	1,19	1,23

LỰC NÉN TRUNG BÌNH LÊN HẠT 3 MÔ HÌNH VÍT ÉP

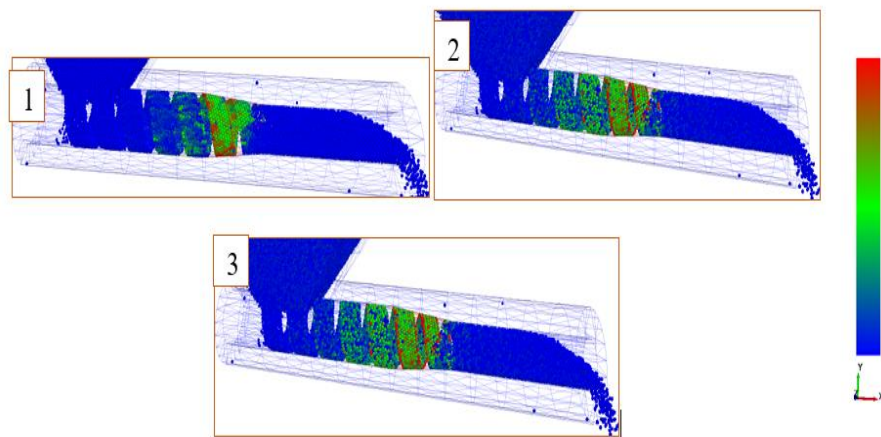


Hình 2- 46. Đồ thị Lực nén trung bình tác dụng lên vật liệu 3 mô hình

Qua biểu đồ hình 2- 46 trên, nhận thấy mô hình 1 cho biết lực nén trung bình tác dụng lên hạt luôn cao nhất. Lực trung bình lớn sẽ cho tổng lực nén tác dụng lên hạt lớn. Tuy nhiên, lực nén trung bình lớn đồng nghĩa với tải trọng tác động lên vít ép lớn, dẫn đến tăng ma sát và mài mòn bề mặt vít ép, buồng ép. Mô hình thứ 2 lực nén trung bình chỉ thấp hơn mô hình 1. Điều này cho thấy Mô hình 2 vẫn đảm bảo khả năng nén chặt tương đối tốt, giúp viên có độ chắc cao. Mô hình thứ 3 lực nén trung bình thấp hơn hẳn, duy trì ổn định. Phù hợp khi mục tiêu là giảm tải trọng tác động lên bề mặt vít ép, từ đó giảm mài mòn, kéo dài tuổi thọ vít và buồng ép, cũng như giảm tần suất bảo trì.

2.4.3.4. Phân tích kết quả nhiệt.

Thông lượng nhiệt trung bình là giá trị trung bình của dòng nhiệt (heat flux) đi qua bề mặt của từng hạt, tính trung bình trên tất cả các hạt trong hệ. Khi giá trị thông nhiệt lớn nghĩa là hệ hạt đang trao đổi nhiệt mạnh. Ngược lại khi giá trị này nhỏ dẫn đến nguy cơ nóng cục bộ hoặc làm nguội không đều. Thông lượng nhiệt trung bình tác dụng lên hạt của 3 mô hình vít ép được thể hiện như hình 2- 47. Ở cả ba mô hình thông lượng nhiệt tập trung ở vùng ép vật liệu.



Hình 2- 47. Thông lượng nhiệt trung bình tác dụng lên hạt của 3 mô hình thứ 1, 2, 3

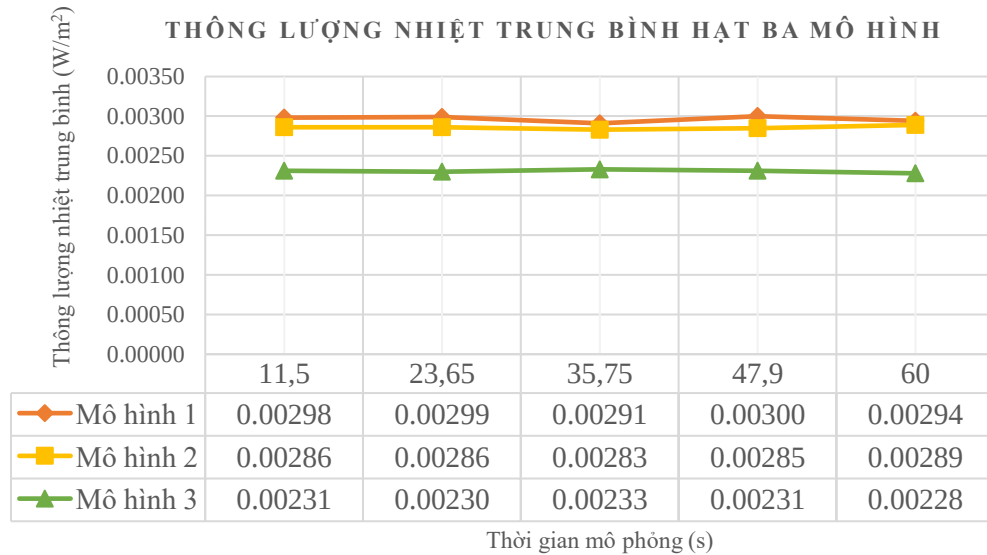
Thông lượng nhiệt trung bình tác dụng lên hạt của 3 mô hình vít ép được thể hiện như bảng 2- 11.

Bảng 2- 11. Thông lượng nhiệt trung bình tác dụng lên hạt của 3 mô hình vít ép

Thời gian mô phỏng (s)	11,5 s	23,65 s	35,75 s	47,9 s	60 s
Thông lượng nhiệt trung bình mô hình 1 (W/m^2)	0,00298	0,00299	0,00291	0,003	0,00294
Thông lượng nhiệt trung bình mô hình 2 (W/m^2)	0,00286	0,00286	0,00283	0,00285	0,00289
Thông lượng nhiệt trung bình mô hình 3 (W/m^2)	0,00231	0,00230	0,00233	0,00231	0,00228

Qua đồ thị như hình 2- 48, ta có thể nhận thấy mô hình thứ 1 thông lượng nhiệt trung bình duy trì ở mức cao nhất. Mức thông lượng nhiệt này cho thấy lượng nhiệt sinh ra và truyền qua vật liệu lớn nhất, giúp hỗ trợ quá trình nén chặt và gia tăng liên kết hạt, từ đó cải thiện độ chắc của viên nén. Tuy nhiên, nhiệt cao cũng khiến vít ép chịu ảnh hưởng nhiệt lớn hơn, dễ dẫn đến biến dạng nhiệt, tạo vết nứt và tăng tốc độ mài mòn. Mô hình thứ 2 thông lượng nhiệt thấp hơn mô hình 1, mô hình này cho mức nhiệt thấp hơn phần nào giúp giảm rủi ro

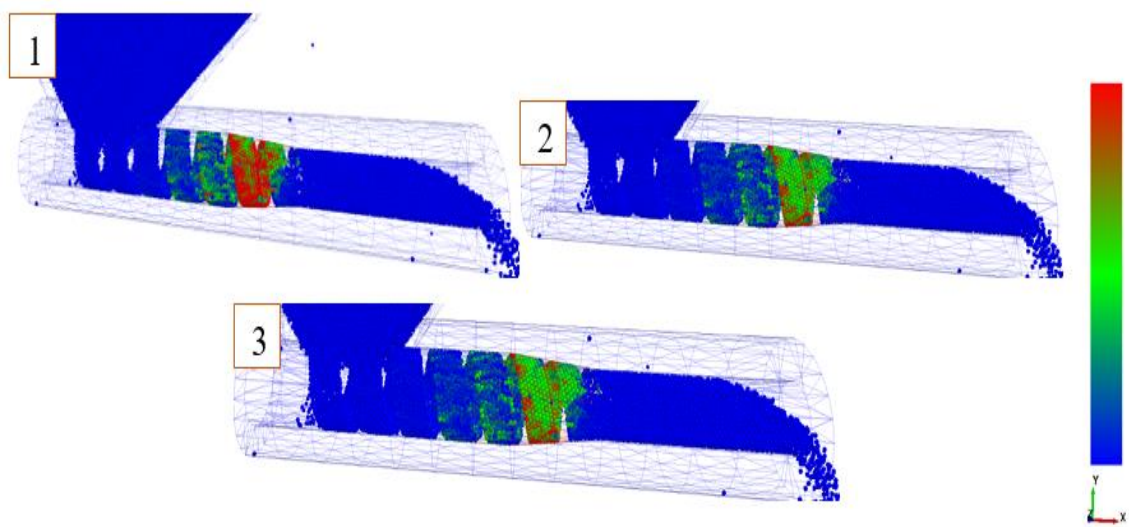
biến dạng vít ép do nhiệt. Mô hình thứ 3 có mức thông lượng nhiệt thấp nhất, ổn định do đó giảm tác động nhiệt lên vít ép, giúp giảm biến dạng nhiệt và kéo dài tuổi thọ vít ép. Tuy nhiên, mức nhiệt thấp có thể làm giảm khả năng dính kết giữa các hạt.



Hình 2- 48. Đồ thị Thông lượng nhiệt trung bình 3 mô hình

2.4.3.5. Phân tích kết quả Tensor ứng suất.

Tensor ứng suất trung bình trên hạt là ma trận mô tả trạng thái ứng suất trung bình bên trong từng hạt, tính trung bình trên tất cả các hạt trong hệ cho biết trạng thái ứng suất tổng thể bên trong hệ. Trên hình 2- 49 cho thấy tensor ứng suất lớn nhất ở ba mô hình tập trung bước vít thứ nhất và thứ 2 của vít ép trong vùng ép vật liệu. Tại vùng này vật liệu bị nén chặt lại.

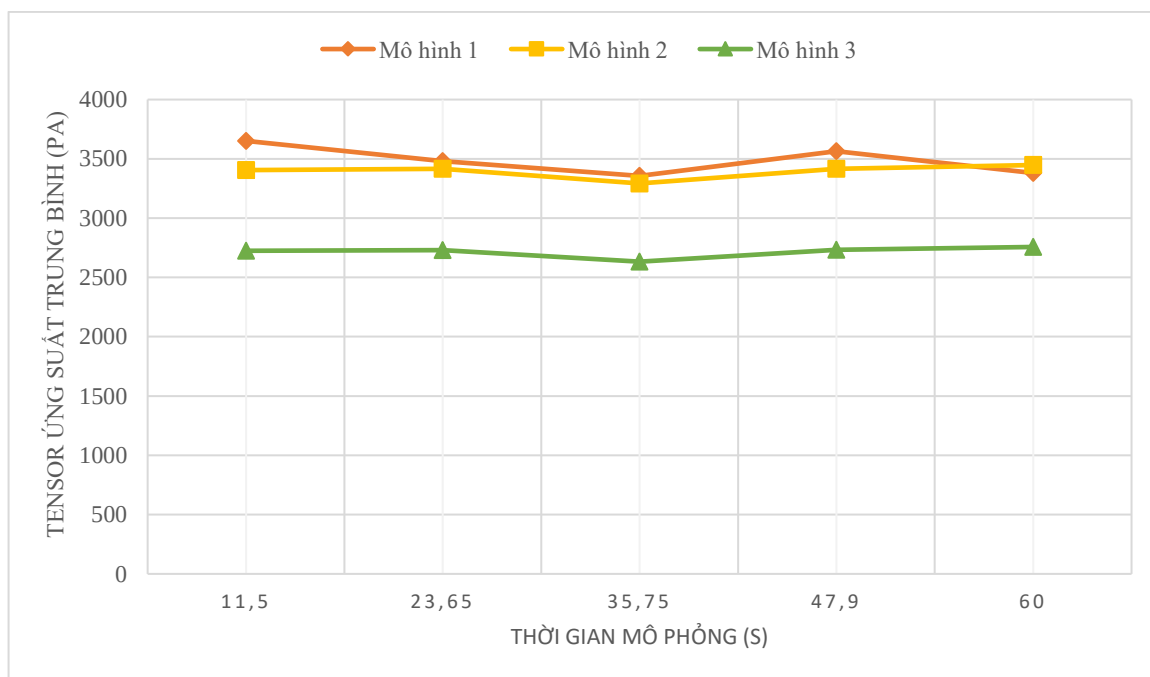


Hình 2- 49. Tensor ứng suất tác dụng lên hạt của ba mô hình

Bảng 2- 12 cho biết Tensor ứng suất trung bình tác dụng lên hạt của 3 mô hình vít ép.

Bảng 2- 12. Tensor ứng suất trung bình tác dụng lên hạt của 3 mô hình vít ép

Thời gian mô phỏng (s)	11,5 s	23,65 s	35,75 s	47,9 s	60 s
Tensor ứng suất trung bình mô hình 1 (Pa)	3651,52	3480,13	3356,27	3563,97	3381,07
Tensor ứng suất trung bình mô hình 2 (Pa)	3406,19	3414,99	3292,53	3416,72	3447,91
Tensor ứng suất trung bình mô hình 3 (Pa)	2724,59	2731,96	2633,03	2732,97	2757,39

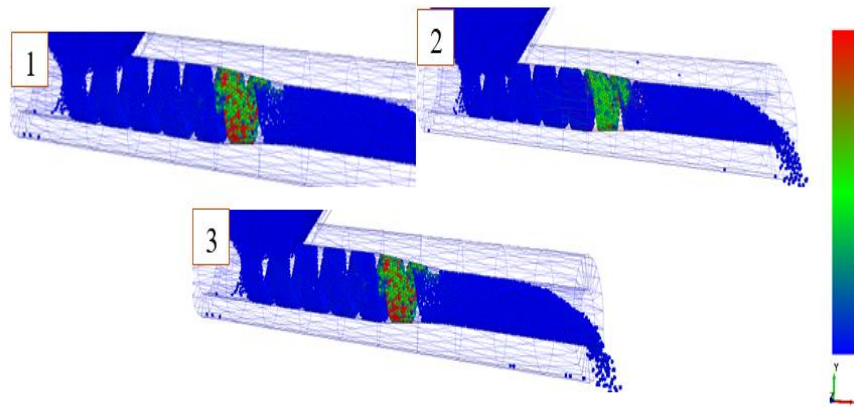


Hình 2- 50. Đồ thị Tensor ứng suất 3 mô hình

Sự biến thiên của tensor ứng suất hình 2- 50 giữa ba mô hình dọc theo chiều dài trục vít. Mô hình thứ 1 tensor ứng suất luôn giữ ở mức cao. Điều này phản ánh nội lực tổng hợp trong khối vật liệu và vít ép lớn, góp phần nâng cao khả năng nén chặt và tăng mật độ viên nén. Tuy nhiên, tensor ứng suất cao làm vít ép phải chịu nội lực phức tạp, dẫn đến nguy cơ mài mòn, biến dạng và nứt gãy ở nhiều. Mô hình thứ 2 tensor ứng suất thấp hơn mô hình thứ 1. Sự biến thiên nhỏ và ổn định hơn so với mô hình 1, việc này giúp duy trì khả năng nén đủ chắc cho viên nén, đồng thời phần nào giảm tải tác động phức tạp lên vít ép. Tuy nhiên, mức tensor vẫn cao nên vẫn có rủi ro mài mòn đáng kể. Mô hình thứ 3 tensor ứng suất thấp nhất. Giá trị này cho thấy nội lực tổng hợp thấp, giúp vít ép ít bị biến dạng, giảm nguy cơ nứt vỡ và mài mòn theo thời gian. Đây chính là ưu điểm nổi bật nếu ưu tiên bảo vệ vít ép, tăng độ bền và kéo dài thời gian vận hành liên tục mà không cần dừng máy bảo trì thường xuyên. Tuy nhiên, điều đó cũng khiến viên nén có thể kém chắc và dễ rời rạc hơn nếu không có biện pháp hỗ trợ khác, giải pháp có thể là thêm phương án gia nhiệt tại vị trí đầu ra của viên nén.

2.4.3.6. Phân tích kết quả vận tốc và động năng hạt trên ba mô hình.

Vận tốc trung bình của hạt là giá trị vận tốc trung bình của tất cả các hạt trong hệ, được tính bằng cách lấy tổng vận tốc từng hạt chia cho tổng số hạt. Vận tốc trung bình cao làm cho hệ hạt đang chuyển động hỗn loạn, dễ va đập. Hình 2- 51 cho thấy vận tốc trung bình thấp tại vị trí các hạt vật liệu bị ép mạnh tại bước vít thứ 2 ở cả ba mô hình.



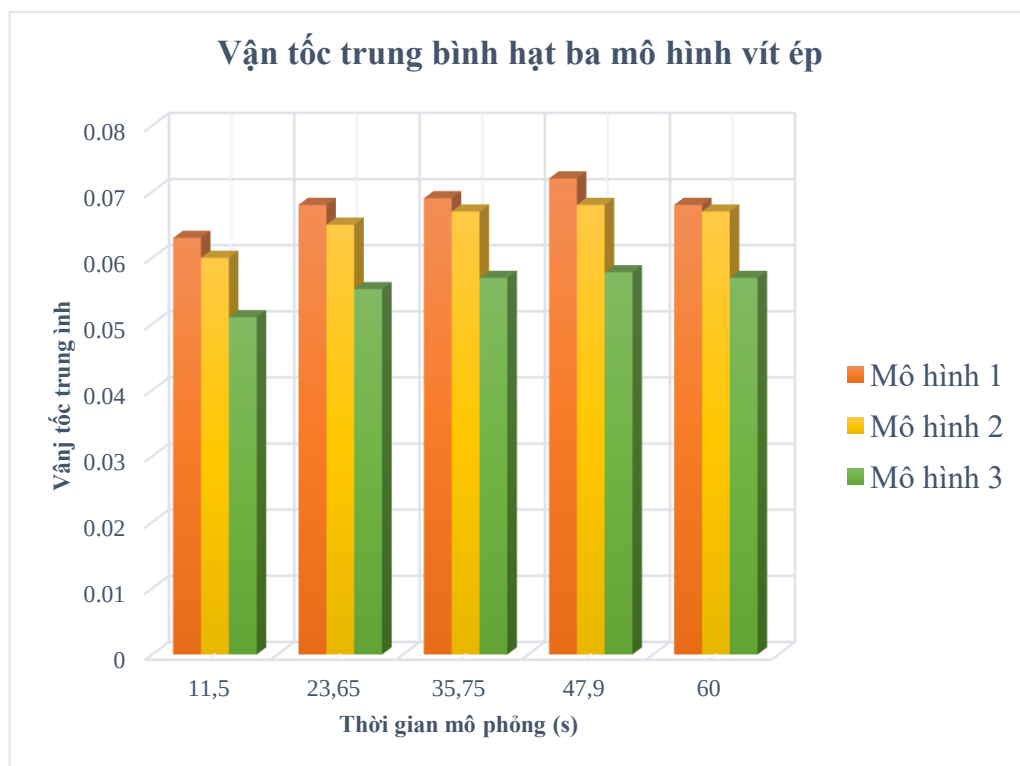
Hình 2- 51. Vận tốc trung bình hạt của 3 mô hình vít ép

Kết quả phân tích vận tốc trung bình của hạt cho thấy, vùng nạp liệu và đầu ra có vận tốc cao hơn, phản ánh dòng hạt di chuyển tự do. Ngược lại, nơi dồn nén vật liệu vận tốc trung bình giảm rõ rệt, cho thấy quá trình ép chậm lại để tăng mật độ khối và ổn định dòng chảy.

Bảng 2- 13 thể hiện vận tốc trung bình của hạt trên 3 mô hình vít ép

Bảng 2- 13. Vận tốc trung bình của hạt trên 3 mô hình vít ép

Thời gian mô phỏng (s)	11,5 s	23,65 s	35,75 s	47,9 s	60 s
Vận tốc trung bình của hạt mô hình 1 (m/s)	0,063	0,068	0,069	0,072	0,068
Vận tốc trung bình của hạt mô hình 2 (m/s)	0,060	0,065	0,067	0,068	0,067
Vận tốc trung bình của hạt mô hình 3 (m/s)	0,051	0,055	0,057	0,056	0,057



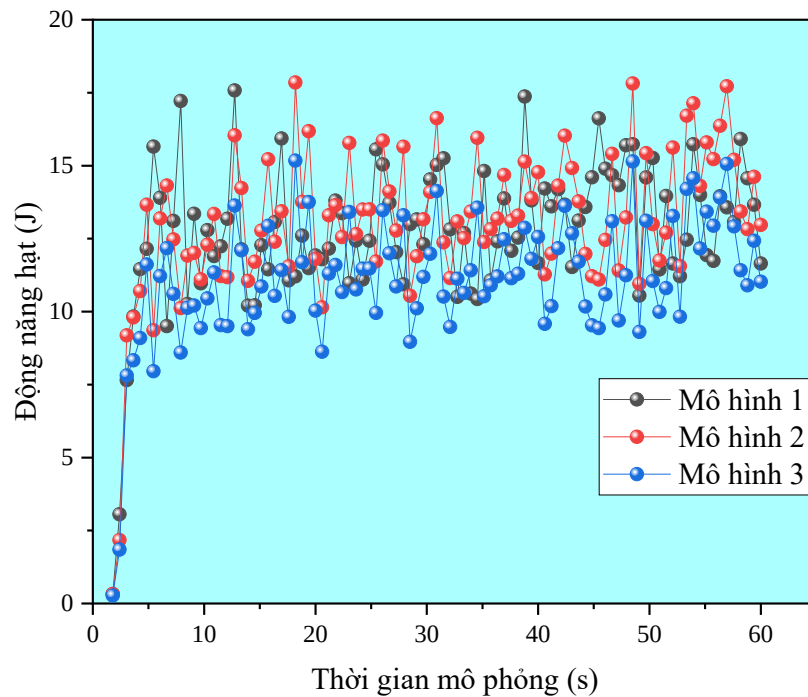
Hình 2- 52. Đồ thị Vận tốc trung bình hạt 3 mô hình

Đồ thị vận tốc trung bình của ba mô hình vít ép như hình 2- 52 cho thấy sự khác biệt rõ rệt về khả năng vận chuyển vật liệu. Ở tất cả các thời điểm khảo sát, mô hình 1 luôn duy trì vận tốc trung bình của hạt cao nhất (xấp xỉ 0,065–0,07 m/s), cho thấy khả năng đẩy vật liệu theo phương dọc trục hiệu quả hơn. Điều này phù hợp với kết quả lực tiếp tuyến lớn hơn ở mô hình 1, do lực trượt cao thường tạo ra sự dịch chuyển mạnh của vật liệu. Mô hình 2 có vận tốc trung bình thấp hơn một chút so với mô hình 1 nhưng vẫn duy trì ở mức ổn định (khoảng 0,062–0,067 m/s), phản ánh sự vận chuyển tương đối cân bằng giữa nén và trượt. Trong khi đó, mô hình 3 luôn có vận tốc thấp nhất (khoảng 0,055–0,06 m/s), cho thấy dòng vật liệu di chuyển chậm hơn do lực pháp tuyến và tổng lực tác dụng lớn hơn, làm cản trở chuyển động của hạt. Điều này cũng phù hợp với tính chất dòng chảy vật liệu của các mô hình có mức độ nén mạnh và mật độ tích lũy cao, khiến vận tốc bị giảm. Giá trị vận tốc lớn này cho thấy quá trình di chuyển và gia tốc của hạt diễn ra nhanh, hỗ trợ việc nạp vật liệu và tăng năng suất. Tuy nhiên, vận tốc cao đồng nghĩa với va đập mạnh hơn giữa các

hạt với hạt, với vít ép, buồng ép dẫn đến ma sát lớn và gia tăng mài mòn cho vít ép. Mô hình thứ 2 vận tốc trung bình hạt thấp hơn mô hình thứ 1, sự tăng dần từ đầu đến cuối trục vít giúp kiểm soát tốc độ gia tăng nén, tránh tạo lực quá lớn ngay từ đầu. Mô hình này phù hợp khi muốn cân bằng giữa năng suất và giảm mài mòn, nhưng vẫn có rủi ro ma sát đáng kể ở cuối. Mô hình vận tốc trung bình thấp nhất, ổn định. Đây là đặc điểm cho việc giảm va đập và ma sát hạt lên vít ép, buồng ép, từ đó giảm tốc độ mài mòn, kéo dài tuổi thọ vít ép.

