

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



NGUYỄN HỒNG TIẾN

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

Chuyên ngành: Kỹ thuật cơ khí

Mã số: 9520103

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Hà Nội - 2026

Công trình được hoàn thành tại:

TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHIỆP HÀ NỘI – BỘ CÔNG THƯƠNG

Người hướng dẫn khoa học:

1. PGS.TS Nguyễn Tuấn Linh

2. TS Nguyễn Văn Thiện

Phản biện 1: GS.TS Nguyễn Đức Toàn

Phản biện 2: PGS.TS Lê Văn Tạo

Phản biện 3: PGS.TS Trần Văn Đua

Luận án được bảo vệ tại Hội đồng đánh giá luận án tiến sĩ cấp Trường và họp tại Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội vào hồi 14 giờ, ngày 30 tháng 01 năm 2026

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội
- Thư viện Quốc gia Việt Nam

MỞ ĐẦU

Vít ép tải trọng cao là chi tiết then chốt trong các dây chuyền xử lý vật liệu rời, đảm nhiệm nén, định hình và vận chuyển dưới áp suất lớn. Trong sản xuất than sạch từ mùn cưa, vít ép quyết định độ kết dính, mật độ và chất lượng sản phẩm. Tuy nhiên, điều kiện làm việc khắc nghiệt với áp lực, ma sát và nhiệt độ cao khiến vít nhanh mòn, giảm tuổi thọ, tăng chi phí bảo trì và ảnh hưởng năng suất. Đề tài luận án tập trung nghiên cứu giải pháp cải thiện độ bền mòn vít ép thông qua thiết kế hình học tối ưu, mô phỏng số và ứng dụng công nghệ kết hợp phun phủ HVOF, nhằm kéo dài tuổi thọ, giảm chi phí và nâng cao hiệu quả vận hành.

Luận án hướng tới tối ưu thiết kế vít ép tải trọng cao và làm chủ công nghệ phun phủ HVOF nhằm nâng cao độ bền mòn trong sản xuất than sạch. Đối tượng nghiên cứu là vít ép tải trọng cao dùng để nén và vận chuyển mùn cưa trong điều kiện áp suất, ma sát lớn, dễ bị mài mòn và biến dạng. Luận án kết hợp tối ưu hình học, mô phỏng số dòng vật liệu – mài mòn và phun phủ bề mặt bằng phương pháp HVOF để cải thiện tuổi thọ vít. Đề tài có ý nghĩa khoa học khi lần đầu xây dựng mô hình mô phỏng tích hợp toàn diện, dự đoán chính xác vùng mài mòn và đề xuất giải pháp tăng cường khả năng chống mài mòn, đồng thời bổ sung cơ sở lý luận về mô phỏng thiết bị cơ khí với vật liệu rời và mở rộng ứng dụng trong thiết kế, dự báo tuổi thọ chi tiết. Ý nghĩa thực tiễn của nghiên cứu thể hiện ở việc tăng tuổi thọ, giảm chi phí bảo trì, nâng cao hiệu suất sản xuất và sức cạnh tranh doanh nghiệp. Phương pháp nghiên cứu bao gồm phân tích lý thuyết tối ưu hình học vít, mô phỏng số bằng phương pháp phần tử rời rạc, thực nghiệm xử lý bề mặt tiên tiến, kết hợp đánh giá và hiệu chỉnh mô hình để đề xuất giải pháp tối ưu. Nội dung luận án được trình bày trong bốn chương: **Chương 1** trình bày tổng quan về vít ép tải trọng cao, điều kiện làm việc, cơ chế mài mòn và phương pháp phun phủ HVOF; **Chương 2** tập trung nghiên cứu tối ưu thiết kế hình học vít và mô phỏng quá trình ép vật liệu rời rạc nhằm dự đoán phân bố áp suất, lực nén và vùng chịu mài mòn; **Chương 3** giới thiệu vật liệu, trang thiết bị thực nghiệm và các kết quả thực nghiệm đo cấu trúc, độ cứng lớp phủ; **Chương 4** trình bày thử nghiệm, phân tích và đánh giá kết quả độ bền mòn của vít ép tải trọng cao, so sánh với kết quả mô phỏng để xác thực mô hình. Nghiên cứu đóng góp mới khi xây dựng mô hình tích hợp thiết kế – mô phỏng – dự đoán mài mòn, đề xuất phương pháp xác định vùng mài mòn cục bộ, lựa chọn chế độ phun phủ HVOF phù hợp và đưa ra giải pháp thiết kế vít ép mới có tuổi thọ cao, giảm chi phí và nâng cao hiệu quả sản xuất than sạch.