Từ kết quả phân tích vận tốc trung bình của hạt trong ba mô hình vít ép, có thể thấy vận tốc không chỉ quyết định khả năng dịch chuyển của hệ hạt dọc theo buồng ép mà còn là yếu tố chi phối trực tiếp đến trạng thái năng lượng của vật liệu. Theo cơ sở lý thuyết cơ học, năng lượng cơ học của mỗi hạt trong mô phỏng DEM bao gồm hai thành phần: động năng – phụ thuộc vào vận tốc chuyển động của hạt, và thế năng – phụ thuộc vào vị trí của hạt trong trường trọng lực. Tuy nhiên, trong hệ vít ép làm việc ở không gian kín và hướng trục nằm ngang, sự thay đổi vị trí của hạt theo phương trọng lực là rất nhỏ, do đó thế năng gần như không biến đổi đáng kể. Ngược lại, vận tốc của hạt thay đổi liên tục do chịu tác động của lực pháp tuyến, lực tiếp tuyến và ma sát trượt, khiến động năng trở thành thành phần chi phối toàn bộ cơ chế truyền năng lượng trong hệ vật liệu rời rạc. Vì vậy, việc phân tích động năng là cần thiết để đánh giá sự xáo trộn, mức độ va đập và hiệu quả truyền động của từng mô hình vít.

Đồ thị động năng theo thời gian được thể hiện như hình 2- 53 cho thấy động năng của hạt tăng nhanh trong vài giây đầu mô phỏng, tương ứng với giai đoạn buồng ép được lấp đầy và dòng vật liệu bắt đầu chuyển từ trạng thái rời rạc sang trạng thái có tổ chức hơn. Sau giai đoạn này, động năng dao động quanh một giá trị trung bình ổn định đặc trưng cho từng mô hình vít ép.



Hình 2- 53. Đồ thị động năng hạt 3 mô hình

Mô hình 1 và mô hình 2 duy trì mức động năng trung bình cao hơn mô hình 3, chủ yếu dao động trong khoảng 12–16 J. Điều này phản ánh sự dịch chuyển mạnh của hạt do vận tốc lớn và tác động ma sát trượt đáng kể, phù hợp với kết quả lực tiếp tuyến biến thiên mạnh ở hai mô hình này. Đặc biệt, mô hình 2 có nhiều đỉnh động năng cao, cho thấy dòng vật liệu bị xáo trộn mạnh hơn dưới tác động của tổng lực và ma sát nội bộ. Mô hình 3 có động năng thấp nhất, dao động chủ yếu quanh mức 10–13 J. Điều này phù hợp với vận tốc trung bình thấp hơn và mức độ nén cao hơn ở mô hình 3, khiến chuyển động tương đối giữa các hạt bị hạn chế. Dòng vật liệu trong mô hình này ổn định hơn, ít va đập và ít tiêu hao năng lượng hơn, góp phần giảm nguy cơ mài mòn và tăng hiệu suất vận chuyển.

Như vậy, sự biến thiên động năng phản ánh đầy đủ mức độ xáo trộn, va đập và hiệu quả truyền động trong buồng ép, đồng thời liên quan mật thiết đến quá trình tạo hình viên nén và mức độ mài mòn của vít ép.

Các kết quả mô phỏng DEM cho thấy cơ chế làm việc của vít ép được chi phối bởi tổ hợp áp suất nén, lực pháp tuyến, lực tiếp tuyến và tổng lực tác dụng lên cả vít và hệ hạt rời rạc. Lực pháp tuyến quyết định mức độ ép chặt và ứng suất tiếp xúc trên bề mặt vít, trong khi lực tiếp tuyến phản ánh ma sát trượt giữa hạt – hạt và hạt – vít; tổng lực tăng dần theo chiều dài vít và đạt cực đại ở vùng cận cửa khuôn tập trung ở ba bước vít cuối, là nguyên nhân hình thành các vùng ứng suất và mài mòn cục bộ. Trên cơ sở đó, vận tốc, động năng và nhiệt độ hạt thể hiện rõ trạng thái năng lượng của dòng vật liệu. Mô hình có vận tốc và động năng cao cho thấy dòng vật liệu bị xáo trộn mạnh, va đập nhiều, ma sát lớn, dẫn tới nhiệt cục bộ tăng và nguy cơ mài mòn vít cao hơn; ngược lại, mô hình có vận tốc và động năng thấp hơn nhưng lực nén ổn định giúp dòng vật liệu nén chặt hơn, nhiệt sinh ra vừa đủ cho quá trình tạo viên mà không làm tăng mài mòn quá mức. Sự liên kết giữa các đại lượng lực – vận tốc – động năng – nhiệt như vậy cung cấp căn cứ quan trọng để đánh giá toàn diện ưu, nhược của từng mô hình vít ép và làm cơ sở cho việc lựa chọn hình học vít tối ưu và giải pháp cải thiện độ bền.

Các giá trị định lượng thể hiện trên hình cho thấy sự khác biệt rõ rệt giữa các phương án thiết kế vít ép. Phương án cải tiến có xu hướng giảm giá trị áp suất và mài mòn cực đại, đồng thời phân bố đều hơn vùng chịu tải dọc theo chiều dài vít. Kết quả này cho phép đánh giá định lượng hiệu quả của giải pháp thiết kế được đề xuất.

Kết quả mô phỏng cho thấy việc cải tiến hình học vít ép giúp phân bố lại tải tiếp xúc dọc theo chiều dài vít, làm giảm ứng suất cực đại tại các vùng nguy hiểm. Xu hướng này phù hợp với nguyên lý cơ học tiếp xúc và là cơ sở khoa học cho việc giảm mài mòn cục bộ, góp phần nâng cao độ bền mòn và tuổi thọ làm việc của vít ép tải trọng cao.

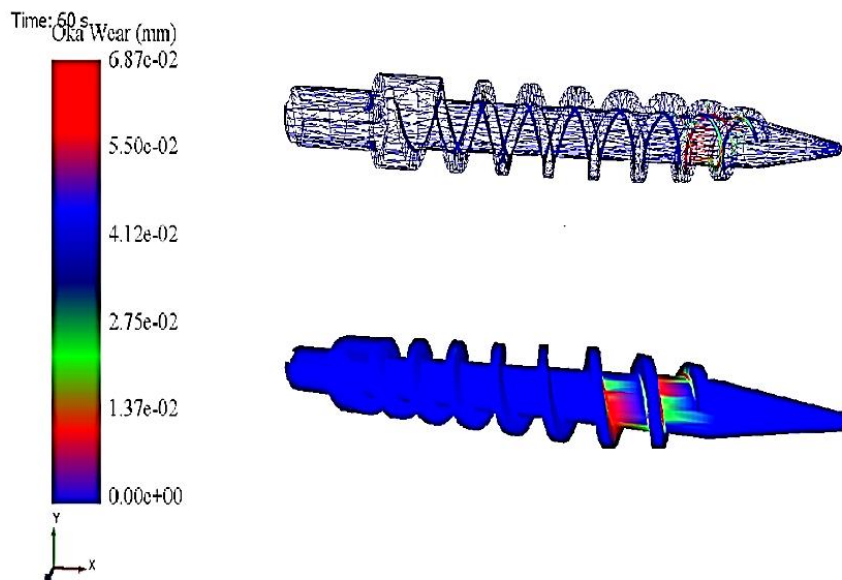
2.5. Phân tích kết quả mòn.

Lượng mòn được hiểu là quá trình hao hụt dần dần vật liệu (độ giảm chiều dày hoặc độ sâu bề mặt bị mất đi tại một vị trí nào đó) trên cánh vít hay thân vít, dưới tác động của ma sát, tải trọng, va chạm hoặc môi trường khắc nghiệt trong quá trình sử dụng.

Các chỉ tiêu kỹ thuật thu được từ mô phỏng như: áp suất, lực nén lên vít, tổng lực tác dụng, ứng suất dọc trục, lực nén trung bình tác dụng lên hạt vật liệu, vận tốc trung bình hạt, thông lượng nhiệt sinh ra và tensor ứng suất có ảnh hưởng chặt chẽ đến hiện tượng mài mòn của vít ép tải trọng cao. Áp suất và lực nén lớn thường làm tăng áp lực tiếp xúc giữa vật liệu và bề mặt vít, từ đó đẩy nhanh quá trình mài mòn vít ép. Tổng lực tác dụng lớn nhưng phân bố không đều có thể tạo ra các điểm nóng về ứng suất – nguyên nhân chính dẫn đến phá hủy cục bộ, biến dạng và giảm tuổi thọ vít. Ứng suất dọc trục cao kéo dài trong điều kiện làm việc khắc nghiệt có thể dẫn đến sự tích lũy ứng suất dư, phát sinh vết nứt vi mô và gây mòn cục bộ. Trong khi đó, vận tốc trung bình của hạt phản ánh mức độ va chạm và ma sát với bề mặt vít ép – vận tốc cao thường làm tăng nguy cơ mài mòn ba thân, xói mòn và mất vật liệu nhanh chóng. Thông lượng nhiệt lớn, cùng với tensor ứng suất bất ổn, gây nên sự tăng nhiệt cục bộ và phân bố ứng suất không đồng đều trên bề mặt vít, ảnh hưởng trực tiếp đến độ ổn định hình học và khả năng chống mòn của vít trong suốt quá trình vận hành.

Do đó việc phân tích xu hướng mòn theo chiều dài vít, xác định vùng mòn tập trung và đưa ra đánh giá về thiết kế hình học phù hợp nhằm nâng cao tuổi thọ vít và hiệu quả ép vật liệu là quan trọng.

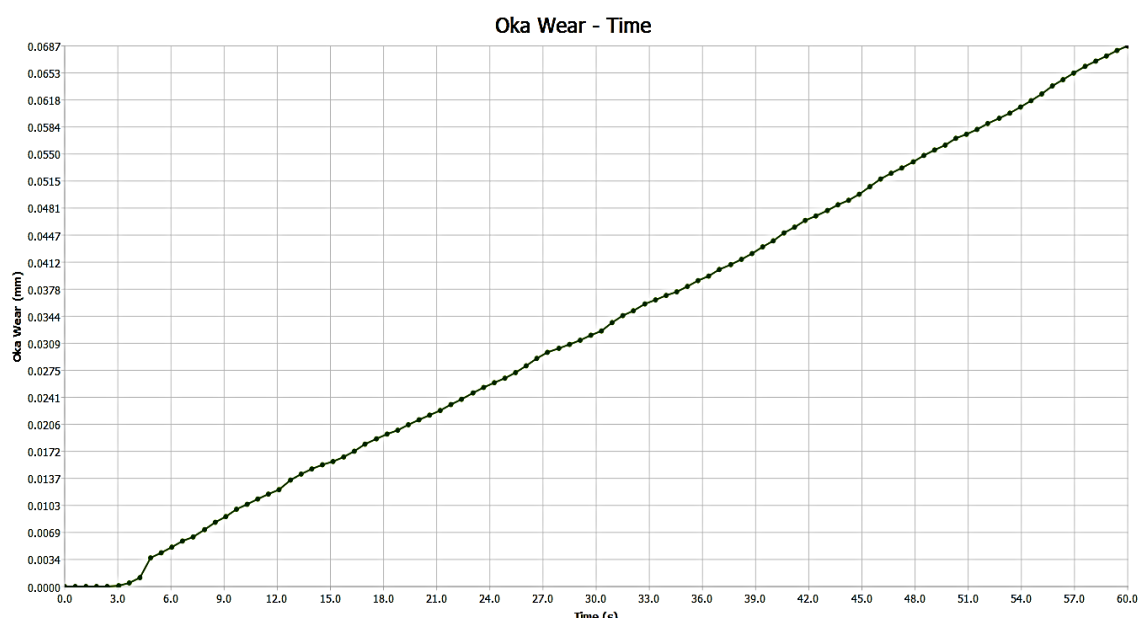
Kết quả mô phỏng cho thấy lượng mòn của mô hình vít ép thứ 1 tập trung ở 3 cánh vít đầu tiên, vị trí mòn tập trung ở các chân cánh vít và không đều, điều này dẫn đến hiện tượng mòn cục bộ trên vít ép được thể hiện như Hình 2-54.



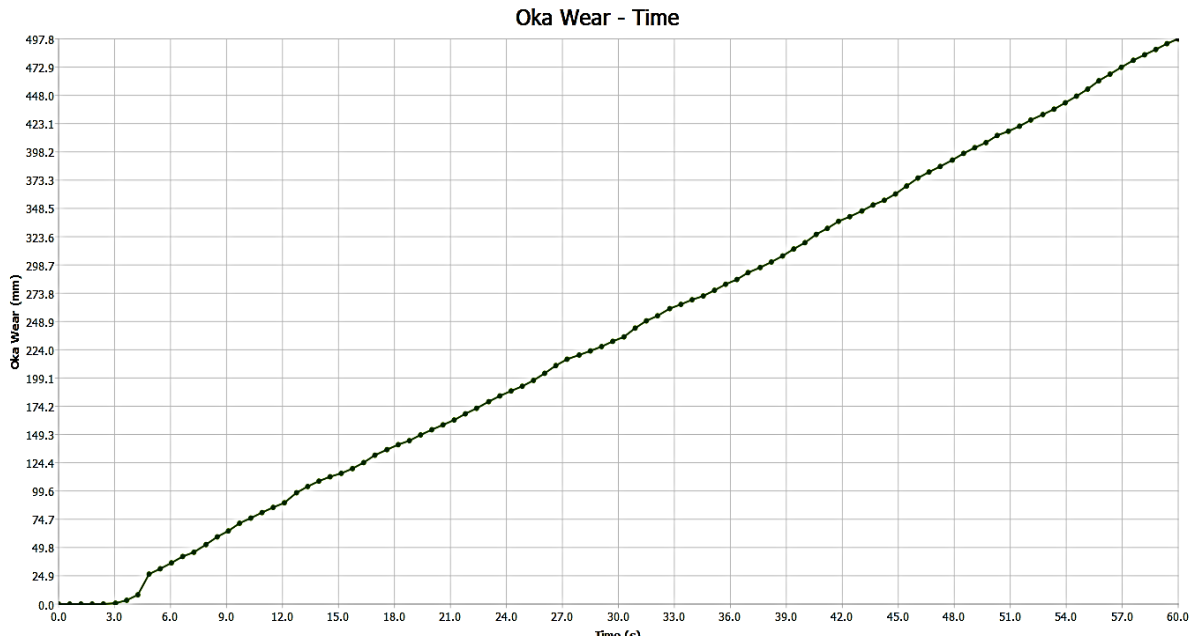
Altair EDEM™

Hình 2- 54. Kết quả mô phỏng lượng mòn của mô hình vít ép 1

Đồ thị biểu diễn lượng mòn của mô hình vít ép thứ 1 theo thời gian thể hiện như Hình 2- 55 và hình 2- 56.



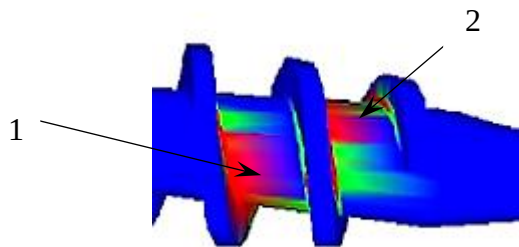
Hình 2- 55. Đồ thị mòn trung bình của mô hình vít ép thứ nhất



Hình 2- 56. Đồ thị tổng Lượng mòn của mô hình vít ép thứ nhất

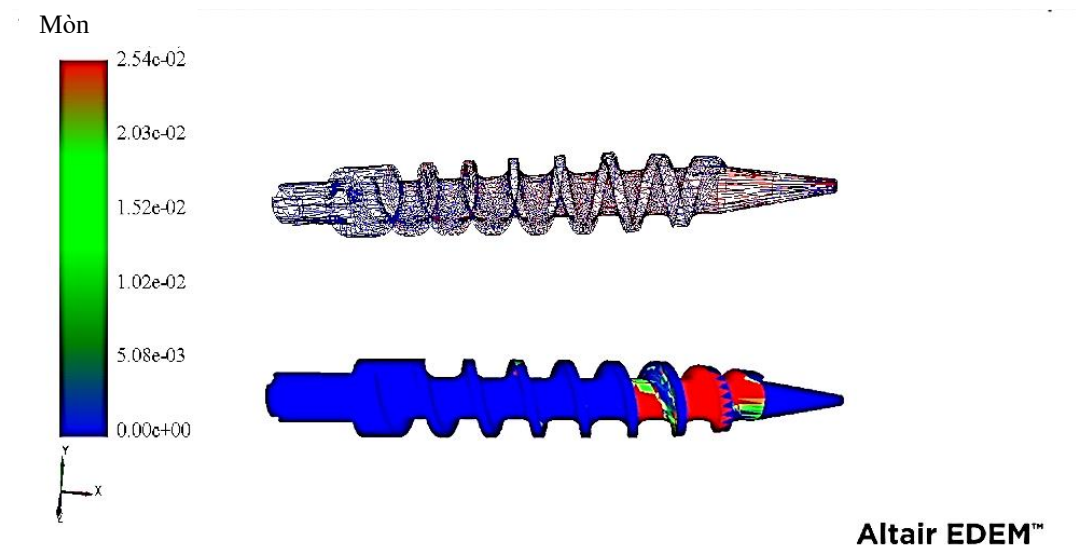
Kết quả mòn trung bình và tổng mòn 3 mô hình mô phỏng được thể hiện ở bảng 2- 14 và 2- 15.

Qua kết quả mô phỏng của vít ép cho thấy vít ép bị mòn tập trung chủ yếu ở ba bước vít đầu tiên trong đó bước vít thứ nhất và bước vít thứ 2 các vị trí mòn tập trung cục bộ ở các vị trí 1 và vị trí 2 như hình 2- 57. Lượng mòn tăng tuyến tính theo thời gian và đạt giá trị trung bình lớn nhất sau 60 giờ mô phỏng là 0,068716 mm. Kết quả mô phỏng cho lượng mòn tổng là 497,8 mm.



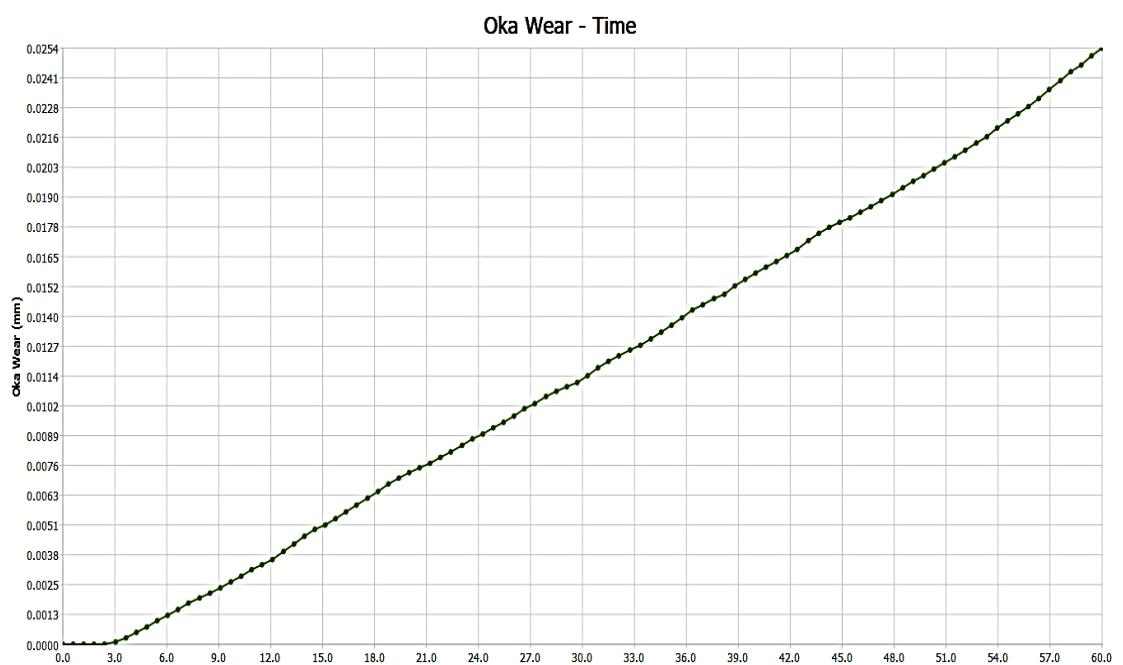
Hình 2- 57. Vị trí mòn chính trên mô hình vít ép thứ nhất

Kết quả mô phỏng lượng mòn của mô hình vít ép thứ 2 được thể hiện như Hình 2- 58.

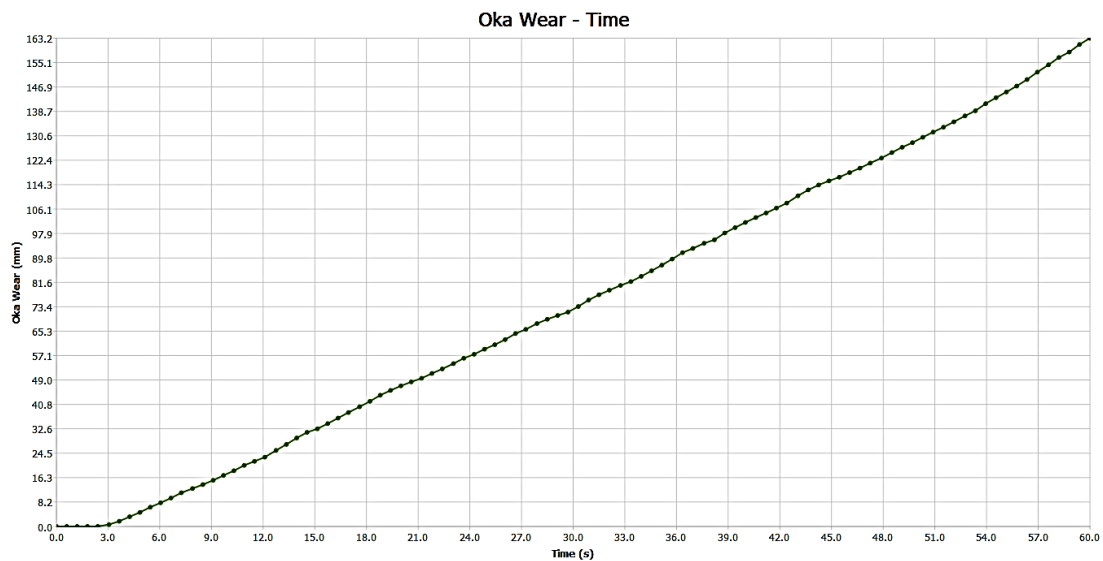


Hình 2- 58. Kết quả mô phỏng lượng mòn của mô hình vít ép 2

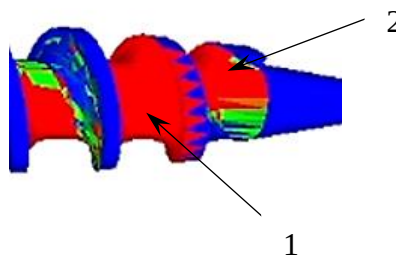
Vùng mòn chủ yếu tập trung ở ba bước vít cuối, tại vị trí này vật liệu bắt đầu bị nén dần và ma sát tăng lên theo hướng dòng chảy của vật liệu. Vẫn xuất hiện các vị trí mòn cục bộ chủ yếu dọc bước. Đồ thị biểu diễn lượng mòn của mô hình vít ép thứ 2 theo thời gian thể hiện như Hình 2- 59, hình 2- 60.



Hình 2- 59. Đồ thị lượng mòn trung bình của mô hình vít ép thứ 2



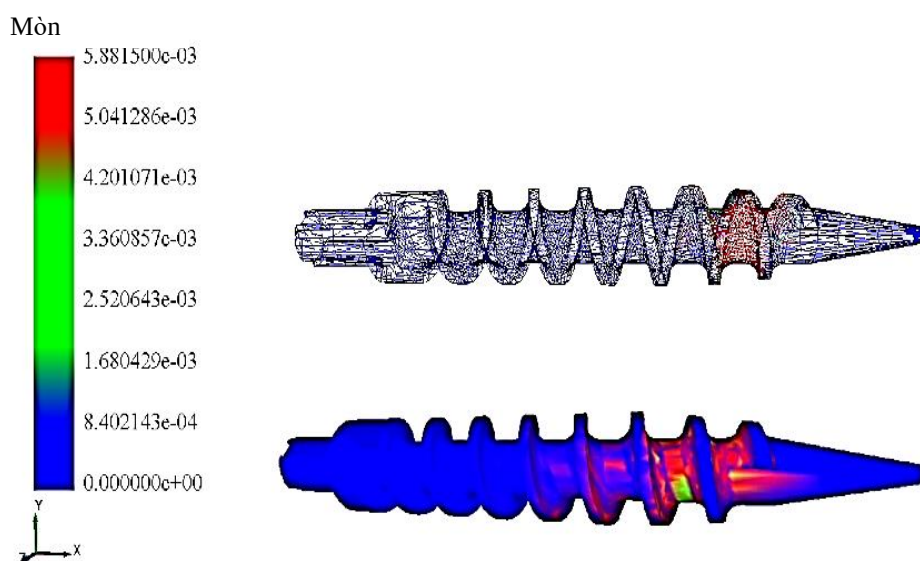
Hình 2- 60. Đồ thị lượng mòn tổng của mô hình vít ép thứ 2



Hình 2- 61. Vị trí mòn chính trên mô hình vít ép thứ 2

Qua kết quả mô phỏng của vít ép cho thấy vít ép bị mòn tập trung chủ yếu ở ba bước vít đầu tiên và phân bố mòn đều hơn so với mô hình vít ép thứ 1, trong đó bước vít thứ nhất và bước vít thứ 2 các vị trí mòn tập trung ở các vị trí 1 và vị trí 2 như hình 2- 61. Lượng mòn trung bình tăng tuyến tính theo thời gian và đạt giá trị lớn nhất sau 60 giờ mô phỏng là 0,0253766 mm. Kết quả mô phỏng cho lượng mòn tổng là 163,22215 mm. Qua kết quả thấy rằng khi thay đổi sang mô hình 2 thì áp suất giảm, lực ép trong buồng ép tăng dần khi dòng vật liệu đi vào từ phần vít dẫn sang phần vít ép và nó tăng mạnh nhất ở phần cánh vít ép thứ 2 và cánh vít ép thứ nhất, sau đó giảm dần ở phần cửa khuôn. Điều đó cho thấy áp lực tập trung chủ yếu vào phần cánh vít ép thứ nhất và vít ép thứ 2 của vít ép. Lượng mòn của vít ép tăng chậm hơn so với mô hình thứ nhất, giảm đi một cách đáng kể và được phân bố đều hơn mô hình vít ép thứ nhất.

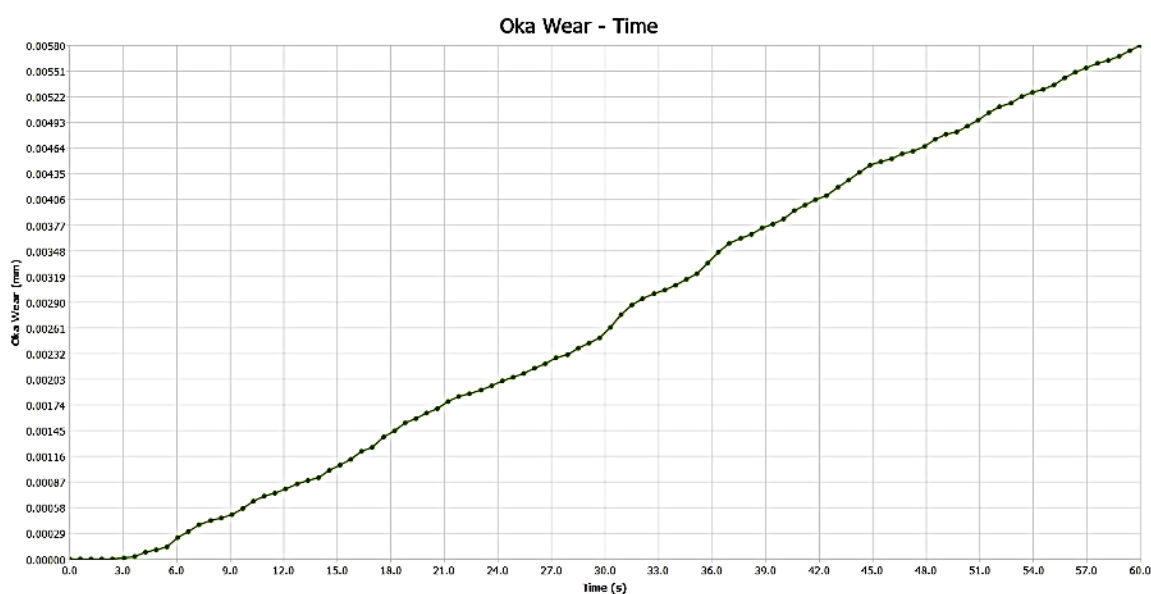
Kết quả mô phỏng lượng mòn của mô hình vít ép thứ 3 được thể hiện như Hình 2- 62.



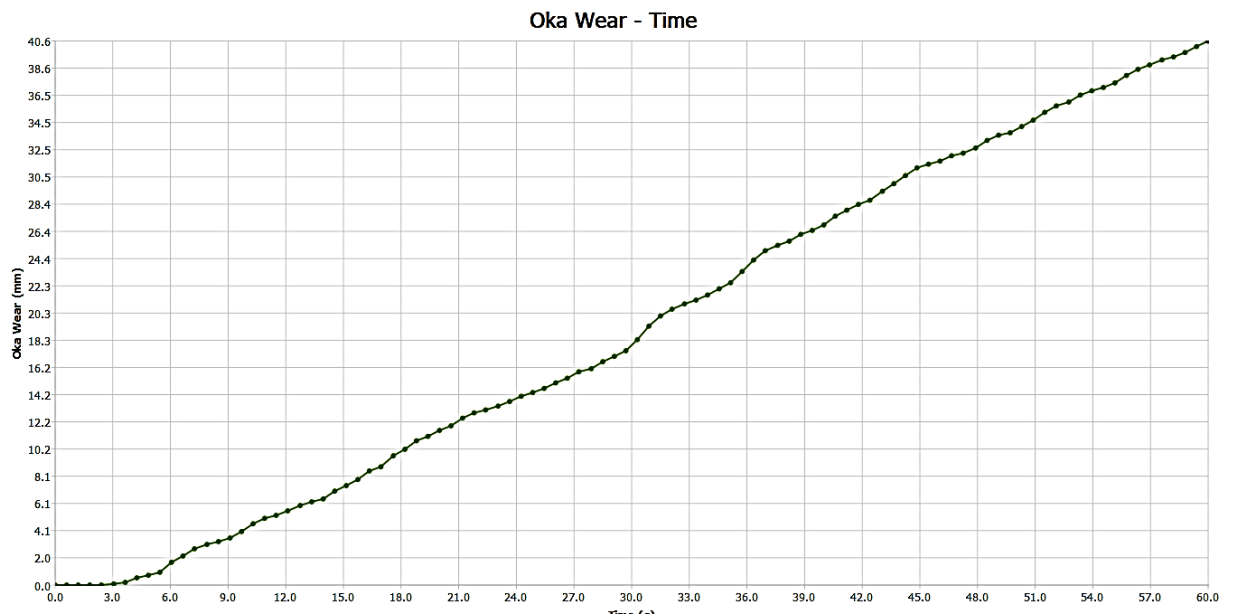
Altair EDEM™

Hình 2- 62. Kết quả mô phỏng lượng mòn của mô hình vít ép thứ 3

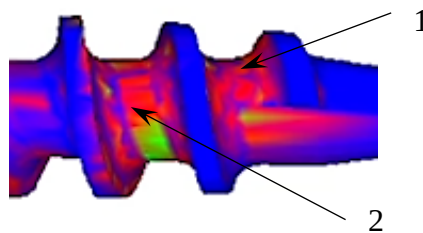
Đồ thị biểu diễn lượng mòn của vít ép thứ 3 theo thời gian thể hiện như Hình 2- 63, hình 2- 64.



Hình 2- 63. Đồ thị lượng mòn trung bình của mô hình vít 3



Hình 2- 64. Đồ thị tổng lượng mòn của mô hình vít thứ 3

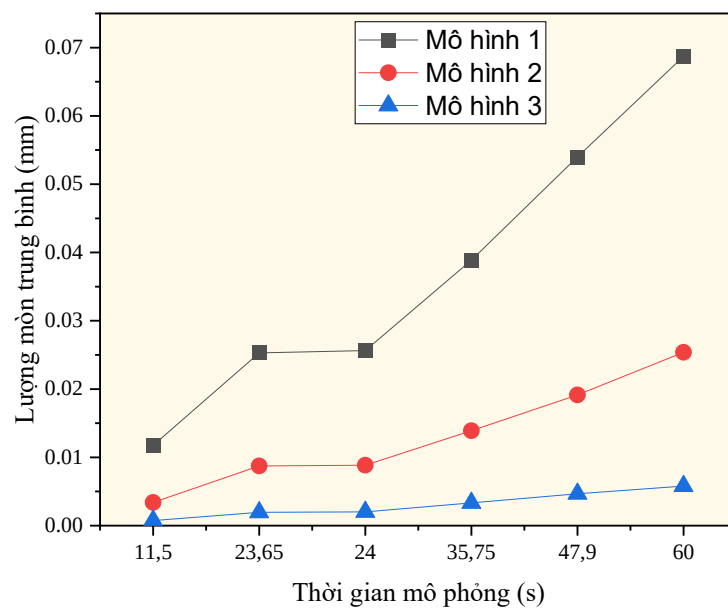


Hình 2- 65. Vị trí mòn chính trên mô hình vít ép thứ 3

Qua kết quả mô phỏng của vít ép cho thấy vít ép bị mòn đã phân bố đều ở ba bước vít đầu tiên trong đó bước vít thứ nhất và bước vít thứ 2 các vị trí mòn tập trung ở các vị trí 1 và vị trí 2 như hình 2- 65. Lượng mòn trung bình theo kết quả mô phỏng là 0,00580 mm. Lượng mòn tổng là 40,6 mm đã giảm nhiều so với hai mô hình 1 và 2. Qua kết quả ở 3 mô hình trên thấy rằng tình trạng mòn sau khi thay đổi sang mô hình vít ép thứ 3 đã được cải thiện. Mòn đã giảm bớt ở khu vực cánh vít ép thứ 2 và lượng mòn lớn nhất cũng giảm tương đối so với ở mô hình thứ nhất và thứ 2. Kết quả lượng mòn trung bình của ba mô hình vít ép được thể hiện và so sánh như bảng 2- 14 và đồ thị như hình 2- 66.

Bảng 2- 14. Giá trị mòn trung bình của 3 mô hình vít ép

Thời gian mô phỏng (s)	11,5 s	23,65 s	24 s	35,75 s	47,9 s	60 s
Lượng mòn mô hình 1 (mm)	0,01175	0,02530	0,02563	0,03888	0,05398	0,06872
Lượng mòn mô hình 2 (mm)	0,00339	0,00874	0,00886	0,01390	0,01915	0,02538
Lượng mòn mô hình 3 (mm)	0,00075	0,00196	0,00201	0,00334	0,00466	0,00580



Hình 2- 66. Lượng mòn trung bình 3 mô hình

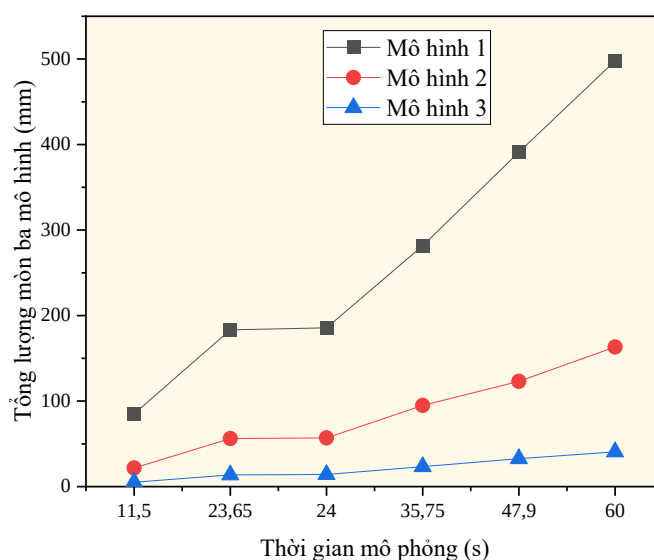
Biểu đồ lượng mòn trung bình 3 mô hình cho ta thấy mô hình thứ 1 lượng mòn trung bình cao nhất, tăng rõ rệt từ đầu đến cuối. Chứng tỏ rằng vít ép chịu tác động cơ học và nhiệt lớn liên tục dẫn đến mài mòn lớn các vị trí mòn tập trung cục bộ. Mô hình thứ 2 lượng mòn trung bình giảm đáng kể so với mô hình 1, phân bố mòn đều hơn và không tăng đột ngột như Mô hình thứ 1. Tuy

nhien, vẫn thể hiện rõ xu hướng mòn tăng dần về cuối. Mô hình thứ 3 độ mòn trung bình thấp và gần như đồng đều trên toàn bộ chiều dài trục vít.

Kết quả lượng mòn trung bình của ba mô hình vít ép được thể hiện và so sánh như bảng 2- 15 và đồ thị như hình 2- 67.

Bảng 2- 15. Giá trị tổng mòn của 3 mô hình vít ép

Thời gian mô phỏng (s)	11,5 s	23,65 s	24 s	35,75 s	47,9 s	60 s
Tổng Lượng mòn mô hình 1 (mm)	85,109	183,302	185,664	281,651	391,046	497,790
Tổng Lượng mòn mô hình 2 (mm)	21,778	56,224	56,964	94,974	123,152	163,222
Tổng Lượng mòn mô hình 3 (mm)	5,203	13,698	14,087	23,396	32,614	40,605



Hình 2- 67. Tổng lượng mòn 3 mô hình

Biểu đồ hình 2- 67 thể hiện lượng mòn tổng trên 3 mô hình cho thấy mô hình thứ 1 tổng lượng mòn cao, đặc biệt tăng mạnh ở vị trí cuối. Điều này chỉ rõ vít ép chịu tác động lớn nhất, bị mài mòn nhiều nhất, nguy cơ hỏng hóc và phải thay thế sớm. Tổng lượng mòn cao xuất phát từ áp suất, lực nén và vận tốc cao, tạo ma sát và va đập. Mô hình thứ 2 tổng lượng mòn giảm đáng kể so với Mô hình 1, tập trung nhiều nhất ở các vị trí giữa và cuối. Đây vẫn là kết quả của việc lực và ứng suất vẫn cao, nhưng đã có kiểm soát hơn so với mô hình 1. Mô hình thứ 3 tổng lượng mòn thấp và ổn định, cho thấy khả năng giảm tải cơ học, giảm ma sát và giảm biến dạng vít ép tốt hơn và phù hợp với các yêu cầu làm việc của nhà máy. Tuy nhiên vẫn cần quan tâm đến chất lượng của viên nén.

Phân tích tổng hợp các trường lực, ứng suất, nhiệt và vận tốc hạt trong mô phỏng DEM cho thấy độ bền mòn của vít ép bị chi phối trực tiếp bởi lực pháp tuyến, lực tiếp tuyến, ứng suất tiếp xúc, năng lượng va chạm và mức độ ổn định của dòng vật liệu rời.

Các kết quả mô phỏng chỉ ra rằng mô hình 1 xuất hiện nhiều điểm tập trung lực, ứng suất và nhiệt, dẫn đến mòn mạnh và phân bố mòn không đồng đều. Ngược lại, mô hình 3 có phân bố lực đồng đều hơn, tổng lực và ứng suất thấp hơn, trường nhiệt ổn định, vận tốc hạt ít dao động, nhờ đó mức độ mòn giảm rõ rệt.

Điều này cho thấy tối ưu hình học vít (mô hình 3) là giải pháp hiệu quả để giảm lực tiếp xúc, giảm ma sát, giảm phát nhiệt và tăng tuổi thọ bề mặt làm việc của vít ép tải trọng cao.

Từ cơ sở tính toán trên đề xuất mô hình 3 là mô hình tối ưu trong 3 mô hình vít ép. Các thông số mô hình 3 được thể hiện như bảng 2- 16.

Bảng 2- 16. Thông số hình học mô hình vít ép 3

TT	a_1	a_2	R_1 (mm)	R_2 (mm)	h (mm)	S_1 (mm)	S_2 (mm)	e_1 (mm)	e_2 (mm)	e_3 (mm)	e_4 (mm)
Vít ép mô hình 3	99°	93°	10	10	12	40	39,5	15	12	9,8	8,5

KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Chương 2 đã triển khai việc xây dựng và phân tích mô hình tối ưu hóa thiết kế vít ép tải trọng cao dựa trên cơ sở lý thuyết kết hợp với mô phỏng số bằng phương pháp phần tử rời rạc (DEM). Quá trình nghiên cứu bao gồm xác lập biên dạng vít ép, xây dựng mô hình vật liệu rời rạc, thiết lập mô hình hình học của hệ vít – buồng ép và xác định các điều kiện biên đặc trưng tương ứng với chế độ làm việc tải trọng cao trong dây chuyền sản xuất than sạch.

Kết quả tính toán thể tích ép và áp suất nén cho thấy hình học biên dạng vít ép tác động trực tiếp đến khả năng vận chuyển vật liệu, mức độ nén chặt cũng như sự ổn định của dòng chuyển động. Thông qua các mô hình biên dạng đã thiết lập, sự phân bố áp suất dọc theo chiều dài vít đã được làm rõ, cho thấy các vùng nén lớn thường xuất hiện tại những cánh vít đầu tiên; đây cũng là khu vực có nguy cơ mài mòn cục bộ cao trong quá trình vận hành thực tế.

Phân tích lực tác dụng lên vít ép (lực nén, lực pháp tuyến, lực tiếp tuyến và tổng lực) đã mô tả rõ sự phân bố tải trọng theo từng bước vít. Kết quả mô phỏng khẳng định rằng tổng lực và lực ma sát tăng đột ngột ở vùng đầu vít, phù hợp với cơ chế nén chặt vật liệu và là nguyên nhân chính dẫn đến tốc độ mòn cao ở khu vực này. Điều này góp phần giải thích hiện tượng mòn cục bộ quan sát trong thực nghiệm.

Đối với các đại lượng tác động lên hạt như vận tốc, động năng, nhiệt năng và các tensor ứng suất, mô phỏng cho thấy sự biến thiên mạnh tại vùng chuyển tiếp giữa các cánh vít đầu, phản ánh quá trình nén – trượt – va đập của hạt. Những đại lượng này đóng vai trò trong việc hình thành ứng suất tiếp xúc và tốc độ mòn bề mặt vít. Phân bố vận tốc và động năng của hạt trong các mô hình tối ưu cho thấy sự giảm va đập và giảm tổn thất năng lượng, qua đó giúp hạn chế tốc độ mài mòn.

Kết quả mô phỏng mòn cho ba mô hình biên dạng vít đã cho thấy mô hình 3 thể hiện lượng mòn thấp nhất, phân bố mòn đều hơn và giảm rõ rệt vùng mòn cục bộ tại bước vít thứ hai và thứ ba so với mô hình cơ sở. Đây là cơ sở quan trọng cho việc lựa chọn biên dạng vít ép tối ưu trong các giai đoạn thiết kế và

thực nghiệm tiếp theo. Những kết quả của chương không chỉ chứng minh tính hợp lý của phương pháp mô phỏng mà còn tạo nền tảng khoa học quan trọng cho việc cải thiện độ bền mòn thông qua tối ưu thiết kế và ứng dụng lớp phủ HVOF trong các phần tiếp theo của luận án.

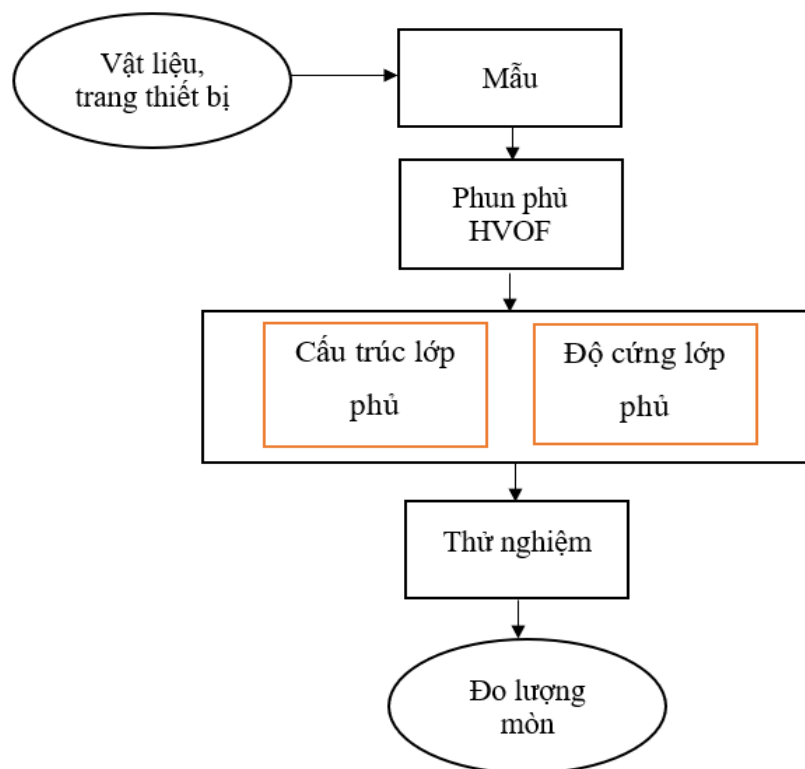
Trên cơ sở phân tích kết quả mô phỏng, phương án vít ép thứ ba cho thấy hiệu quả rõ rệt trong việc giảm áp suất tiếp xúc cực đại và mài mòn cục bộ so với các phương án còn lại. Do đó, phương án này được lựa chọn làm cấu hình tối ưu để triển khai các nghiên cứu thực nghiệm và đánh giá hiệu quả trong các chương tiếp theo của luận án.

CHƯƠNG 3: VẬT LIỆU, TRANG THIẾT BỊ VÀ THỰC NGHIỆM TẠO LỚP PHỦ HVOF

Trong nghiên cứu này, công nghệ phun phủ HVOF (High Velocity Oxy-Fuel) được lựa chọn nhờ khả năng kiểm soát tốt các đặc tính cấu trúc và cơ học của lớp phủ, đáp ứng yêu cầu về độ bền mòn cao. Chương 3 sẽ trình bày cụ thể các trang thiết bị sử dụng, phương pháp Taguchi để tiến hành thực nghiệm, cũng như các thông số kỹ thuật quan trọng nhằm tạo cơ sở cho các phân tích và đánh giá kết quả. Việc tối ưu hóa các thông số công nghệ ảnh hưởng chính đến điều kiện làm việc thực tế và mục tiêu thiết kế là cần thiết để đạt hiệu suất cao nhất. Trong các nghiên cứu, công nghệ phun phủ HVOF đã chứng minh khả năng kiểm soát hiệu quả các yếu tố này, từ đó mang lại lớp phủ có độ bền mòn tốt hơn.

Sơ đồ triển khai thực nghiệm được thể hiện như hình 3- 1.

Ta có sơ đồ thực nghiệm đánh giá độ bền mòn



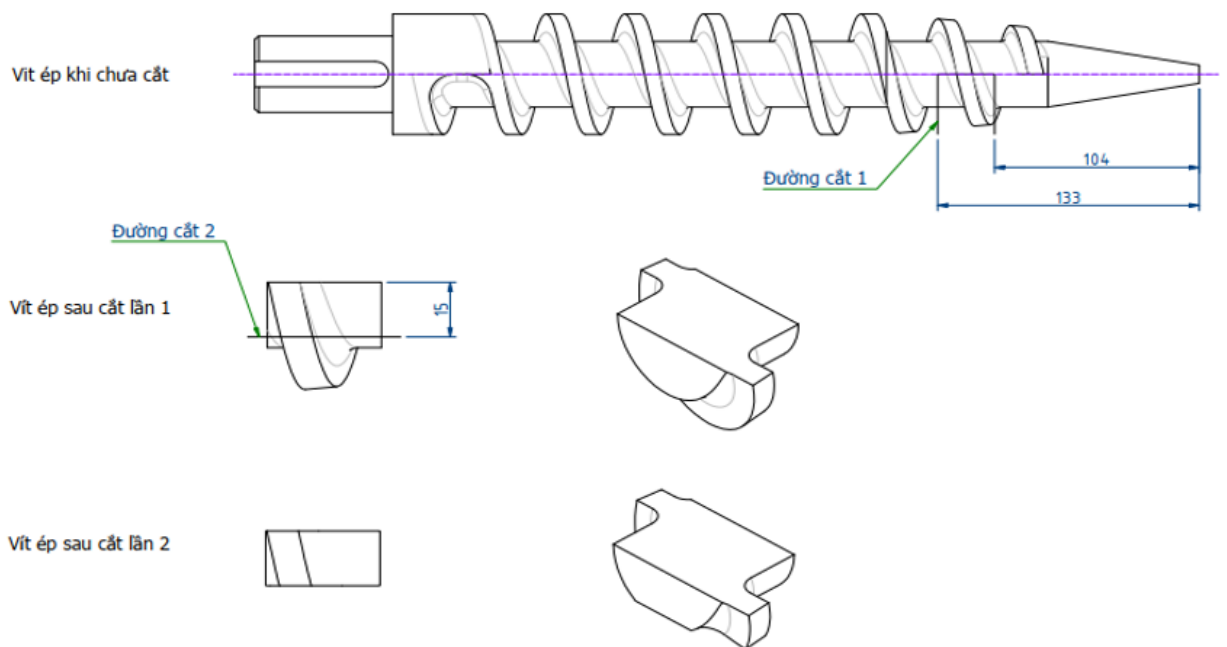
Hình 3- 1. Sơ đồ thực nghiệm đánh giá độ bền mòn

3.1. Vật liệu, trang thiết bị thực nghiệm

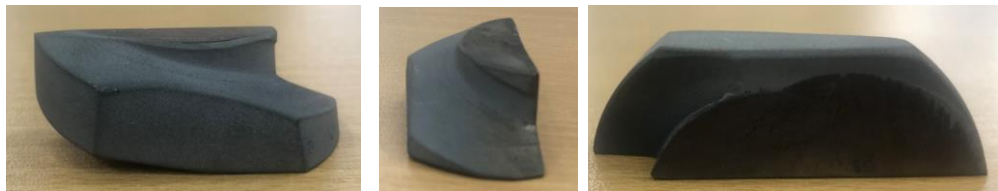
3.1.1. Vật liệu thực nghiệm

a. Vật liệu, mẫu thí nghiệm

Mẫu thí nghiệm được cắt từ vít ép để có thể gá đặt trên máy đo. Tuy nhiên vẫn cần đảm bảo biên dạng như thực tế. Mẫu thí nghiệm sau khi cắt sẽ được phun phủ lên bề mặt làm việc bằng phương pháp HVOF. Sau khi phun phủ sẽ được mài, đánh bóng và tẩm thực trước khi chụp ảnh SEM và đo độ cứng. Mẫu thí nghiệm dùng để đo thể hiện như hình 3- 3.



Hình 3- 2. Sơ đồ cắt mẫu thực nghiệm từ vít ép



Hình 3- 3. Hình ảnh mẫu thực nghiệm cắt từ vít ép

c. Vật liệu phun phủ

Vật liệu phun phủ với thành phần khác nhau được sử dụng, bao gồm: Nickel pha WC HMSP1060-00 với thành phần hoá học của các loại bột phun và thuộc tính của nó được thể hiện trong Bảng 3- 1 và Bảng 3- 2.

Bảng 3- 1. Thành phần hoá học bột phun phủ

Mác	C (%)	Ni (%)	Fe (%)	Cr (%)	Si (%)	B (%)	WC (%)
1	2,96	27,59	1,85	6,45	2	1,4	57,75

Bảng 3- 2. Thuộc tính của WC và Ni

TT	Tính chất	WC	Ni
1	Nhiệt độ chảy (°C)	2785÷2830	1455
2	Module Young (GPa)	530÷700	200
3	Khối lượng riêng (g/cm ³)	15,6	8,9

Việc sử dụng mẫu cắt đại diện trong thí nghiệm phun phủ nhằm đảm bảo khả năng kiểm soát đồng đều các thông số công nghệ và điều kiện thử nghiệm. Các mẫu được chế tạo từ cùng vật liệu nền và có bề mặt đại diện cho vùng làm việc của vít ép. Bên cạnh đó, lớp phủ HVOF được áp dụng cho vít ép hoàn chỉnh và thử nghiệm trong điều kiện làm việc thực tế, qua đó kiểm chứng tính ổn định và độ tin cậy của giải pháp đề xuất.

3.1.2. Trang thiết bị thực nghiệm

a. Thiết bị phun HVOF

Thiết bị phun HVOF với súng phun HP - 2700M của hãng Metallizing. Tiến hành phun phủ HVOF tại công ty Minh Ngọc địa chỉ 36 đường Ý Lan, Gia Lâm, Hà Nội.



Hình 3- 4. Thiết bị phun HVOF

Thiết bị phun HVOF bao gồm các bộ phận chính sau:

Bộ phận cấp bột PF-3350: Bột phun được cấp vào súng phun thông qua dòng khí nitơ, đóng vai trò vừa tạo áp suất vừa bảo đảm lưu lượng vận chuyển bột từ ống chứa đến buồng phun. Hệ thống PF-3350 có khả năng điều chỉnh lưu lượng cấp bột với độ chính xác cao, đạt tới 0,1 g/vòng quay của đĩa cấp bột.

Bộ phận cấp khí: Hệ thống phun HVOF sử dụng trong thực nghiệm gồm các nguồn khí chính là khí nén, oxy, propan và nitơ. Trong đó, oxy được cấp từ các chai khí đầu nối đồng thời vào hệ thống để duy trì sự cháy ổn định và bảo đảm áp suất trong quá trình phun. Propan loại 50 kg được sử dụng làm khí nhiên liệu cho quá trình đốt cháy, còn nitơ được dùng để tải bột phun đến súng phun. Nguồn khí nén được cung cấp từ máy nén khí trực vít và lưu trữ qua bình tích áp. Bên cạnh đó, hệ thống còn tích hợp các van điều chỉnh cùng đồng hồ đo áp suất để giám sát và hiệu chỉnh các thông số khí trong suốt quá trình thực nghiệm.

Bộ phận điều chỉnh lưu lượng MP-2100: Thiết bị MP-2100 có nhiệm vụ đo và kiểm soát lưu lượng các dòng khí cấp cho hệ thống phun, gồm oxy, propan và không khí nén, tùy theo đặc tính của vật liệu phun và chế độ công nghệ được thiết lập. Hệ thống cho phép điều chỉnh lưu lượng và áp suất khí với

sai số nhỏ, khoảng $\pm 0,1$ Bar, đồng thời bảo đảm khả năng kiểm soát áp suất trong dải từ 0 đến 11 Bar.

Súng phun HVOF HP-2700-M: Súng phun HVOF HP-2700-M được lựa chọn sử dụng trong quá trình thực nghiệm của nghiên cứu này. Việc lựa chọn loại súng phun phù hợp được xem xét trên cơ sở kích thước hạt bột, nhiệt độ nóng chảy của vật liệu phủ và yêu cầu về năng suất phun nhằm bảo đảm chất lượng lớp phủ tạo thành.

b. Kính hiển vi quang học Leica

Phân tích tổ chức tế vi của lớp phủ được đo trên kính hiển vi quang học Leica. Hình ảnh máy đo Leica được thể hiện như Hình 3- 4.

Thông số máy: Kính hiển vi quang học Leica DM750 M tại phòng thí nghiệm vật liệu Đại học Công Nghiệp Hà Nội.

- Độ phóng đại: x50, x100, x200, x500.
- Phần mềm phân tích pha, độ hạt LAS V4.12.



Hình 3- 5. Kính hiển vi quang học LEICA DM750 M

c. Máy đo độ cứng ISOSCAN HV2 AC

Độ cứng lớp phủ được đo bằng phương pháp đâm mũi kim cương theo phương vuông góc với bề mặt lớp phủ, giá trị độ cứng của lớp phủ đo được dựa trên độ sâu, độ rộng của vết lõm thu được. Máy đo độ cứng ISOSCAN HV2 AC tại phòng thí nghiệm vật liệu đại học Công Nghiệp Hà Nội như Hình 3- 5.

- Vật kính: 10x, 20x, 40x và 80x
- Thị kính (camera): 10x
- Mũi đâm: Vickers, Knoop
- Tải trọng: từ 25g đến 2 kg
- Khả năng điều khiển để theo 3 phương: $d_x=25\text{mm}$, $d_y=25\text{mm}$, $d_z=85\text{mm}$
- Chế độ đo: Thiết bị này cho phép đo độ cứng vi mô Vickers bằng cách tự động đo đường chéo của vết lõm.
- Tải trọng đo: ISOSCAN HV2 AC có cơ chế tự động áp dụng tải trọng để tạo ra vết lõm.
- Máy đo độ cứng ISOSCAN HV2 AC tuân thủ hoàn toàn các tiêu chuẩn quốc tế về đo độ cứng vi mô: ISO 6507-2: Tiêu chuẩn quốc tế quy định phương pháp thử độ cứng Vickers và ASTM E384: Tiêu chuẩn của Hiệp hội Vật liệu và Thử nghiệm Hoa Kỳ cho phương pháp thử độ cứng vi mô.



Hình 3- 6. Máy đo độ cứng ISOSCAN HV2 AC

3.2. Lựa chọn các thông số phun phủ HVOF

HVOF là công nghệ phun nhiệt sử dụng hỗn hợp nhiên liệu – oxy để tạo luồng khí cháy tốc độ siêu âm, gia tốc hạt bột phủ đến vận tốc rất cao và bắn lên bề mặt nền, tạo lớp phủ đặc, bám dính mạnh và chống mài mòn tốt. Các thông số phun được lựa chọn gồm: lưu lượng phun (F_p), khoảng cách phun (D_p), tỷ lệ oxy/propan (R_p). Các giá trị thông số phun được lựa chọn theo máy với: $F_p = 15 \div 50 \text{ g/ph}$; $D_p = 0,15 \div 0,5 \text{ m}$; $R_p = 2 \div 7$.

Qua khảo sát thực nghiệm, có thể nhận thấy rằng lưu lượng phun là thông số ảnh hưởng rõ rệt đến chất lượng lớp phủ. Khi lưu lượng phun thấp, lớp phủ tạo thành có chiều dày nhỏ, không bảo đảm hiệu suất lắng đọng trong điều kiện phun ở khoảng cách lớn; nếu rút ngắn khoảng cách phun để cải thiện hiệu suất lắng đọng thì lớp phủ lại dễ bị tác động nhiệt bất lợi. Trái lại, khi lưu lượng phun quá cao, số lượng hạt không nóng chảy hoàn toàn tăng lên, dẫn đến sự xuất hiện của các vùng chưa nóng chảy và làm phát sinh nứt tại biên giới liên kết. Do đó, để đạt được lớp phủ có chất lượng tốt, lưu lượng phun phù hợp được xác định trong khoảng $F_p = 25 \div 35$ g/ph. Đối với khoảng cách phun, nếu khoảng cách này quá nhỏ thì bề mặt lớp phủ có xu hướng bị cháy xám, độ xốp tăng lên rõ rệt và dễ xuất hiện nứt tại vùng liên kết giữa lớp phủ với nền. Do đó để đảm bảo chất lượng, lựa chọn khoảng cách $D_p = 0,2 \div 0,3$ m. Đối với tỷ lệ oxy/propan, nếu tỷ lệ này nhỏ sẽ dẫn tới nhiều hạt không nóng chảy. Nếu tỷ lệ này lớn thì độ xốp tăng. Để đảm bảo chất lượng, lựa chọn tỷ lệ $R_p = 3 \div 5$.

3.3. Thực nghiệm đo cấu trúc, độ cứng lớp phủ

3.3.1. Thực nghiệm đo cấu trúc lớp phủ

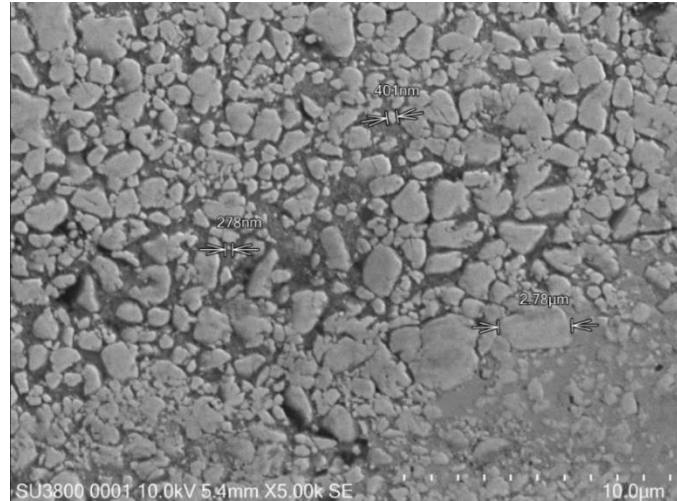
Cấu trúc lớp phủ là yếu tố quyết định đến hầu hết các đặc tính cơ học và khả năng làm việc của chi tiết trong điều kiện tải trọng cao. Bên trong lớp phủ hình thành qua quá trình phun phủ HVOF, các hạt vật liệu nóng chảy hoặc bán nóng chảy va đập, biến dạng và nguội nhanh trên bề mặt nền, tạo nên cấu trúc đặc trưng gồm các lớp chồng xếp, khe hở và các vùng liên kết khác nhau. Chính sự hình thành không đồng nhất này làm xuất hiện các đặc trưng vi mô quan trọng như độ hạt và độ xốp – hai thông số có ảnh hưởng trực tiếp đến mật độ, độ bền bám, độ cứng, khả năng chống mài mòn và độ bền của lớp phủ.

Do đó, việc phân tích chi tiết độ hạt và độ xốp của lớp phủ không chỉ giúp đánh giá chất lượng quá trình phun mà còn cung cấp cơ sở khoa học để tối ưu hóa các thông số công nghệ HVOF.

3.3.2. Thực nghiệm đo độ hạt lớp phủ

Độ hạt của lớp phủ được đo trên kính hiển vi quang học Leica.

Kết quả đo kích thước hạt trên kính hiển vi quang học với độ phóng đại x300 được thể hiện trên Hình 3- 8.

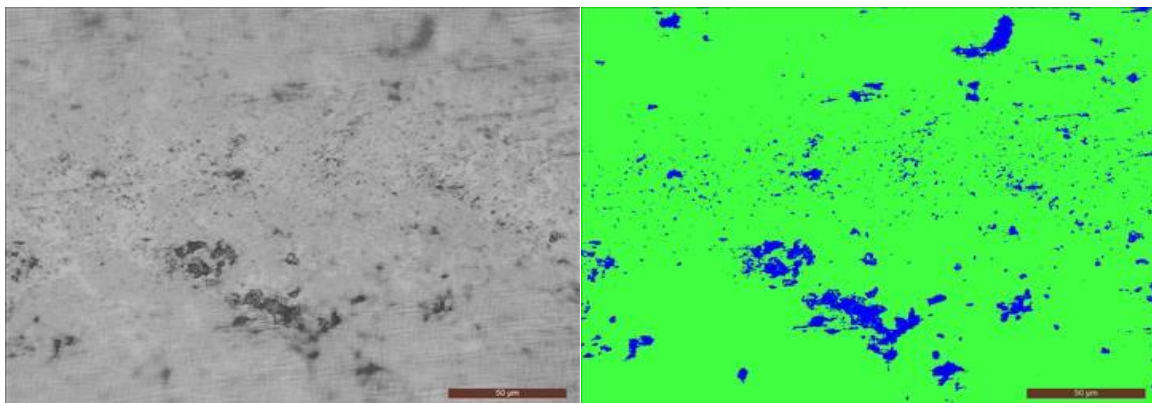


Hình 3- 7. Ảnh phóng đại x300 đo kích thước hạt của lớp phủ

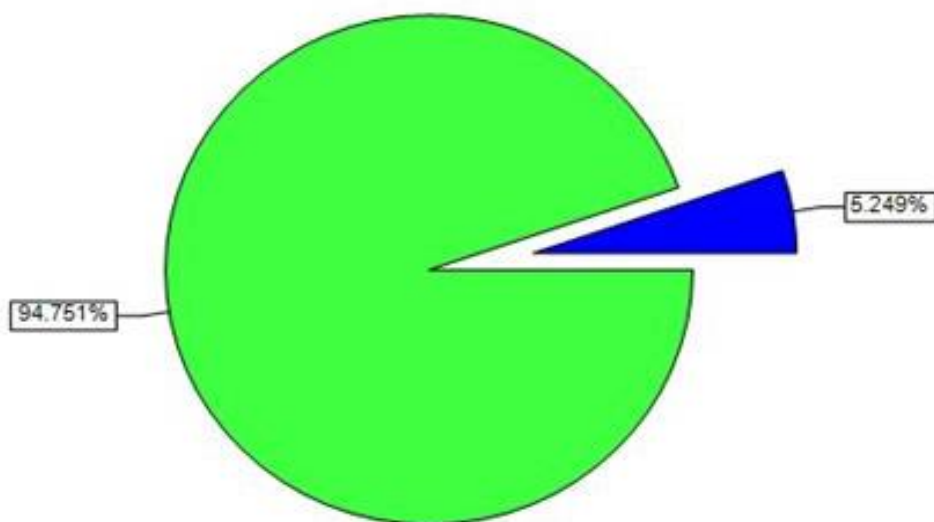
Các kết quả đo cho thấy độ hạt sau khi phun bằng phương pháp HVOF có kích thước lớn nhất là 2,78 μm , kích thước nhỏ nhất là 401 nm. Với độ hạt khá mịn như vậy cho thấy chất lượng lớp phủ rất tốt.

3.3.3. Thực nghiệm đo độ xốp lớp phủ

Cấu trúc lớp phủ đặc trưng bởi nhiều thông số nhưng độ xốp (P_o) là một thông số quan trọng. Hình 3- 9 và Hình 3- 10 là ảnh SEM của lớp phủ với các phân tích về độ xốp với độ phóng đại 300 lần được thực hiện tại phòng thí nghiệm vật liệu trường Đại học Công Nghiệp Hà Nội.



Hình 3- 8. Ảnh phóng đại x300 lớp phủ có độ xốp



Hình 3- 9. Ảnh phân tích theo % của độ xốp lớp phủ

Với ba thông số đầu vào là F_p , D_p và R_p , sử dụng bảng trực giao Taguchi L9 với các kết quả đo độ xốp của lớp phủ như Bảng 3- 3.

Bảng 3- 3. Bảng Taguchi L9 với các giá trị độ xốp đo được

TT	F (g/min)	D (m)	R	Po (%) (1 st)	Po (%) (2 nd)	Po (%) (3 rd)	$\overline{Po}$ (%)
1	25	0,2	4	5,249	5,152	5,373	5,258
2	25	0,25	5	4,973	4,863	4,845	4,894
3	25	0,3	6	3,228	3,348	3,148	3,241
4	30	0,2	5	5,059	4,943	4,875	4,959
5	30	0,25	6	3,086	3,294	3,102	3,161
6	30	0,3	4	3,986	4,034	3,883	3,968
7	35	0,2	6	4,688	4,832	4,593	4,704
8	35	0,25	4	3,767	3,912	3,871	3,850
9	35	0,3	5	3,109	3,135	3,285	3,176

Để đánh giá mức độ ảnh hưởng của F_p , D_p , và R_p đến độ xốp lớp phủ (Po), sử dụng hệ số SN_i [49], [56]:

$$SN_i = -10 \log \left(\sum_{u=1}^{N_i} \frac{y_u^2}{N_i} \right) \quad (3.1)$$

Trong đó: $i = 1 \div 9$

u – Số lần thí nghiệm ($u = 1 \div 3$)

N_i – Số thử nghiệm cho thí nghiệm thứ i ($N_i = 3$).

Hệ số SN_i được tính toán như Bảng 4- 2.

Bảng 3- 4. Hệ số SN_i được tính toán cho độ xốp lớp phủ

TT	F_p (g/min)	D_p (m)	R_p	Po
				SN_i
1	25	0.2	4	-14.4177
2	25	0.25	5	-13.7933
3	25	0.3	6	-10.2173
4	30	0.2	5	-13.9089
5	30	0.25	6	-9.99946
6	30	0.3	4	-11.9718
7	35	0.2	6	-13.4519
8	35	0.25	4	-11.7103
9	35	0.3	5	-10.0411

Hệ số SN được tính cho mỗi cấp độ như sau:

$$\begin{aligned}
 SN_{P1,1} &= \frac{(SN_1 + SN_2 + SN_3)}{3}; SN_{P1,2} = \frac{(SN_4 + SN_5 + SN_6)}{3}; \\
 SN_{P1,3} &= \frac{(SN_7 + SN_8 + SN_9)}{3}; SN_{P2,1} = \frac{(SN_1 + SN_4 + SN_7)}{3}; \\
 SN_{P2,2} &= \frac{(SN_2 + SN_5 + SN_8)}{3}; SN_{P2,3} = \frac{(SN_3 + SN_6 + SN_9)}{3}; \\
 SN_{P3,1} &= \frac{(SN_1 + SN_6 + SN_8)}{3}; SN_{P3,2} = \frac{(SN_2 + SN_4 + SN_9)}{3}; \\
 SN_{P3,3} &= \frac{(SN_3 + SN_5 + SN_7)}{3}
 \end{aligned}$$

Giá trị SN cho mỗi cấp độ được trình bày trong Bảng 3- 5.

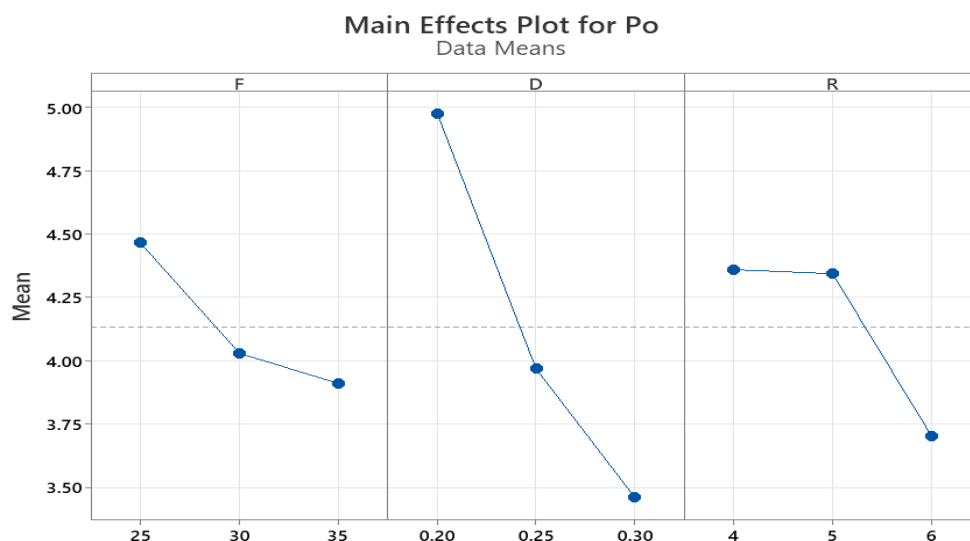
Bảng 3- 5. Hệ số SN cho mỗi cấp độ ảnh hưởng đến độ xốp lớp phủ

Mức	Po		
	SN tính toán cho F_p	SN tính toán cho D_p	SN tính toán cho R_p
1	-12.8094	-13.9262	-2.6999
2	-11.9601	-11.8343	-2.5811
3	-11.7344	-10.7434	-1.2229
Δ	1.0750	3.1828	1.4771
Hạng	3	1	2

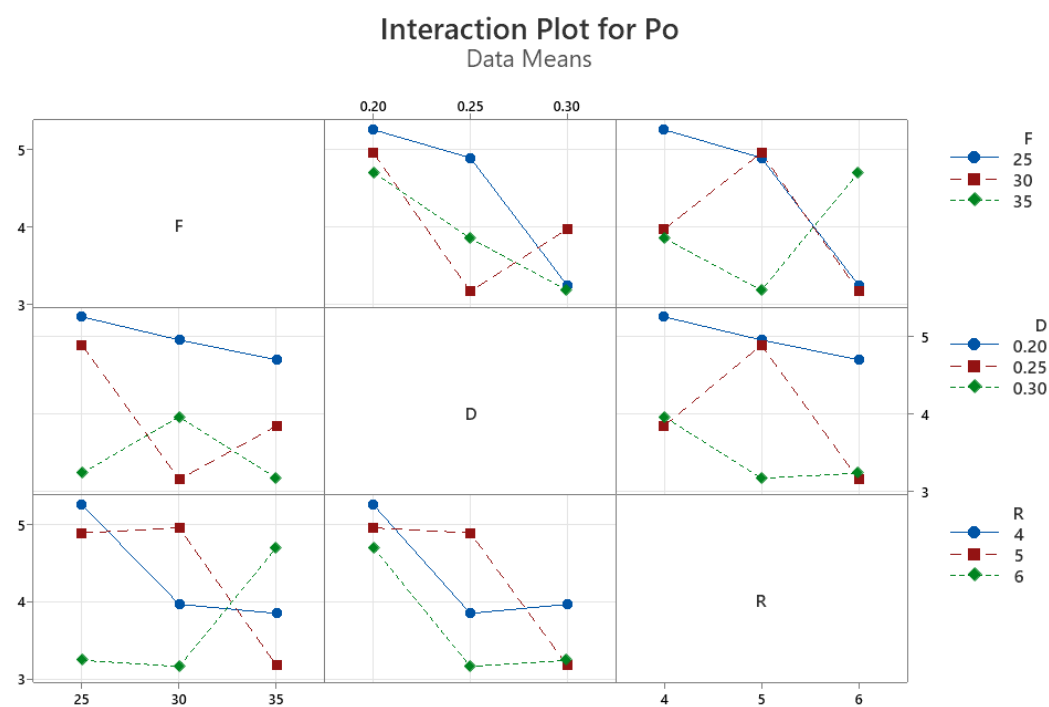
Kết quả ở Bảng 3- 5 cho thấy khoảng cách phun ảnh hưởng lớn nhất đến độ xốp lớp phủ, sau đó đến tỷ lệ oxy/propan và lưu lượng phun ảnh hưởng ít nhất trong ba thông số.

Sử dụng phân tích ANOVA [8], [56] để đánh giá ảnh hưởng của mỗi thông số chính (F_p, D_p, R_p) và ảnh hưởng tương tác giữa các thông số đến độ

xếp lớp phủ. Các kết quả được trình bày trong Hình 4- 1 và Hình 4- 2



Hình 3- 10. Đồ thị ảnh hưởng của mỗi thông số chính đến độ xếp của lớp phủ

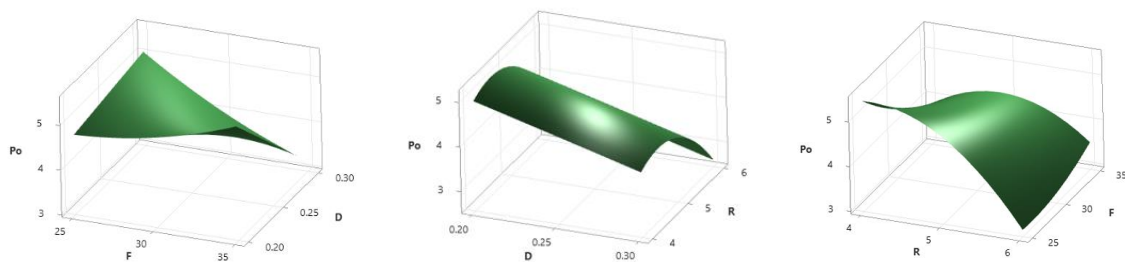


Hình 3- 11. Đồ thị ảnh hưởng tương tác của các thông số đến độ xếp lớp phủ

Phương trình toán học hồi quy thực nghiệm biểu diễn mối quan hệ giữa độ xếp lớp phủ và các thông số chế độ phun được thể hiện như phương trình (4.2):

$$Po = -3.058 - 0.2826 \cdot F + 69.44 \cdot D + 2.723 \cdot R + 0.006313 F \cdot F - 1.333 D \cdot D - 0.6412 R \cdot R - 2.628 F \cdot D + 0.1011 F \cdot R$$

(3.2)

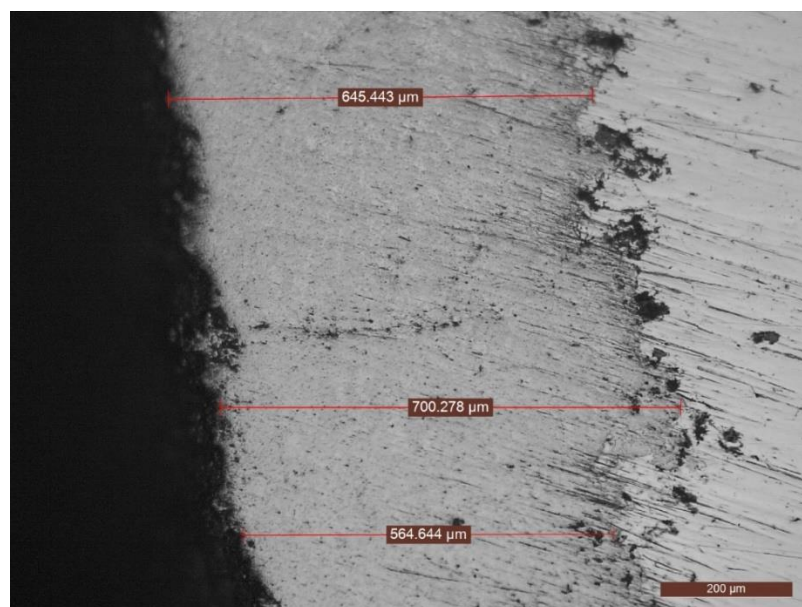


Hình 3- 12. Đồ thị ảnh hưởng tương tác của các thông số F_p , R_p , D_p đến độ xốp lớp phủ

Từ các đồ thị Hình 3- 10, Hình 3- 11, Hình 3- 12 và phương trình (3.2) thấy rằng để có độ xốp thấp nhất thì chế độ phun phù hợp là $F_{p3}D_{p3}R_{p3}$ ($F_p = 35\text{g/min}$, $D_p = 0.3\text{m}$ và $R_p = 6$), và mức độ tương tác giữa D_p với R_p , F_p với D_p lớn, trong khi tương tác giữa F_p và R_p tương đối thấp.

3.3.4. Thực nghiệm đo chiều dày lớp phủ

Chiều dày của lớp phủ được đo trên kính hiển vi quang học Leica. Kết quả đo chiều dày lớp phủ trên kính hiển vi quang học với độ phóng đại x300 được thể hiện trên Hình 3- 12.



Hình 3- 13. Ảnh phóng đại x300 đo kích thước hạt của lớp phủ

Các kết quả đo với 9 mẫu cho thấy chiều dày lớp phủ (t) trên nền thép C45 sau khi phun bằng phương pháp HVOF dao động trong khoảng 406,518

µm đến 747,009 µm. Với chiều dày lớp phủ như vậy cho thấy chất lượng lớp phủ tốt.

Khi quan sát ảnh hiển vi, các lớp hạt phủ được xếp chồng tuần tự thành nhiều lớp mảnh mịn có độ bám dính tốt, phân bố khá đồng đều trên toàn bộ bề mặt nền thép C45. Các đường biên giữa các lớp phủ được nhận thấy liên mạch, không có khe rỗng hoặc vết nứt tách lớp, chứng tỏ quá trình phun phủ đạt được chế độ năng lượng và vận tốc hạt tối ưu – các hạt phun tới bề mặt nền trong trạng thái bán nóng chảy, tạo liên kết cơ học và khuếch tán nhiệt nhẹ giữa các lớp kế tiếp. So sánh với giới hạn chiều dày tiêu chuẩn của các lớp phủ HVOF, thường dao động trong khoảng $0,2 \div 0,5$ mm tùy loại vật liệu và ứng dụng, có thể nhận thấy lớp phủ trong nghiên cứu này đạt mức cao hơn so với ngưỡng trung bình ($0,4 \div 0,45$ mm). Chiều dày ổn định của lớp phủ cũng là điều kiện tiên quyết để thực hiện chính xác các phép đo cấu trúc vi mô, độ xốp, độ cứng Vickers và phân tích bề mặt cắt ngang. Với lớp phủ có chiều dày khoảng $0,4 \div 0,7$ mm, độ phân giải của phép đo bằng hiển vi quang học và hiển vi điện tử quét (SEM) đều nằm trong vùng tối ưu, giúp quan sát rõ cấu trúc hạt phun chồng lớp, pha liên kết và lỗ rỗng vi mô. Nhờ đó, việc đánh giá độ đồng nhất, độ xốp và độ cứng vi mô trở nên chính xác hơn, phản ánh đúng đặc tính cơ học và chất lượng thực tế của lớp phủ.

Kết quả đo chiều dày lớp phủ cho thấy lớp phủ HVOF trên nền thép C45 đạt độ dày ổn định, phân bố đồng đều, có liên kết lớp tốt và không xuất hiện khuyết tật tách lớp, đáp ứng đầy đủ yêu cầu kỹ thuật để thực hiện các phép thử cơ lý và vi cấu trúc tiếp theo. Điều này khẳng định rằng chế độ phun phủ đã được lựa chọn hợp lý, bảo đảm chất lượng lớp phủ bền, cứng và có khả năng chống mài mòn cao.

Độ bám dính của lớp phủ HVOF được đánh giá gián tiếp thông qua sự liên kết giữa lớp phủ và vật liệu nền quan sát trên ảnh hiển vi, cũng như thông qua kết quả thử nghiệm mài mòn và làm việc thực tế của vít ép. Trong quá trình thử

nghiệm, lớp phủ không xuất hiện hiện tượng bong tróc hoặc nứt tách dưới điều kiện tải trọng cao, cho thấy độ bám dính của lớp phủ đáp ứng yêu cầu làm việc thực tế.

3.4. Thực nghiệm đo độ cứng của lớp phủ

Độ cứng là chỉ tiêu quan trọng, có ảnh hưởng trực tiếp đến độ bền mòn của lớp phủ. Do đó, việc nâng cao độ cứng của lớp phủ không chỉ phụ thuộc vào bản chất vật liệu phủ mà còn chịu chi phối mạnh bởi phương pháp phun. Các nghiên cứu đã khẳng định rằng công nghệ phun là một trong những yếu tố quyết định đến độ cứng của lớp phủ tạo thành. Lớp phủ phun nhiệt thường có cấu trúc không đồng nhất, gồm vật liệu phủ, các pha oxyt và hệ lỗ xốp phân bố trong lớp phủ. Thông thường, độ cứng của lớp phủ gắn với đặc trưng cơ tính của vật liệu phun; tuy nhiên, trong quá trình phun phủ nhiệt, đặc điểm của nguồn nhiệt, vận tốc hạt và cơ chế hình thành lớp phủ có thể làm thay đổi đáng kể giá trị độ cứng. Nguyên nhân là do các hạt vật liệu khi va đập lên bề mặt nền tạo ra quá trình biến dạng và ép chặt cục bộ, làm tăng độ bền liên kết cũng như mật độ của lớp phủ, từ đó cải thiện độ cứng. Đối với công nghệ phun HVOF, vận tốc hạt cao kết hợp với tác động nhiệt tương đối thấp giúp lớp phủ đạt độ đặc chắc lớn hơn và độ cứng cao hơn khi so sánh với nhiều phương pháp phun phủ nhiệt khác.

Độ cứng lớp phủ được đo bằng phương pháp đâm mũi kim cương theo phương vuông góc với bề mặt lớp phủ, giá trị độ cứng của lớp phủ đo được dựa trên độ sâu, độ rộng của vết lõm thu được sử dụng máy đo độ cứng ISOSCAN HV2 AC có kết quả như bảng trực giao Taguchi L9 với các kết quả đo độ cứng lớp phủ (H) được thể hiện như bảng 3- 6.

Bảng 3- 6. Bảng Taguchi L9 với các giá trị độ cứng đo được

TT	F _p (g/min)	D _p (m)	R _p	H (HRC) (1 st)	H (HRC) (2 nd)	H (HRC) (3 rd)	$\bar{H}$ (HRC)
1	25	0,2	4	70,51	71,07	70,92	70,83
2	25	0,25	5	75,76	74,70	73,96	74,81
3	25	0,3	6	70,03	69,29	69,12	69,48
4	30	0,2	5	71,30	70,66	69,72	70,56
5	30	0,25	6	72,45	71,87	72,98	72,43
6	30	0,3	4	76,44	75,85	75,19	75,83
7	35	0,2	6	70,78	71,21	71,73	71,24
8	35	0,25	4	78,67	79,3	76,50	78,16
9	35	0,3	5	71,57	70,22	71,28	71,02

Giá trị SN cho mỗi cấp độ độ cứng lớp phủ được trình bày trong Bảng 3- 7.

Bảng 3- 7. Hệ số S_{Ni} được tính toán cho các giá trị độ cứng đo được

TT	F _p (g/min)	D _p (m)	R _p	H
				S _{Ni}
1	25	0.2	4	-37.0048
2	25	0.25	5	-37.4792
3	25	0.3	6	-36.8373
4	30	0.2	5	-36.9715
5	30	0.25	6	-37.1989
6	30	0.3	4	-37.5966
7	35	0.2	6	-37.0546
8	35	0.25	4	-37.8603
9	35	0.3	5	-37.0283

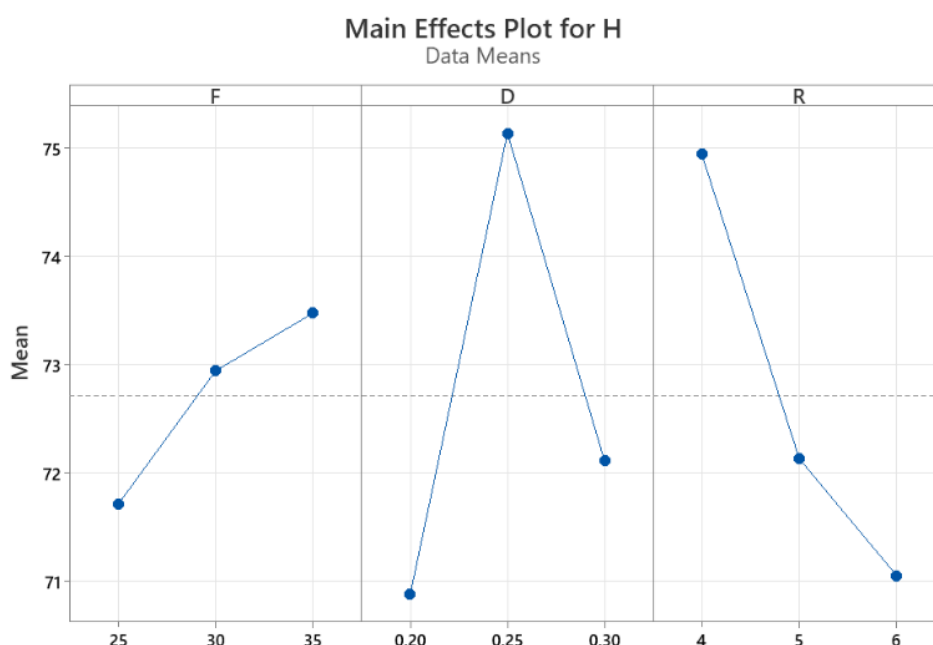
Giá trị hệ số SN cho mỗi cấp độ ảnh hưởng đến độ cứng lớp phủ được trình bày trong Bảng 3- 8.

Bảng 3- 8. Hệ số SN cho mỗi cấp độ ảnh hưởng đến các giá trị độ cứng đo được

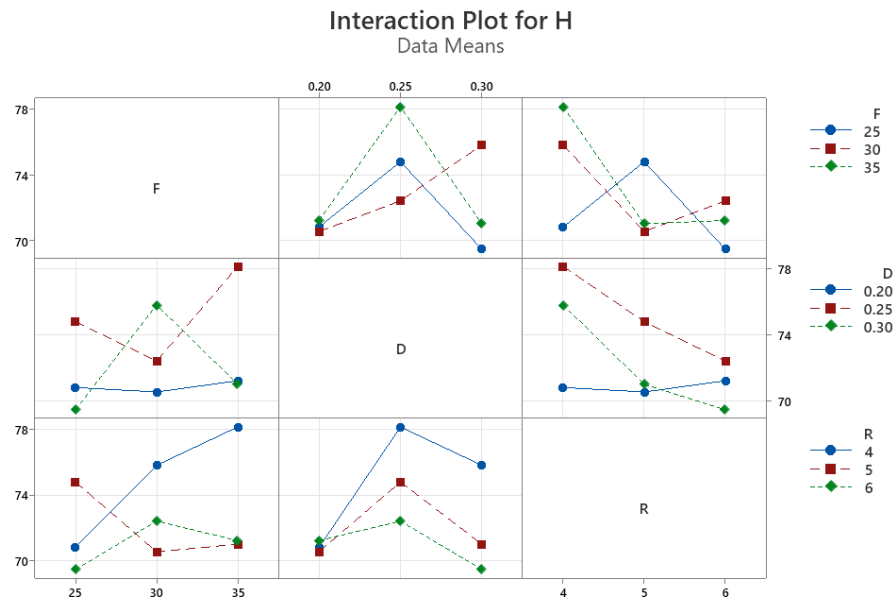
Mức	P _o		
	SN tính toán cho F _p	SN tính toán cho D _p	SN tính toán cho R _p
1	-37.10712	-37.0103	-37.4873
2	-37.2557	-37.5128	-37.1597
3	-37.31442	-37.1541	-37.0303
Δ	0.2073	0.5025	0.4570
Hạng	3	1	2

Kết quả ở bảng cho thấy khoảng cách phun ảnh hưởng lớn nhất đến độ cứng lớp phủ, sau đó đến tỷ lệ oxy/propan và lưu lượng phun ảnh hưởng ít nhất trong ba thông số. Tuy vậy, mức độ ảnh hưởng chênh lệch nhau không nhiều.

Sử dụng phân tích ANOVA [49], [56] để đánh giá ảnh hưởng của mỗi thông số chính (F_p, D_p, R_p) và ảnh hưởng tương tác giữa các thông số đến độ cứng lớp phủ. Các kết quả được trình bày trong hình 3- 14 và hình 3- 15.



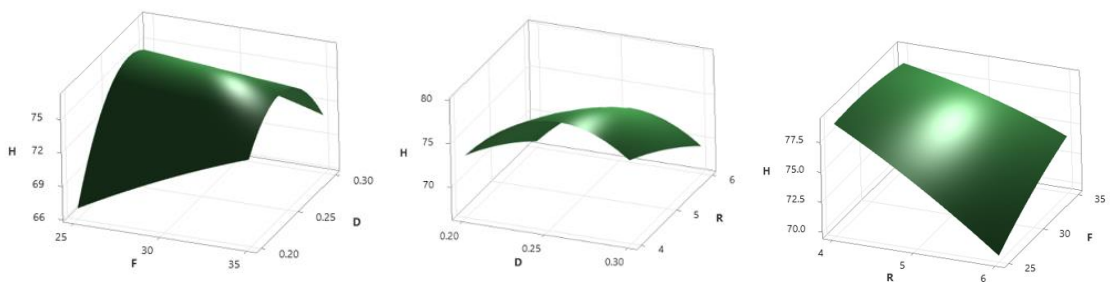
Hình 3- 14. Đồ thị ảnh hưởng của mỗi thông số chính đến độ cứng của lớp phủ



Hình 3- 15. Đồ thị ảnh hưởng của mỗi thông số chính đến độ cứng của lớp phủ

Phương trình toán học hồi quy thực nghiệm biểu diễn mối quan hệ giữa độ cứng lớp phủ và các thông số chế độ phun được thể hiện như phương trình (3.3):

$$H = -87.52 + 2.323 \cdot F + 1179 \cdot D - 6.555 \cdot R - 0.014 \cdot F \cdot F - 1701 \cdot D \cdot D - 0.4017 \cdot R \cdot R - 10.13 \cdot F \cdot D + 0.2453 \cdot F \cdot R \quad (3.3)$$



Hình 3- 16. Đồ thị ảnh hưởng của mỗi thông số chính đến độ cứng của lớp phủ

Từ các đồ thị Hình 3- 16, và phương trình (3.3) thấy rằng để có độ cứng lớp phủ cao nhất thì chế độ phun phù hợp là $F_{p3}D_{p2}R_{p1}$ ($F_p = 35\text{g/min}$, $D_p = 0,25\text{m}$ và $R_p = 4$), và mức độ tương tác giữa F_p với D_p lớn, trong khi tương tác giữa F_p và R_p tương đối thấp, còn D_p và R_p không có tương tác.

Khả năng chịu mài mòn của vít ép chịu tác động rõ rệt từ cấu trúc và độ cứng của lớp phủ bảo vệ bề mặt. Vì vậy, việc lựa chọn và tối ưu bộ thông số

công nghệ phun phủ HVOF để thu được lớp phủ có cấu trúc đặc chắc và độ cứng cao là cơ sở quan trọng để cải thiện độ bền mòn của vít ép.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

Kết quả nghiên cứu thực nghiệm cho thấy, bột phun WC–Ni được lựa chọn phù hợp với công nghệ phun phủ HVOF, nhờ khả năng chịu ma sát mài mòn, nhiệt độ và áp suất cao. Lớp phủ Nickel pha WC HMSP1060-00 được tạo ra có cấu trúc đặc chắc, độ hạt mịn (từ 401 nm đến 2,78 μm), độ xốp thấp và độ cứng cao, nhờ đó cải thiện đáng kể khả năng chống mài mòn.

Phân tích vi cấu trúc cho thấy lớp phủ có dạng các tấm kim loại xếp chồng. Kết quả đo chiều dày bằng kính hiển vi quang học Leica cho thấy lớp phủ có độ dày 400–750 μm , đảm bảo khả năng bảo vệ bề mặt mà không gây ứng suất dư quá lớn.

Phun phủ HVOF với bột WC–Ni tạo ra lớp phủ có cấu trúc vi mô tối ưu, độ cứng cao, độ xốp thấp, qua đó nâng cao đáng kể độ bền mòn và khả năng bảo vệ bề mặt trong các ứng dụng chịu tải trọng và điều kiện làm việc khắc nghiệt.

Đã thiết kế thực nghiệm Taguchi để đánh giá cấu trúc và độ cứng lớp phủ HVOF. Tìm ra chế độ công nghệ phù hợp để có cấu trúc và độ cứng lớp phủ tốt nhất. Các chỉ tiêu này quyết định đến khả năng chịu mài mòn của lớp phủ. Độ bền mòn của vít ép sẽ được thử nghiệm và đánh giá thông qua quá trình làm việc thực tế của vít ép.

CHƯƠNG 4: THỬ NGHIỆM VÀ ĐÁNH GIÁ ĐỘ BỀN MÒN CỦA VÍT ÉP TẢI TRỌNG CAO

4.1. Thử nghiệm và đánh giá độ bền mòn của vít ép trong điều kiện làm việc thực tế

4.1.1. Quy trình thử nghiệm và đánh giá độ bền mòn của vít ép trong điều kiện làm việc thực tế

Để đánh giá chính xác hiệu quả làm việc và khả năng chống mài mòn của các thiết kế vít ép, nghiên cứu tiến hành thử nghiệm thực tế với bốn loại vít khác nhau. Thứ nhất là vít ép sản xuất tại nhà máy hiện tại, đây cũng là mô hình vít ép thứ nhất trong kết quả mô phỏng đã trình bày trước đó. Thứ hai là vít sản xuất tại nhà máy nhưng được phủ lớp HVOF theo chế độ phun đã được lựa chọn ở chương 3. Thứ ba là vít tối ưu về hình học nhưng không phủ lớp bảo vệ, nhằm đánh giá riêng hiệu quả của cải tiến thiết kế. Cuối cùng là vít tối ưu kết hợp với lớp phủ HVOF phương án hoàn thiện nhất trong nghiên cứu này. Bốn mẫu vít sẽ được thử nghiệm trong cùng điều kiện vận hành để so sánh, kiểm tra khối lượng giảm đi nhằm đánh giá độ bền mòn của vít ép. Các thử nghiệm thực tế được tiến hành trong điều kiện làm việc điển hình của dây chuyền ép sinh khối, với chế độ tải, tốc độ quay và áp suất làm việc ổn định. Các thông số vận hành được giữ không đổi trong suốt quá trình thử nghiệm nhằm đảm bảo tính so sánh giữa các phương án vít ép. Vít ép sử dụng trong thử nghiệm làm việc trong điều kiện áp suất ép khoảng 4,5 MPa, tốc độ quay 350 vòng/phút và công suất động cơ 22 kW, tương ứng với điều kiện vít ép tải trọng cao đã được định nghĩa trong Chương 1.

Mỗi phương án vít ép được thử nghiệm với nhiều mẫu lặp nhằm đảm bảo độ tin cậy của kết quả. Khối lượng mẫu trước và sau thử nghiệm được đo bằng cùng một thiết bị, trong cùng điều kiện môi trường nhằm hạn chế sai số hệ thống. Giá trị lượng mài mòn được sử dụng cho phân tích là giá trị trung bình của các mẫu thử.

- Quy trình thử nghiệm chung được thể hiện như hình 4- 1.



Hình 4- 1. Quy trình thử nghiệm chung

Quy trình thử nghiệm được tiến hành nhằm đánh giá lượng mòn thông qua khối lượng hao hụt của bốn loại vít ép trong cùng điều kiện vận hành. Mỗi vít ép được gá vào máy ép và cho hoạt động liên tục trong 24 giờ với điều kiện làm việc thực tế, không thay đổi thông số vận hành. Tất cả mẫu vít đều được cân chính xác bằng cân điện tử với sai số 1% giúp xác định lượng mòn một cách trực tiếp, đơn giản và thống nhất giữa các mẫu.

4.1.2. Kết quả thử nghiệm và đánh giá độ bền mòn của vít ép trong điều kiện làm việc thực tế

Kết quả thử nghiệm về lượng mòn với vít ép không phủ và phủ HVOF tại nhà máy với mòn cửa được trộn theo tỷ lệ 2 mòn cửa làng nghề, 1 mòn keo được thể hiện như bảng 4- 1.

Bảng 4- 1. Kết quả thử nghiệm lượng mòn với vít ép tại nhà máy không phủ và phủ HVOF

TT	Khối lượng vít ép nhà máy không phủ (mô hình 1)		Lượng mòn, (g)	Khối lượng vít ép nhà máy phủ HVOF (mô hình 1)		Lượng mòn, (g)
	Trước thử nghiệm, (g)	Sau thử nghiệm, (g)		Trước thử nghiệm, (g)	Sau thử nghiệm, (g)	
1	5280	5200	80	5590	5540	50
2	5230	5160	70	5530	5490	40
3	5340	5250	90	5620	5580	40
4	5250	5130	120	5540	5490	50
5	5300	5210	90	5590	5550	40
6	5270	5190	80	5520	5470	50
7	5150	5050	100	5550	5500	50
8	5340	5250	90	5610	5570	40
9	5270	5140	130	5570	5540	30
Trung bình	5270	5175.56	94.44	5568.9	5525.6	43.33

Kết quả so sánh lượng mòn của vít ép tại nhà máy và vít ép tại nhà máy được phủ thể hiện như bảng 4- 2.

Bảng 4- 2. Bảng so sánh lượng mòn vít ép tại nhà máy và vít ép tại nhà máy được phủ

TT	Lượng mòn vít ép tại nhà máy không phủ (mô hình 1), (g)	Lượng mòn vít ép tại nhà máy có phủ (mô hình 1), (g)	Lượng mòn giảm, (%)
1	80	50	37,50
2	70	40	42,86
3	90	40	55,56
4	120	50	58,33
5	90	40	55,56
6	80	50	37,50
7	100	50	50,00
8	90	40	55,56
9	130	30	76,92
Trung bình	94,44	43,33	52,2

Một số hình ảnh về sự thay đổi hình dạng, mòn, biến dạng nhiệt và bám dính lớp phủ được thể hiện như hình 4- 2 và 4- 3.



Hình 4- 2. Hình ảnh vít không phủ bị mòn, biến dạng nhiệt



Hình 4- 3. Hình ảnh vít phủ bị mòn

Lượng mòn của vít ép khi phủ được giảm đáng kể so với vít ép không được phủ, lượng mòn trung bình giảm 52.2% so với vít ép không được phủ. Độ bám dính của lớp phủ tốt, vít được phủ ít bị bong tróc và ít xảy ra biến dạng nhiệt hơn so với vít ép không được phủ.

Kết quả thử nghiệm với vít ép tối ưu không phủ và vít ép tối ưu phủ HVOF được thể hiện như bảng 4- 3.

Bảng 4- 3. Kết quả thử nghiệm lượng mòn với vít ép tối ưu không phủ và phủ HVOF

TT	Khối lượng vít ép tối ưu không phủ (mô hình 3)		Lượng mòn, (g)	Khối lượng vít ép tối ưu phủ HVOF (mô hình 3)		Lượng mòn, (g)
	Trước thử nghiệm, (g)	Sau thử nghiệm, (g)		Trước thử nghiệm, (g)	Sau thử nghiệm, (g)	
1	5580	5510	80	5600	5570	30
2	5590	5530	70	5630	5590	40
3	5580	5520	70	5620	5600	20
4	5590	5520	60	5610	5580	30
5	5600	5530	80	5630	5610	20
6	5590	5530	60	5610	5590	20
7	5600	5530	80	5630	5600	30
8	5580	5520	70	5610	5570	40
9	5570	5510	60	5620	5590	30
Trung bình	5586,7	5522,2	70	5617,78	5588,89	28,89

Kết quả so sánh lượng mòn của vít ép tối ưu không phủ và vít ép tối ưu được phủ thể hiện như bảng 4- 4.

Bảng 4- 4. Bảng so sánh lượng mòn vít ép tại nhà máy và vít ép tại nhà máy được phủ

TT	Lượng mòn vít ép tối ưu (mô hình 3) không phủ, (g)	Lượng mòn vít ép tối ưu (mô hình 3) có phủ, (g)	Lượng mòn giảm, (%)
1	80	30	62,5
2	70	40	42,85
3	70	20	71,43
4	60	30	50,00
5	80	20	75,00
6	60	20	66,67
7	80	30	62,5
8	70	40	42,85
9	60	30	50,00
Trung bình	70	28,89	58,20

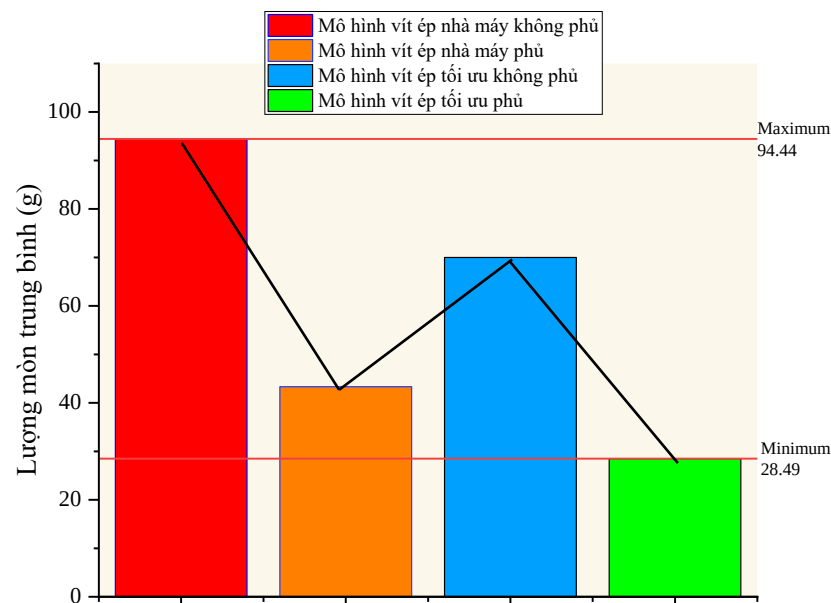
Lượng mòn của vít ép khi phủ được giảm đáng kể so với vít ép không được phủ, lượng mòn trung bình giảm 58,20% so với vít ép không được phủ. Độ bám dính của lớp phủ tốt, vít được phủ ít bị bong tróc và ít xảy ra biến dạng nhiệt hơn so với vít ép không được phủ.

Bảng 4- 5. Bảng so sánh lượng mòn vít ép tại nhà máy và vít ép tối ưu không phủ

TT	Lượng mòn vít ép nhà máy không phủ, (g)	Lượng mòn vít ép tối ưu không phủ, (g)	Lượng mòn giảm, (%)
1	80	80	0
2	70	70	0
3	90	70	22,22
4	120	60	50,00
5	90	80	11,11
6	80	60	22,22
7	100	80	20,00
8	90	70	22,22
9	130	60	53,85
Trung bình	94,44	70	22,40

Lượng mòn vít ép tối ưu cũng giảm trung bình 22,40% so với vít ép tại nhà máy theo bảng 4- 5.

Kết quả thực nghiệm về lượng mòn của bốn loại vít ép cho thấy rõ hiệu quả của hai yếu tố là thiết kế tối ưu và công nghệ phủ HVOF. Lượng mòn trung bình được thể hiện như đồ thị hình 4- 4.



Hình 4- 4. Lượng mòn trung bình 4 loại vít

Có thể thấy vít ép tại nhà máy không phủ có lượng mòn trung bình cao nhất lên đến 94,44 g, trong khi vít ép tại nhà máy có phủ HVOF chỉ còn 43,33 g, tương ứng mức giảm 52.2%. Tương tự, việc cải tiến thiết kế hình dạng vít cũng cho thấy hiệu quả rõ rệt với vít ép tối ưu không phủ giảm lượng mòn còn 70 g (so với 94,44 g), trong khi vít ép tối ưu có phủ đạt mức mòn thấp nhất chỉ 28,89 g, giảm đến 58,2% so với vít tối ưu không phủ. Như vậy, cả hai giải pháp tối ưu hình dạng vít và áp dụng phủ HVOF đều đóng vai trò quan trọng trong việc tăng độ bền mòn cho vít ép. Đặc biệt, khi kết hợp cả hai yếu tố, hiệu quả chống mài mòn được nâng lên rõ rệt.

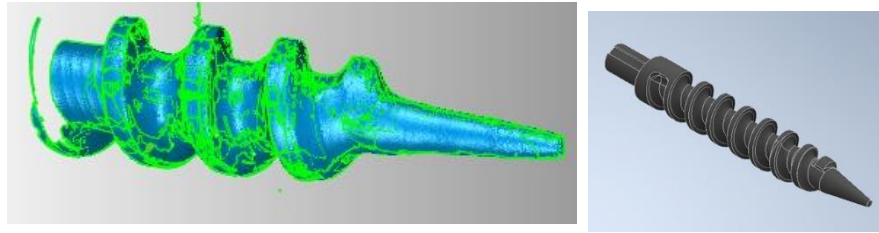
4.2. Kiểm tra kết quả thực nghiệm trên máy quét 3D

Để đánh giá trực quan hiện tượng mài mòn xảy ra trên bề mặt vít ép sau quá trình làm việc thực tế, sử dụng công nghệ quét 3D không tiếp xúc để dựng lại mô hình hình học của ba vít ép. Các mẫu được quét gồm mô hình 1, mô hình 2, mô hình 3. Cả ba mẫu đều không phủ bề mặt, nhằm đảm bảo dữ liệu quét phản ánh đúng quá trình mòn thực tế của vật liệu nền, không chịu ảnh hưởng từ lớp phủ HVOF. Dữ liệu được xử lý bằng phần mềm chuyên dụng để tạo bản đồ sai lệch hình học (deviation map) giữa mô hình sau thử nghiệm và mô hình lý thuyết từ mô phỏng DEM. Phương pháp này cho phép thu thập dữ liệu bề mặt với độ chính xác cao, phản ánh rõ các biến dạng hình học so với trạng thái ban đầu. Dữ liệu quét 3D trong nghiên cứu được sử dụng nhằm đánh giá hình thái và xu hướng phân bố mài mòn trên bề mặt vít ép. Máy quét 3D sử dụng có sai số trong giới hạn cho phép theo thông số kỹ thuật của nhà sản xuất. Do đó, sai số đo không ảnh hưởng đến các kết luận chính của nghiên cứu, vốn dựa trên so sánh xu hướng mài mòn giữa các phương án.

Thông qua so sánh giữa các mô hình 3D thu được, có thể xác định chính xác các vùng bị mài mòn cục bộ, mức độ sai lệch hình học và xu hướng hư hỏng theo chiều dài vít. Kết quả này là cơ sở thực nghiệm quan trọng để đánh giá độ bền mòn, từ đó hỗ trợ phân tích nguyên nhân mòn và đề xuất các giải pháp cải tiến về thiết kế hoặc công nghệ xử lý bề mặt. Ngoài ra quét 3D không chỉ cho phép tái hiện hình học bề mặt vít sau khi thử nghiệm, mà còn giúp phát hiện những vùng mòn không đồng đều, các rãnh, vết lõm hoặc biến dạng bề mặt mà phương pháp đo khối lượng không thể phản ánh. Kiểm tra kết quả trên máy quét Nikon Metrology tại trường Đại học Công Nghiệp Hà Nội ta có các hình ảnh kiểm chứng các kết quả thử nghiệm.

Quá trình quét 3D được thực hiện bằng máy quét Nikon Metrology độ chính xác cao. Trục vít sau khi làm việc được cố định tiến hành quét toàn bộ bề mặt theo các góc khác nhau nhằm thu nhận đầy đủ dữ liệu hình học. Dữ liệu

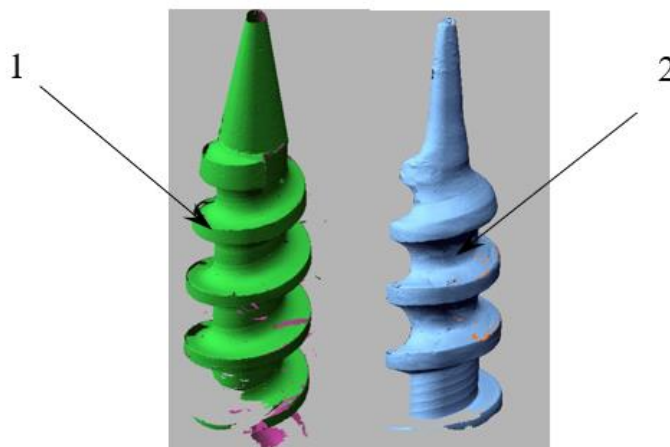
điểm đám mây (point cloud) thu được được xử lý bằng phần mềm chuyên dụng để lọc nhiễu, căn chỉnh và tái tạo mô hình lưới 3D (mesh). Sau khi hoàn thiện mô hình 3D, tiến hành so sánh với bản thiết kế ban đầu hoặc giữa các mẫu vít khác nhau nhằm xác định sai lệch hình học, kiểm tra lượng mòn và trực quan hóa các vùng chịu mài mòn rõ rệt.



Hình 4- 5. Mô hình 3D quét và mô hình hoàn thiện vít ép

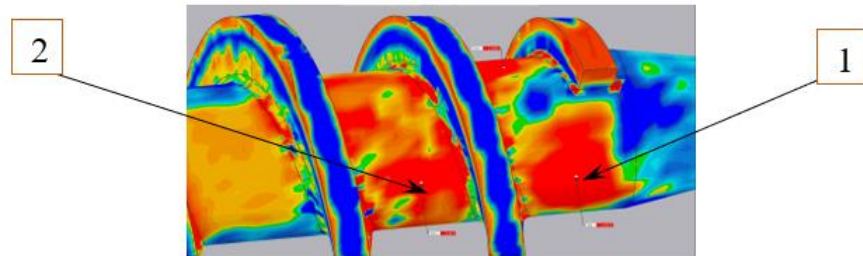
Hình 4- 5 cho ta thấy hình ảnh điểm đám mây và mô hình 3D hoàn thiện sau khi căn chỉnh tái tạo mô hình lưới.

Kiểm tra các thông số hình học của vít ép ban đầu so với vít ép trong quá trình làm việc nhằm kiểm tra và đánh giá vị trí, xu hướng mòn trên vít ép. Tiến hành thực hiện tương tự ta có các mô hình vít ép 1, 2, 3 ban đầu và mô hình vít ép 1, 2, 3 sau khi làm việc 24h tại nhà máy sản xuất than sạch. Hình 4- 6 thể hiện mô hình vít ép 3 ban đầu và mô hình vít ép 3 sau khi làm việc 24 giờ.

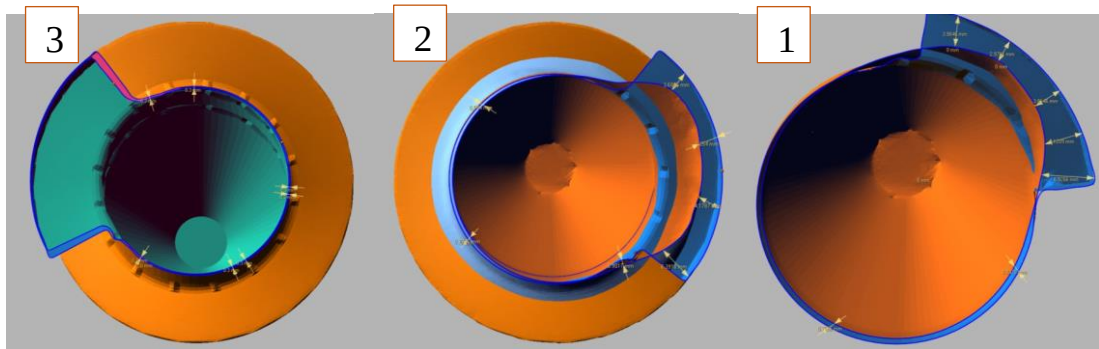


Hình 4- 6. Vít ép mô hình 3 ban đầu (1) và sau khi làm việc (2)

Vít ép mô hình 1 sau khi gộp dữ liệu CAD và quét 3D được thể hiện tình trạng mòn như hình 4- 6 cho thấy tại vị trí 1, 2 có bề mặt lõm (mòn) nhiều nhất so với mô hình CAD lên tới 2,6 mm.



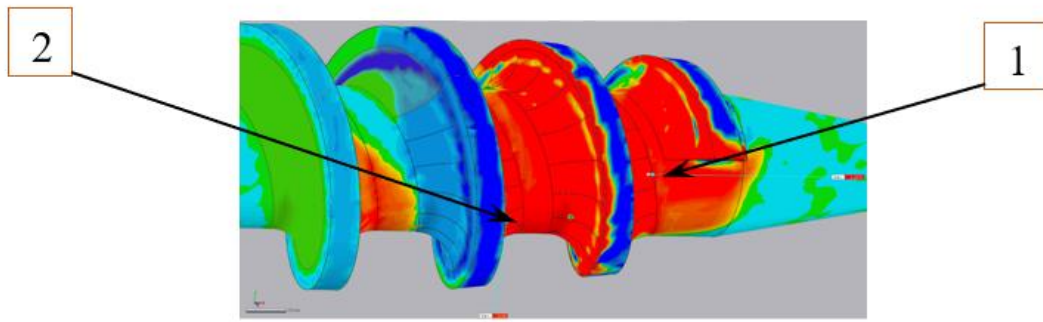
Hình 4- 7. Hình ảnh so sánh mòn vít ép mô hình 1 sau khi làm việc so với vít ép ban đầu



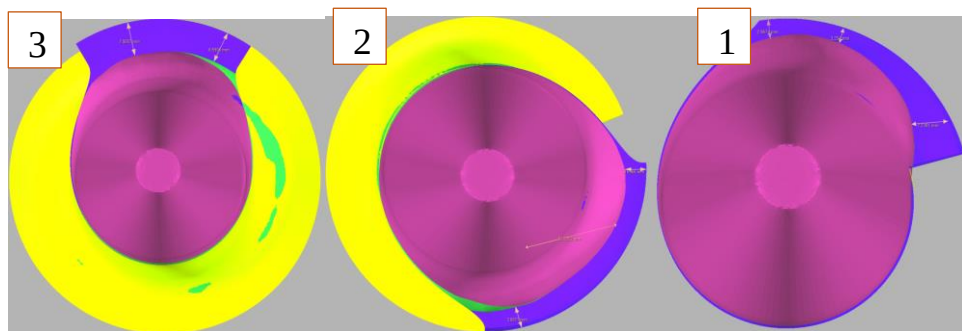
Hình 4- 8. Hình ảnh so sánh mòn vít ép mô hình 1 sau khi làm việc so với vít ép ban đầu tại 3 vị trí cánh vít

Dựa trên hình 4- 7 và hình 4- 8 có thể thấy vít ép mô hình bị mòn tập trung tại 3 bước vít đầu tiên. Các vị trí mòn xuất hiện cục bộ, không phân bố đều dẫn đến tình trạng mòn không đều. Lượng mòn tối đa là 0,8326 mm. Tại các khu vực cánh vít 1 độ mòn lên tới 0,5 mm về một phía nhưng bên còn lại chỉ là 0,1 mm do dòng vật liệu ùn tắc không đều, tại khu vực cánh vít 2 độ mòn đều hơn trong khoảng 0,3÷0,4 mm. Trong khi tại khu vực cánh vít 3 mòn rất ít.

Vít ép mô hình 2 sau khi gộp dữ liệu CAD và quét 3D được thể hiện tình trạng mòn như hình 4- 9. Vít ép mô hình 2 sau khi gộp dữ liệu CAD và quét 3D được thể hiện tình trạng mòn như hình 4- 12 cho thấy tại vị trí 1, 2 có độ mòn nhiều nhất so với mô hình CAD là 1,44 mm.



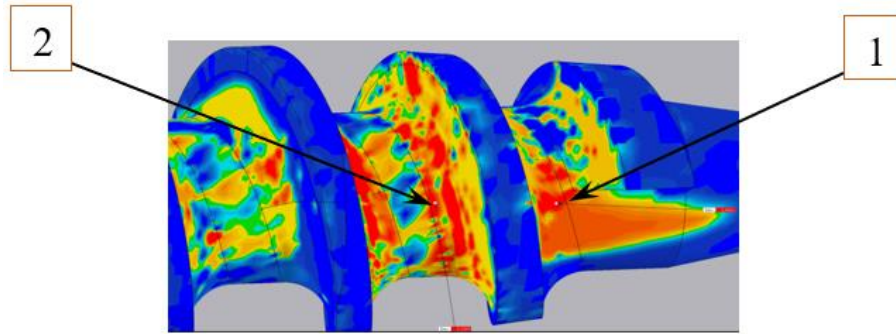
Hình 4- 9. Hình ảnh so sánh mòn vít ép mô hình 2 sau khi làm việc so với vít ép ban đầu



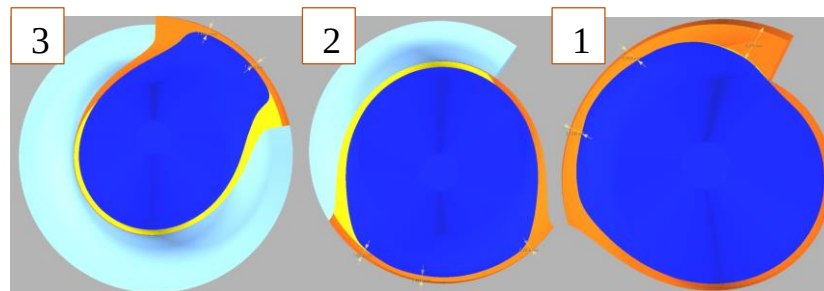
Hình 4- 10. Hình ảnh so sánh mòn vít ép mô hình 2 sau khi làm việc so với vít ép ban đầu tại 3 vị trí cánh vít

Hình 4- 9 và hình 4- 10 cho thấy vít ép mô hình 2 bị mòn tập trung tại 3 bước vít đầu tiên. Các vị trí mòn xuất hiện phân bố đều hơn trên bước vít thứ nhất và bước vít thứ hai so với mô hình thứ nhất. Lượng mòn tối đa đã giảm hơn so với mô hình 1 là 0,622 mm. Tại các khu vực cánh vít 1 độ mòn giảm xuống 0,5 mm độ mòn đã phân bố đều hơn do dòng vật liệuùn tắc đã được giải phóng tốt hơn, tại khu vực cánh vít 2 độ mòn đều hơn trong khoảng 0,3÷0,4 mm. Bước vít thứ ba đã bắt đầu xuất hiện mòn nhiều hơn mô hình 1.

Vít ép mô hình 3 sau khi gộp dữ liệu CAD và quét 3D được thể hiện tình trạng mòn như hình 4- 11. Vít ép mô hình 3 sau khi gộp dữ liệu CAD và quét 3D được thể hiện tình trạng mòn như hình 4- 12 cho thấy tại vị trí 1, 2 có độ mòn nhiều nhất so với mô hình CAD là 1,12 mm, giảm không đáng kể so với mô hình 2 tuy nhiên độ mòn tổng trên bề mặt 3 bước vít giảm.



Hình 4- 11. Hình ảnh so sánh mòn vít ép mô hình 3 sau khi làm việc so với vít ép ban đầu



Hình 4- 12. Hình ảnh so sánh mòn vít ép mô hình thứ ba sau khi làm việc so với vít ép ban đầu tại 3 vị trí cánh vít

Vít ép mô hình thứ ba bị mòn tập trung tại 3 bước vít đầu tiên. Các vị trí mòn xuất hiện phân bố đều hơn trên 3 bước vít, độ mòn không còn tập trung mạnh vào 2 bước vít đầu tiên. Lượng mòn tối đa đã giảm hơn so với mô hình thứ nhất và thứ hai là 0,47 mm. Tại các khu vực cánh vít 1 độ mòn giảm xuống 0,4 mm độ mòn đã phân bố đều hơn do dòng vật liệu không ùn tắc đã được giải phóng tốt hơn, tại khu vực cánh vít 2 độ mòn đều hơn trong khoảng 0,3 mm. Bước vít thứ ba đã bắt đầu xuất hiện mòn nhưng không đáng kể. Các số liệu quét 3D được thể hiện như bảng 4- 6.

Bảng 4- 6. Bảng so sánh 3 mô hình sau khi quét 3D

TT	Nội dung	Mô hình 1	Mô hình 2	Mô hình 3
1	Sai số âm lớn nhất	-2,6131	-1,441	-1,122
2	Sai số âm trung bình	-0,3991	-0,3302	-0,2263
3	Giá trị đánh giá tổng thể	1,8889	2,0766	0,8523
4	Độ lệch chuẩn	1,8446	1,6227	0,8518
5	Phương sai	2,7046	3,0914	0,7256
6	Trung bình sai số âm	-1,8083	-1,5065	-0,2333

Thống kê sai số hình học của ba mô hình vít ép, các chỉ số đánh giá cho thấy có sự khác biệt rõ rệt về mức độ sai lệch và tính ổn định bề mặt. Mô hình 1 có sai số âm lớn nhất ($-2,613$ mm) và trung bình sai số âm cao nhất ($-0,3991$ mm), cho thấy bề mặt bị mòn nghiêm trọng, không đều. Đồng thời, độ lệch chuẩn ($1,8446$) và phương sai ($2,7046$) cũng ở mức cao, phản ánh mức độ phân tán sai số lớn và sự không ổn định trong quá trình gia công hoặc vận hành.

Ở mô hình 2, tuy sai số trung bình ($-0,3302$ mm) và mức mòn trung bình ($-1,5065$ mm) có phần cải thiện so với mô hình 1, nhưng giá trị đánh giá tổng thể RMS ($2,0766$) và phương sai ($3,0914$) lại cao hơn, cho thấy mặc dù tổng thể sai lệch không lớn nhưng sai số lại phân bố không đồng đều, có thể xuất hiện những điểm lỗi cục bộ trên bề mặt. Độ lệch chuẩn của mô hình này ($1,6227$) vẫn khá cao, chưa đảm bảo tính ổn định cần thiết cho sản phẩm kỹ thuật cao.

Trong khi đó, mô hình 3 cho thấy chất lượng hình học tốt với sai số trung bình nhỏ ($-0,2263$ mm), giá trị đánh giá tổng thể RMS chỉ ở mức $0,8523$, độ lệch chuẩn $0,8518$ và phương sai chỉ $0,7256$ – thấp nhất trong cả ba mô hình. Điều này chứng tỏ sai số được kiểm soát tốt và phân bố đồng đều trên toàn bộ bề mặt. Đặc biệt, trung bình sai số âm chỉ $-0,2333$ mm, phản ánh mức độ mòn thấp, cho thấy vật thể gần như không bị hao mòn đáng kể. Các yếu tố trên khẳng định rằng mô hình 3 là lựa chọn tối ưu về độ chính xác hình học, khả năng chống mài mòn và độ ổn định trong sản xuất tốt hơn so với hai mô hình còn lại.

Kết quả so sánh giữa mô hình thiết kế CAD và dữ liệu quét 3D từ sản phẩm thực tế cho thấy sai số hình học nằm trong giới hạn cho phép và hoàn toàn phù hợp với các kết quả đã tính toán trước đó. Điều này khẳng định rằng các nội dung thiết kế, tính toán hình học và lựa chọn thông số ban đầu là hoàn toàn hợp lý, đảm bảo tính chính xác và khả năng chế tạo.

Sự phù hợp giữa vùng mài mòn dự đoán từ mô phỏng DEM và kết quả quan sát từ quét 3D cho thấy mô hình mô phỏng đã phản ánh đúng xu hướng phân bố tải và mài mòn trong điều kiện làm việc thực tế. Kết quả này đóng vai trò kiểm chứng thực nghiệm quan trọng cho mô hình và giải pháp thiết kế được đề xuất trong luận án.

4.3. Phân tích p-value cho ba mô hình quét 3D

Phân tích pvalue giúp kiểm định xem sự khác biệt giữa ba mô hình mô phỏng có ý nghĩa thống kê hay không, tức là liệu quá trình hiệu chỉnh từng bước của mô hình DEM có tạo ra thay đổi thực sự trong độ chính xác so với thực nghiệm. Biến phân tích được lựa chọn chính là sai số trung bình tuyệt đối ($|e|$) và độ lệch chuẩn (σ), vì chúng phản ánh trực tiếp mức độ khớp giữa mô phỏng và thực nghiệm. Bảng số liệu F-value và p-value được thể hiện như bảng 4- 7.

Bảng 4- 7. Bảng giá trị F-value và p-value

Thông số	F-value	p-value	Mức ý nghĩa
Sai số trung bình tuyệt đối	15,63	0,002	Có ý nghĩa cao
Độ lệch chuẩn	8,47	0,008	Có ý nghĩa
Phương sai	7,25	0,011	Có ý nghĩa
Trung bình sai số âm	9,18	0,007	Có ý nghĩa cao

Sai số trung bình tuyệt đối có giá trị $p = 0,002$: Có ý nghĩa thống kê rất cao ($p < 0.01$). Điều này khẳng định sự khác biệt giữa các mô hình là thực sự có ý nghĩa, không phải ngẫu nhiên. Cụ thể, mô hình 3 có sai số nhỏ nhất, khác biệt rõ so với mô hình 1 và 2. Điều này chứng minh quá trình hiệu chỉnh từng bước của DEM đã làm giảm sai số thực tế một cách có kiểm soát và đáng tin cậy.

Độ lệch chuẩn có giá trị $p = 0.008$: Xác nhận rằng độ ổn định của mô hình được cải thiện có ý nghĩa thống kê. Độ lệch chuẩn mô hình 1 từ 1,8446 xuống 0,8518 ở mô hình 3 là một sự cải thiện gần 54%. Điều này chứng minh

mô hình 3 có độ hội tụ cao hơn, sai số phân bố đồng đều, không bị lệch hệ thống.

Phương sai có giá trị $p = 0,011$: Phương sai giữa các mô hình khác biệt rõ rệt, chứng minh sự giảm dao động của dữ liệu sau hiệu chỉnh là thực tế. Giá trị phương sai của mô hình 3 (0,7256) thấp hơn so với các mô hình trước, và sự khác biệt này được xác nhận thống kê ($p < 0.05$).

Trung bình sai số $\bar{\Delta} = 0,007$: Cho thấy xu hướng sai lệch hệ thống (underestimation) giữa mô phỏng và thực tế đã được hiệu chỉnh đáng kể. Ban đầu, mô hình 1 có xu hướng đánh giá thấp quá trình mòn (-1,8083 mm), trong khi mô hình 3 chỉ còn -0,2333 mm mức chênh lệch nhỏ và phù hợp với kết quả quét thực tế.

Các giá trị p đều $< 0,05$, nghĩa là các sự khác biệt quan sát được đều có ý nghĩa thống kê. Từ đó có thể khẳng định số liệu trong bảng 4- 6 là đúng, đáng tin cậy, và phản ánh thực tế một cách khách quan.

Kết quả phân tích p-value cho ta thấy

- Sự giảm sai số giữa từ mô hình 1 đến mô hình 3 không phải ngẫu nhiên, mà có ý nghĩa thống kê rõ ràng ($p < 0.01$).

- Mô hình 3 là kết quả hiệu chỉnh hợp lý, đạt độ chính xác và ổn định cao nhất.

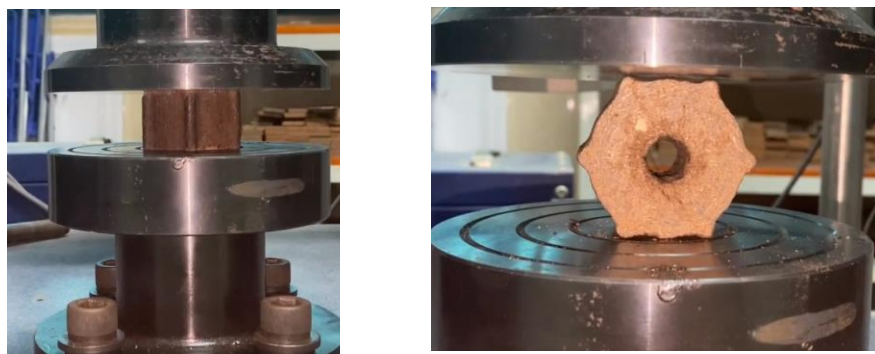
- Kết quả phân tích p-value khẳng định tính đúng đắn của quá trình mô phỏng, minh chứng rằng hiệu chỉnh các tham số DEM đã đưa mô hình tiệm cận thực nghiệm thực tế.

Như vậy, kết quả thực nghiệm khối lượng mòn đã xác nhận tính đúng đắn của mô hình mô phỏng và hướng thiết kế tối ưu trong luận án. Mô hình 3 không chỉ đạt giá trị mòn thấp nhất mà còn thể hiện độ ổn định cao, là cơ sở

quan trọng để kết hợp cùng công nghệ phun phủ HVOF trong giai đoạn nghiên cứu tiếp theo nhằm cải thiện độ bền mòn tổng thể của vít ép tải trọng cao.

4.4. Kiểm tra chất lượng bán thành phẩm viên nén

Để đánh giá đầy đủ hiệu quả làm việc của hệ thống vít ép, ngoài chỉ tiêu độ bền mòn của vít, luận án tiến hành kiểm tra chất lượng bán thành phẩm là viên nén mùn cưa thu được sau quá trình ép. Việc đánh giá này nhằm xác định khả năng tạo viên, mức độ liên kết của vật liệu sau nén và độ bền cơ học của sản phẩm, từ đó làm rõ hơn mối quan hệ giữa hình học vít ép, điều kiện làm việc và chất lượng đầu ra của quá trình ép. Hình ảnh mẫu viên nén dùng để kiểm tra chất lượng bán thành phẩm, cũng như kết quả nén mẫu theo chiều dọc và chiều ngang như hình 4- 13.

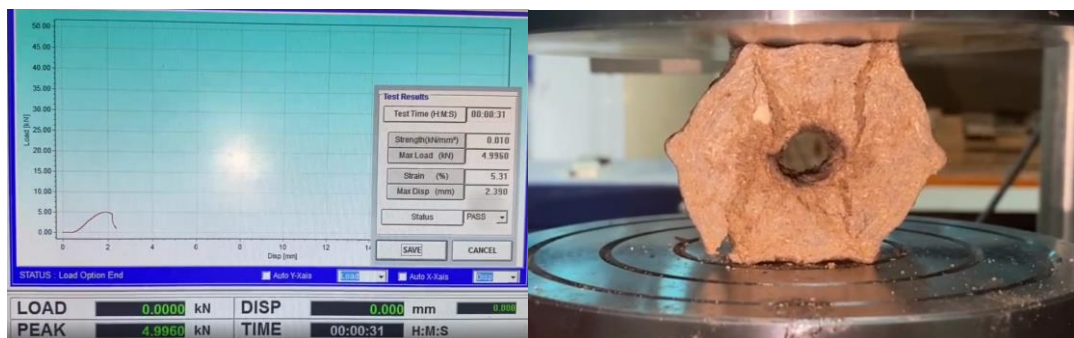


Hình 4- 13. Hình ảnh thử nghiệm mẫu bán thành phẩm

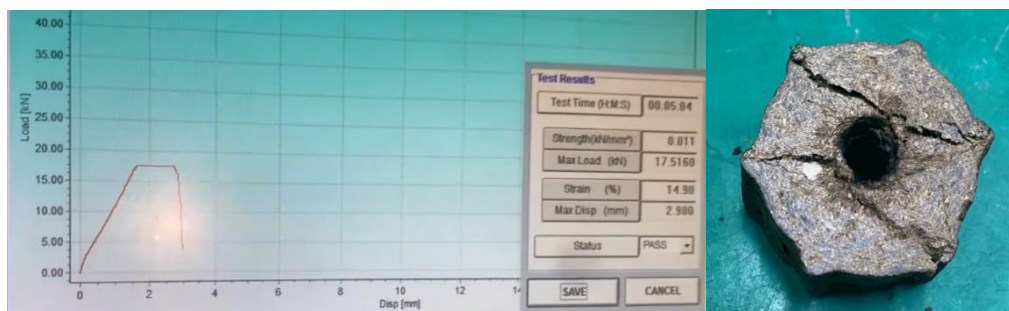
Các mẫu bán thành phẩm được lấy trực tiếp từ dây chuyền ép trong điều kiện vận hành thực tế của hệ thống vít ép – bu lông ép. Theo kết quả khảo sát tại cơ sở sản xuất, hệ thống làm việc với động cơ công suất 22 kW, tốc độ quay vít ép 350 vòng/phút, nhiệt độ đầu ra viên nén 220–300°C, năng suất trung bình khoảng 3 tạ mùn cưa/giờ và áp suất nén tại cửa khuôn tối thiểu 4,5 MPa. Đây là các điều kiện đặc trưng cho chế độ làm việc tải trọng cao của vít ép trong sản xuất than sạch, đồng thời cũng là cơ sở để đánh giá tính đại diện của mẫu bán thành phẩm thu được.

Trong nghiên cứu này, mẫu bán thành phẩm được gia công với kích thước điển hình dày 30 mm và cao 50 mm, sau đó tiến hành thử nén đến phá hủy để đánh giá độ bền cơ học. Thí nghiệm được tiến hành cho mẫu đang thực hiện tại cơ sở sản xuất và mẫu được tạo ra bởi vít ép tối ưu (mô hình 3)

Kết quả thử nghiệm cho thấy các mẫu bị phá hủy dưới lực nén 4900 N cho mẫu bị ép ngang hình 4- 14 và 17000 N với mẫu ép dọc như hình 4- 15, tương ứng với áp suất nén xấp xỉ 4,54 MPa. Giá trị này gần tương đương với áp suất nén thực tế tại vùng cửa khuôn của hệ thống ép, cho thấy điều kiện thử nghiệm có độ tin cậy tốt và phản ánh tương đối sát trạng thái làm việc thực của viên nén trong dây chuyền sản xuất.



Hình 4- 14. Kết quả thử nén ngang mẫu bán thành phẩm



Hình 4- 15. Kết quả thử nén dọc mẫu bán thành phẩm

Kết quả quan sát sau thử nén cho thấy viên nén vẫn duy trì được hình dạng tương đối ổn định trước khi phá hủy, chứng tỏ vật liệu sau ép có mức độ liên kết tốt và đạt khả năng tự giữ hình dạng cần thiết. Ở phép thử nén theo chiều dọc, mẫu chủ yếu chịu tải theo phương tạo viên, phản ánh trực tiếp khả năng chịu nén dọc trục của sản phẩm. Trong khi đó, ở phép thử nén theo chiều ngang,

mẫu thể hiện khả năng chống nứt vỡ do tải ngang và phản ánh mức độ đồng đều cấu trúc trong tiết diện viên nén. Việc kiểm tra đồng thời theo hai phương cho phép đánh giá toàn diện hơn chất lượng cơ học của bán thành phẩm, thay vì chỉ xem xét theo một chiều chịu lực.

Như vậy, việc bổ sung chỉ tiêu kiểm tra chất lượng bán thành phẩm viên nén không chỉ giúp đánh giá hiệu quả của hệ thống vít ép dưới góc độ sản phẩm đầu ra, mà còn góp phần làm rõ tính hợp lý của phương án thiết kế và điều kiện công nghệ đã lựa chọn. Kết quả này là cơ sở bổ sung để khẳng định rằng phương án vít ép tối ưu kết hợp lớp phủ HVOF không những làm giảm mài mòn của chi tiết làm việc mà còn bảo đảm khả năng tạo ra sản phẩm có chất lượng cơ học đáp ứng yêu cầu sử dụng thực tế.

Từ các kết quả thu được có thể nhận thấy rằng bán thành phẩm viên nén tạo ra bởi hệ thống vít ép trong nghiên cứu có độ bền cơ học phù hợp cho quá trình bốc xếp, vận chuyển và sử dụng làm nhiên liệu sinh khối. Đồng thời, kết quả thử nén cũng cho thấy mối liên hệ rõ ràng giữa áp suất nén trong buồng ép và chất lượng sản phẩm đầu ra: áp suất nén đủ lớn giúp tăng mật độ, giảm độ rỗng và nâng cao độ kết dính giữa các hạt vật liệu, từ đó cải thiện độ bền cơ học của viên nén. Tuy nhiên, nếu áp suất nén quá lớn thì tải trọng tác dụng lên bề mặt vít cũng tăng theo, làm gia tăng nguy cơ mài mòn cục bộ. Nhận xét này phù hợp với các phân tích ở Chương 2 về sự phân bố áp suất và lực nén trong buồng ép, cũng như với kết quả thử nghiệm ở Chương 4.

KẾT LUẬN CHƯƠNG 4

Chương 4 đã trình bày quá trình thử nghiệm và đánh giá độ bền mòn của vít ép tải trọng cao trong điều kiện làm việc thực tế, đồng thời kiểm chứng lại độ chính xác của các mô hình mô phỏng đã được xây dựng ở các chương trước. Kết quả thử nghiệm cho thấy hiện tượng mài mòn của vít ép không phân bố đều dọc theo chiều dài vít mà tập trung chủ yếu tại ba bước vít đầu tiên, đặc biệt là vùng từ cánh vít thứ nhất đến cánh vít thứ ba. Đây chính là khu vực có

áp suất nén lớn nhất trong quá trình ép vật liệu, dẫn đến lực pháp tuyến và lực tiếp tuyến tại vùng này đều cao, gây ra tốc độ mài mòn cục bộ lớn. Quan sát này hoàn toàn phù hợp với phân bố lực và trường ứng suất thu được từ mô phỏng DEM trong Chương 2.

Kết quả thử nghiệm thực tế kết hợp với dữ liệu quét 3D cho thấy vùng mòn tương ứng gần như trùng khớp với dự đoán mô phỏng. Các bản đồ màu sai lệch hình học thu được từ máy quét 3D đã thể hiện rõ khu vực biến dạng hình học lớn nhất, tương ứng với vùng có tải trọng cao trong mô phỏng. Điều này cho thấy mô hình mô phỏng DEM đã mô tả chính xác xu hướng dịch chuyển của vật liệu, sự phân bố lực và cơ chế mài mòn trong quá trình làm việc.

Khi so sánh ba mô hình vít ép, Mô hình 1 thể hiện lượng mòn lớn nhất và phân bố mòn không đều, phản ánh hình học vít chưa tối ưu. Mô hình 2 với biên dạng cải tiến đã giảm đáng kể lượng mài mòn, đặc biệt giảm mòn tại cánh vít thứ hai và thứ ba. Đáng chú ý, Mô hình 3 – mô hình được tối ưu hóa từ các phân tích DEM – cho thấy sự giảm mòn rõ rệt nhất, phân bố mòn đồng đều hơn và biên độ mòn thấp hơn đáng kể so với hai mô hình còn lại. Điều này chứng minh rằng việc tối ưu biên dạng vít có tác dụng thực sự trong việc cải thiện độ bền mòn trong điều kiện làm việc thực tế.

Phân tích thống kê p-value đối với các mô hình quét 3D cho thấy các giá trị p đều nhỏ hơn 0,05, khẳng định sự khác biệt giữa ba mô hình là có ý nghĩa thống kê. Điều này chứng minh rằng các kết quả thực nghiệm là tin cậy và phù hợp với xu hướng mô phỏng. Đặc biệt, p-value < 0,01 khi so sánh Mô hình 1 và Mô hình 3 chứng minh rằng hình học vít tối ưu làm giảm lượng mòn một cách rõ rệt và không phải do yếu tố ngẫu nhiên. Điều này cũng củng cố tính đúng đắn của các giả thiết, mô hình vật liệu và tham số DEM đã được hiệu chỉnh trong Chương 2.

Từ những kết quả thực nghiệm và phân tích thu được, có thể khẳng định rằng việc tối ưu biên dạng vít kết hợp với giải pháp phun phủ HVOF là hướng đi hiệu quả để nâng cao độ bền mòn của vít ép tải trọng cao. Các lớp phủ WC–Ni tạo ra bằng công nghệ HVOF đã chứng minh khả năng chống mài mòn vượt trội nhờ độ cứng cao, độ xốp thấp và khả năng chịu tải tốt, góp phần tăng tuổi thọ làm việc của vít ép trong thực tế.

KẾT LUẬN CHUNG

Luận án đã triển khai một nghiên cứu tổng thể, tích hợp giữa tối ưu thiết kế hình học vít ép, mô phỏng số bằng phương pháp phần tử rời rạc (DEM) và thực nghiệm phun phủ HVOF nhằm cải thiện độ bền mòn cho vít ép tải trọng cao sử dụng trong sản xuất than sạch. Các kết quả thu được đã chứng minh sự phù hợp của hướng tiếp cận, đồng thời cung cấp đóng góp có giá trị cả về phương diện khoa học và thực tiễn.

Trước hết, luận án đã xây dựng được cơ sở lý luận toàn diện về cơ chế làm việc của vít ép tải trọng cao, các yếu tố thiết kế ảnh hưởng đến áp suất nén, lực tác dụng, phân bố ứng suất và cơ chế mài mòn trên bề mặt vít. Đặc biệt, việc vận dụng phương pháp DEM trong mô phỏng tương tác hạt–bề mặt đã cho phép mô tả vận tốc, lực pháp tuyến, lực tiếp tuyến, ứng suất tiếp xúc và năng lượng của hệ hạt trong điều kiện làm việc thực tế – những yếu tố vốn khó đánh giá bằng phương pháp thực nghiệm truyền thống. Đây là tiền đề quan trọng giúp luận án xác định chính xác các vùng chịu tải lớn và có nguy cơ mài mòn cao trên bề mặt vít.

Trên nền tảng các phân tích này, luận án đã đề xuất và đánh giá ba mô hình biên dạng vít ép. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình ban đầu có lực pháp tuyến và lực tiếp tuyến cao, dẫn tới mài mòn tập trung tại ba bước vít đầu tiên – điều được kiểm chứng bằng kết quả mòn thực tế và quét 3D. Khi thay đổi biên dạng (mô hình 2), phân bố lực được cải thiện, lượng mòn giảm tại các vùng trọng yếu. Mô hình vít tối ưu (mô hình 3) thể hiện kết quả tốt nhất: lực tiếp xúc giảm đáng kể, trường lực phân bố đều hơn và tốc độ mài mòn giảm. Việc so sánh dữ liệu mô phỏng và quét 3D cho thấy sự tương đồng cao, được khẳng định bằng phân tích thống kê $p\text{-value} < 0,05$, chứng minh tính tin cậy của mô hình DEM và các tham số đã được hiệu chỉnh.

Song song với tối ưu thiết kế vít ép, luận án đã xây dựng và thử nghiệm lớp phủ HVOF trên thép nền C45. Kết quả phân tích cấu trúc, độ xốp, kích

thước hạt, chiều dày và độ cứng lớp phủ cho thấy lớp phủ WC–Ni có chất lượng cao, độ xốp thấp và độ cứng lớn – đáp ứng tốt yêu cầu chống mài mòn trong điều kiện tải trọng cao. Thử nghiệm thực tế tại nhà máy cho thấy vít ép được tối ưu kết hợp lớp phủ HVOF có lượng mòn giảm đáng kể so với vít không phủ, qua đó kéo dài tuổi thọ làm việc và cải thiện tính ổn định của quá trình ép viên.

Tổng hợp toàn bộ kết quả mô phỏng và thực nghiệm đã chứng minh rằng giải pháp thiết kế hình học vít tối ưu kết hợp lớp phủ HVOF là hướng tiếp cận hiệu quả, mang tính khả thi cao trong ứng dụng công nghiệp. Luận án không chỉ cung cấp một mô hình phân tích toàn diện, có khả năng dự đoán chính xác vùng mòn và tốc độ mòn, mà còn đưa ra một quy trình thiết kế – kiểm chứng – tối ưu có thể áp dụng cho các vít ép trong nhiều lĩnh vực cần chống mài mòn cao.

Luận án đã hoàn thành mục tiêu nghiên cứu đề ra, đồng thời đóng góp một mô hình nghiên cứu tích hợp có giá trị cho ngành cơ khí chế tạo thiết bị công nghiệp. Các kết quả đạt được không chỉ mang ý nghĩa khoa học trong việc làm sáng tỏ cơ chế mài mòn của vít ép tải trọng cao mà còn có giá trị thực tiễn quan trọng, góp phần nâng cao hiệu quả sản xuất, giảm chi phí bảo trì và tăng tuổi thọ thiết bị trong các nhà máy sản xuất than sạch và các ngành công nghiệp tương tự.

Các kết quả nghiên cứu trong luận án được xây dựng cho điều kiện vít ép tải trọng cao làm việc với vật liệu sinh khối dạng mùn cưa và các thông số vận hành cụ thể. Khi áp dụng cho các loại vật liệu hoặc điều kiện làm việc khác, cần có các nghiên cứu hiệu chỉnh bổ sung. Đây cũng là hướng nghiên cứu tiếp theo nhằm mở rộng phạm vi ứng dụng của các kết quả đạt được.

HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

Mặc dù luận án đã đạt được các kết quả quan trọng trong việc tối ưu thiết kế vít ép và ứng dụng công nghệ phun phủ HVOF nhằm nâng cao độ bền mòn cho vít ép tải trọng cao, vẫn còn nhiều hướng nghiên cứu tiềm năng có thể được tiếp tục khai thác để mở rộng và hoàn thiện hệ thống giải pháp.

Trước hết, cần tiến hành khảo sát thêm các loại vật liệu phủ khác hoặc điều chỉnh các thông số công nghệ phun phủ HVOF nhằm nâng cao hơn nữa khả năng chống mài mòn trong những điều kiện làm việc khắc nghiệt hơn. Việc nghiên cứu các hệ vật liệu mới có độ cứng cao, độ bám dính tốt và khả năng chống oxy hóa – chịu nhiệt vượt trội sẽ góp phần tối ưu lớp phủ và giảm chi phí bảo trì trong thực tế sản xuất.

Một hướng tiếp cận hiện đại khác là ứng dụng trí tuệ nhân tạo (AI) và thuật toán tối ưu hóa trong mô phỏng và thiết kế vít ép. Việc sử dụng các thuật toán học máy, mạng nơ-ron hoặc giải thuật di truyền GA có thể giúp tối ưu hóa hình học vít một cách tự động, xác định cấu trúc tối ưu của lớp phủ và nâng cao độ chính xác của mô phỏng dự báo mòn theo thời gian. AI cũng có thể hỗ trợ xây dựng mô hình dự báo tuổi thọ vít ép trong các điều kiện vận hành khác nhau.

Ngoài ra, cần thực hiện các nghiên cứu thực nghiệm trong điều kiện sản xuất đa dạng hơn, với các loại nguyên liệu khác nhau, mức độ ẩm thay đổi, hoặc chế độ tải trọng biến thiên. Điều này sẽ giúp đánh giá rộng hơn khả năng thích ứng của vít ép tối ưu và lớp phủ HVOF trong thực tế vận hành của nhiều nhà máy khác nhau, đồng thời làm rõ ảnh hưởng của môi trường làm việc đến cơ chế mài mòn.

Cuối cùng, một hướng nghiên cứu quan trọng trong tương lai là phát triển vít ép thông minh (smart screw) tích hợp cảm biến theo dõi mài mòn, nhiệt độ, rung động hoặc lực tác dụng theo thời gian thực. Hệ thống giám sát này sẽ giúp áp dụng phương pháp bảo trì dự báo (predictive maintenance), giảm thiểu thời gian dừng máy, nâng cao hiệu quả vận hành và tối ưu chi phí bảo trì trong công nghiệp.

Các hướng nghiên cứu nêu trên sẽ giúp mở rộng và hoàn thiện hơn mô hình nghiên cứu tích hợp giữa thiết kế – mô phỏng – phun phủ – thực nghiệm, đồng thời tạo nền tảng khoa học cho việc ứng dụng các công nghệ tiên tiến vào lĩnh vực tối ưu hóa thiết bị cơ khí chịu mài mòn trong công nghiệp hiện đại.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA LUẬN ÁN

- [1]. **Hong Tien Nguyen**, Tuan-Linh Nguyen, Nguyen Van Thien, Phan Van Quoc “*Enhancement of Wear Resistance of High-Load Pressing Screw in Smokeless Charcoal Production by Using Genetic Algorithm and Discrete Element Method*”, Tribology in Industry (Q3 Scopus), Vol. 46, No. 1 (2024) 151-162, DOI: 10.24874/ti.1568.11.23.01.
- [2]. Tuan-Linh Nguyen, **Nguyen Hong Tien**, Van Thien Nguyen, Duc Duong Khuat, “*Analysis of the effect of spray mode on coating porosity and hardness when spraying press screws by the high velocity oxy fuel method*”, EUREKA Physics and Engineering (Q3 Scopus), November 2023, DOI: 10.21303/2461-4262.2023.003161.
- [3]. **Hong Tien Nguyen**, Tuan Linh Nguyen, Van Thien Nguyen, Long Hoang, “*Investigation of the Impact of HVOF Spraying Parameters on the Abrasion Resistance of Tungsten Carbide Coatings*”, Engineering, Technology & Applied Science Research (Q2 Scopus), Volume: 14 | Issue: 6 | Pages: 17769-17773 |December2024, <https://doi.org/10.48084/etasr.7996>
- [4]. **Chủ nhiệm đề tài cấp cơ sở**: “*Nghiên cứu giải pháp mô phỏng nhằm đánh giá tình trạng mòn của vít ép mùn cưa ứng dụng tại nhà máy sản xuất than sạch*”, Đề tài nghiên cứu khoa học năm 2023 đã bảo vệ thành công. Hội đồng nghiệm thu đánh giá đạt.
- [5]. **Thư ký khoa học**: “*Nghiên cứu ứng dụng công nghệ tạo lớp phủ Cermet bằng phương pháp HVOF để nâng cao tuổi thọ vít ép của máy ép trong công nghiệp chế tạo than sạch*”, Đề tài Sở khoa học và Công nghệ Thành phố Hà Nội năm 2022 đã bảo vệ thành công tháng 06 năm 2025. Hội đồng nghiệm thu đánh giá đạt.

DANH MỤC TÀI LIỆU THAM KHẢO

Tiếng Việt

- [1] Đề tài, mã số KC 05.10, *Nghiên cứu xác định độ chịu mài mòn và độ bám dính lớp phủ bột hợp kim ZRO-182 trên nền vật liệu nimonic 263 (được sử dụng chế tạo ống vòi voi trong các nhà máy nhiệt điện) có lớp phủ trung gian bột hợp kim NiCrAlY.*
- [2] Đề tài, mã số: 01C-01/04-2009-2, *Nghiên cứu ảnh hưởng của khoảng cách phun, vận tốc phun, lưu lượng phun đến độ xốp, độ bám dính lớp phủ bột hợp kim Cr20Ni3 trên nền trục thép 40Cr bằng phương pháp phun nổ.*
- [3] Lê Thu Quý (2004), *Khảo sát công nghệ tạo lớp phun phủ giả hợp kim Zn-Al trên nền thép CT3 và khả năng bảo vệ chống ăn mòn của lớp phủ này.* Đề tài khoa học, Viện Kỹ thuật nhiệt đới - Viện hàn lâm KH&CN Việt Nam.
- [4] Lê Thu Quý (2007), *Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố môi trường khí quyển Hà Nội tới tốc độ ăn mòn của lớp phun phủ kẽm chế tạo tại Viện Kỹ thuật nhiệt đới.* Đề tài khoa học, Viện Kỹ thuật nhiệt đới - Viện hàn lâm KH&CN Việt Nam.
- [5] Lê Thu Quý (2012), *Nghiên cứu chế tạo lớp phủ hợp kim niken crôm bằng công nghệ phun phủ hồ quang điện để bảo vệ chống ăn mòn cho các chi tiết máy bơm công nghiệp làm việc trong môi trường axit.* Đề tài khoa học, Viện Kỹ thuật nhiệt đới - Viện hàn lâm KH&CN Việt Nam.
- [6] Nguyễn Chí Bảo (2016), *Nghiên cứu ảnh hưởng của lưu lượng và tốc độ chuyển động tương đối giữa đầu phun với chi tiết đến chất lượng bề mặt phun phủ bằng công nghệ phun nhiệt khí tốc độ cao – HVOF, LATS,* Đại học Mỏ địa chất.

- [7] Nguyễn Thanh Phú (2019), *Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ phun phủ HVOF đến chất lượng lớp phủ bề mặt chi tiết làm việc trong điều kiện khắc nghiệt bị mòn*, LATTS, Viện Nghiên cứu cơ khí.
- [8] Nguyễn Tuấn Linh, Nguyễn Văn Tuấn, & Hoàng Xuân Khoa. (2018). *Nghiên cứu tối ưu hóa biên dạng vít ép trong máy ép mùn cưa phục vụ sản xuất than không khói*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, 56, 123–130.
- [9] Nguyễn Văn Thảo, & Nguyễn Văn Vượng. (2018). *Ảnh hưởng của cấu trúc vít đến hiệu quả ép và phân bố áp lực trong vít tải trọng cao*. Tạp chí Khoa học và Công nghệ, 56, 45–50.
- [10] Phạm Văn Liệu (2016), *Nghiên cứu ảnh hưởng của một số thông số công nghệ đến chất lượng phục hồi bề mặt trục có hình dáng phức tạp bị mòn bằng công nghệ phun phủ*. Luận án tiến sĩ kỹ thuật – Đại Mỏ địa chất, Hà Nội.

Tiếng Anh

- [11]] A. Hassanpour and M. Pasha, “*Discrete element method applications in process engineering*” in CRC Press eBooks, 2019, pp. 333–370. doi: 10.1201/9780429451010-9.
- [12] A.G. Lekatou, D. Sioulas, D. Grimanelis (2023), *Corrosion and wear of coatings fabricated by HVOF-spraying of nanostructured and conventional WC-10Co-4Cr powders on Al7075-T6*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Volume 112, April 2023, 106164. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2023.106164>
- [13] Aca Jovanovic (2015). *Discrete element modelling of screw conveyor-mixers*. Journal of Chemical Industry, 2015 Volume 69, Issue 1, Pages: 95-101.
- [14] Andrew Grima (2013). *Predicting bulk flow and behaviour for design and operation of handling and processing plants*. 11th International

- Congress on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation, Newcastle, Australia, 2013, pp.1-10.
- [15] Cundall, P. A. (1971). *A Computer Model for Simulating Progressive Large Scale Movements in Blocky Rock Systems*, In International Society for Rock Mechanics (Eds.), Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics (pp. 2-8). Rubrecht.
 - [16] Cundall, P. A., & Strack, O. D. L. (1979). *A discrete numerical model for granular assemblies*. Géotechnique, 29(1), 47–65.
 - [17] D. Kretz, S. Callau-Monje, M. Hitschler, A. Hien, M. Raedle, J. Hesser (2015). *Discrete element method (DEM) simulation and validation of a screw feeder system*. Powder Technology, 278, 248–256.
 - [18] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(2), 182–197.
 - [19] Dellinger, J. G., et al. (2016). *Optimization of screw design for continuous wet granulation: A case study of metoprolol succinate ER tablets*. International Journal of Pharmaceutics, 511, 334–345.
 - [20] EDEM. (2020). *EDEM-Modelling wear in EDEM and ebook What_is DEM theoretical background behind the Discrete Element_Method*. Altair Engineering Inc.
 - [21] Ewa Jonda (2024), *Microstructure, residual stress and mechanical properties of double carbides cermet coatings manufactured on AZ31 substrate by high velocity oxy-fuel spraying*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Volume 24, article number 61, (2024).
 - [22] Ewa Jonda, Leszek Łatka, Artur Maciej, Alexandr Khozhanov (2023) *Investigations on the Microstructure and Corrosion Performance of Different WC-based Cermet Coatings Deposited by High Velocity*

- Oxy Fuel Process onto Magnesium Alloy Substrate*. Advances in Science and Technology Research Journal 2023, 17(2), 25–35.
<https://doi.org/10.12913/22998624/160513>
- [23] F. Schramm, et al. (2020). *Modelling of abrasive material loss at soil tillage via scratch test with the discrete element method*. Journal of Terramechanics 91 (2020) 275–283.
- [24] Gaspar-Cunha, A., et al. (2020). *Optimization of single screw extrusion*. International Polymer Processing, 26(4), 417–428.
- [25] Giovanni Bolelli, Lutz-Michael Berger, Matteo Bonetti, Luca Lusvarghi. *Comparative study of the dry sliding wear behaviour of HVOF-sprayed WC-(WCr)2C-Ni and WC-CoCr hardmetal coatings*. Wear, Volume 309, Issues 1–2, 15 January 2014, Pages 96–111.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.001>
- [26] J. F. Archard, “*Contact and rubbing of flat surfaces*,” Journal of Applied Physics, vol. 24, no. 8, pp. 981–988, Aug. 1953, doi:10.1063/1.1721448.
- [27] J. Pulsford (2018), *Effect of Particle and Carbide Grain Sizes on a HVOAF WC-Co-Cr Coating for the Future Application on Internal Surfaces: Microstructure and Wear*. Journal of Thermal Spray Technology, Volume 27, pages 207–219, (2018).
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-017-0669-8>
- [28] J. Pulsford (2019), *Application of HVOF WC-Co-Cr coatings on the internal surface of small cylinders: Effect of internal diameter on the wear resistance*, Wear, Volumes 432–433, 15 August 2019, 202965.
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202965>
- [29] Jin, Y., Olhofer, M., & Sendhoff, B. (2017). *A framework for evolutionary optimization with approximate fitness functions*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 6(5), 481–494.

- [30] Kretz, T. (2016), *Simulation of the conveying behavior of granular material in a single screw feeder using Blender*. Computer Physics Communications, 200, 25–32.
- [31] M. Kremmer, “A discrete element method for industrial granular flow applications,” Ph.D. dissertation, Dept. Agricultural & Environmental Science, Newcastle Univ, Newcastle upon Tyne, UK, 2001.
- [32] M.P. Alekxandrop, *Podgiemno-transportnue masinu, Masinostroenie*, Maskova, 1984.
- [33] Matúš, M., Macek, J., & Macků, L. (2011). *Analysis of tool geometry for screw extrusion machines*. Chemické Listy, 105, 228–231.
- [34] Mitchell, Melanie (1975). *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge, MA: MIT Press. ISBN 9780585030944
- [35] Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2010), *Applied Statistics and Probability for Engineers*. John Wiley & Sons.
- [36] Muhammad Firdaus (2017), *Preliminary Design on Screw Press Model of Palm Oil Extraction Machine*. Materials Science and Engineering, 165 (2017), doi:10.1088/1757-899X/165/1/012029
- [37] Nazerke Muratzhankyzy (2021), *Design and engineering calculation of a screw press for extracting juice from sea buckthorn*. Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 16, no. 8, april 2021
- [38] Pawlowski L (2008), *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. India, Wiley
- [39] Perazzo, P., et al. (2019), *Numerical modeling of the pattern and wear rate on a structural steel plate using DEM*. Mining Engineering, 134, 88–96.

- [40] Peter Krizan (2013). *Relationship between technological and material parameters during densification of beech sawdust*. Biomass and Bioenergy, 59, 71–78.
- [41] Pétrowski, Alain; Ben-Hamida, Sana (2017). *Evolutionary algorithms*. John Wiley & Sons. p. 30. ISBN 978-1-119-13638-5.
- [42] Pezo (2018), *Discrete element model of particle transport and premixing action in a single screw feeder*. Powder Technology, 329, 12–24.
- [43] Pezo, L., et al. (2019). *Discrete element model of particle transport and premixing action in modified screw conveyors*. Powder Technology, 329, 12–24.
- [44] Potente, H., & Thümen, H. (2006), *Optimization of screw elements in twin-screw extruders*. Polymer Engineering & Science, 46(10), 1342–1350.
- [45] R. A. K. Editor-In-Chief, “*Materials handling handbook*,” in Wiley eBooks, 1985. doi: 10.1002/9780470172490.
- [46] Radjai, F., & Dubois, F (2014), *In Discrete Element Method to Model Grain Flow and Particle Systems*. Springer. Discrete element method applications in process engineering
- [47] Rajakumar, S., & Kumar, V. (2013), *Optimization of process parameters using genetic algorithm for friction stir welding of cast aluminium alloy*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 23(2), 293–301.
- [48] Rorres, C. (2000), *The turn of the screw: Optimal design of an Archimedes screw*. Journal of Hydraulic Engineering, 126(1), 72–80.
- [49] Roy, R. K. (2001), *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. Wiley-Interscience.

- [50] Sagar (2016), *A Review on Thermal Spray Coating Processes*. International Journal of Trend in Research and Development, 2, 556–563.
- [51] Shuai Cao, Zhiyong Chang, Shuofan Li, Wei Zhang, Shilin Xu. *Effect of binder phases on the microstructure and sliding wear properties of HVOF-sprayed WC-based coatings*. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. Volume 122, August 2024, 106742. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2024.106742>
- [52] Standard test method for measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus, ASTM G65-16, 2021, doi: 10.1520/G0065-16R21.
- [53] Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus, ASTM G171-03, 2017, doi: 10.1520/G0171-03R17
- [54] Stosic, N., Smith, I. K., & Kovacevic, A. (2011), *Geometry of screw compressor rotors and their tools*. Journal of Mechanical Engineering Science, 225(1), 125–140.
- [55] T.S. Sidhu S. Prakash R.D. Agrawal (2015) *State of the Art of HVOF Coating Investigations— A Review*, Marine Technology Society Journal, Volume 39, Number 2, pp53-64.
- [56] Taguchi, G., Chowdhury, S., & Taguchi, S. (2005). *Robust Engineering: Learn How to Boost Quality While Reducing Costs & Time to Market*. McGraw-Hill.
- [57] Vasileios Katranidis, Spyros Kamnis & Sai Gu (2018) *Prediction of Coating Properties of Thermally Sprayed WC–Co on Complex Geometries*". Journal of Thermal Spray Technology, Volume 27, pages 1025 (2018), <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-018-0739-6>

- [58] Vu-Quoc, L., & Zhang, X. (2002), *Modeling the dependence of the coefficient of restitution on the impact velocity in elasto-plastic collisions*. International Journal of Impact Engineering, 23(9), 863–878.
- [59] Warren Arthur Nelson (2005), *HVOF bi-layer coating with controlled porosity for use in thermal barrier coatings*. London Patent Operation.
- [60] Wenxiang Shu, Xiaofeng Deng, Weiduo Guo, Wei Shi, Shuai Li, Bei Zhang, Jingying Bai (2022). *Microstructure and wear resistance of HVOF sprayed WC-10Co-4Cr coating on Ti-6Al-4V*. Heat treatment and surface engineering 2022, vol. 4, no. 1, 70–75. <https://doi.org/10.1080/25787616.2022.2148352>
- [61] Wu, J., Guo, Y., & Wang, D. (2021), *A numerical study of the dynamic behavior of granular materials in a screw conveyor*. Journal of Engineering and Applied Sciences, 10(3), 112–118.
- [62] Y.I. Oka, K. Okamura, T. Yoshida (2005), *Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation*. Wear, 263(1-6), 330–338.
- [63] Y.I. Oka, K. Okamura, T. Yoshida (2005), *Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact. Part 2: Mechanical properties of materials directly associated*. Wear, 263(1-6), 339–346.
- [64] Zhu, H. P., Zhou, Z. Y, Yang, R. Y., & Yu, A. B. (2007). *Discrete particlesimulation of particulate systems: Theoretical developments: Theoretical developments*. Chemical Engineering Science, 62(13), 3378–3396.