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

Chương 1 trình bày tổng quan toàn diện về vít ép tải trọng cao, một chi tiết cơ khí quan trọng trong các dây chuyền xử lý và gia công vật liệu rời, đảm nhiệm chức năng nén chặt, định hình và vận chuyển vật liệu dưới áp suất lớn. Vít ép được cấu tạo gồm trục vít xoắn và cánh vít, chia thành ba vùng: dẫn liệu, nén và tạo hình. Khi trục vít quay, vật liệu được di chuyển dọc trục, thể tích giữa các cánh vít dần thu hẹp, làm tăng áp lực, nhiệt độ và mật độ vật liệu. Nhờ đó sản phẩm có độ kết dính, độ đặc và chất lượng cơ học cao. Trong sản xuất than sạch từ mùn cưa, vít ép là chi tiết quyết định đến chất lượng viên than, ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng cháy lâu, lượng khói thải thấp và giá trị sử dụng. Tuy nhiên, do làm việc liên tục trong điều kiện tải trọng lớn, ma sát mạnh và nhiệt độ cao, vít ép dễ bị mài mòn, biến dạng và mất biên dạng làm việc, dẫn đến giảm tuổi thọ, tăng chi phí bảo trì và giảm hiệu quả sản xuất.

Cơ sở lý thuyết thiết kế vít ép nhấn mạnh các thông số làm việc quan trọng như lưu lượng, áp suất, lực nén, mô men xoắn, tỷ số nén và chiều dài buồng ép. Các thông số này quyết định khả năng nén chặt, tốc độ vận chuyển và hiệu quả năng lượng. Thiết kế vít ép truyền thống dựa vào công thức bán thực nghiệm, kinh nghiệm và các tỷ lệ hình học cơ bản (L/D , bước vít, góc xoắn) cho phép tính toán nhanh nhưng không phản ánh đúng các tương tác phức tạp giữa vật liệu và bề mặt vít, đặc biệt trong điều kiện nén khắc nghiệt. Ngược lại, các phương pháp phi truyền thống hiện đại kết hợp mô phỏng số (FEM, DEM) với các kỹ thuật tối ưu hóa (Taguchi, thuật toán di truyền GA) cho phép phân tích chi tiết ứng suất, biến dạng, nhiệt, dòng vật liệu, ma sát và dự đoán mài mòn, từ đó tối ưu hình học vít nhằm tăng hiệu suất và giảm hao mòn. Đặc biệt, phương pháp phần tử rời rạc DEM có ưu thế vượt trội trong mô phỏng dòng vật liệu rời, cho phép mô tả va chạm, nén chặt, ma sát và phân bố lực giữa các hạt, đồng thời dự đoán chính xác vùng chịu mài mòn cục bộ trên bề mặt vít – những yếu tố mà FEM và các phương pháp truyền thống khó đáp ứng.

Ngoài thiết kế hình học, xử lý bề mặt là giải pháp quan trọng để nâng cao độ bền mòn cho vít ép. Các phương pháp xử lý bề mặt như mạ điện, thấm nhiệt, phun phủ plasma, phun phủ chân không hay phun nguội đã được sử dụng nhưng vẫn tồn tại hạn chế về độ bám dính và khả năng chịu tải. Trong số đó, công nghệ phun phủ nhiệt tốc độ cao HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) nổi bật nhờ khả năng tạo lớp phủ WC-Co hoặc WC-CoCr có độ cứng cao, cấu trúc đặc, độ bám dính vượt trội và khả năng chống mài mòn, ăn mòn rất tốt. Lớp

phủ HVOF đặc biệt phù hợp với các chi tiết làm việc trong môi trường khắc nghiệt như vít ép tải trọng cao, nơi áp suất và ma sát lớn diễn ra liên tục. Việc kết hợp thiết kế tối ưu với lớp phủ HVOF giúp kéo dài tuổi thọ làm việc, giảm chi phí bảo trì, ổn định sản xuất và nâng cao chất lượng sản phẩm.

Tổng quan nghiên cứu quốc tế cho thấy nhiều công trình đã tập trung vào thiết kế, tối ưu hóa và mô phỏng vít tải, vít đùn, vít trộn hoặc vít ép, sử dụng các phương pháp hiện đại như DEM, FEM và GA để cải thiện hiệu suất. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu chủ yếu hướng đến vít làm việc với vật liệu không kết dính hoặc tải trọng vừa phải, chưa tập trung vào vít ép tải trọng cao trong môi trường khắc nghiệt với vật liệu rời có tính mài mòn cao như mùn cưa. Đồng thời, ít có nghiên cứu nào tích hợp đồng thời thiết kế hình học tối ưu, mô phỏng DEM dự đoán mài mòn và công nghệ xử lý bề mặt tiên tiến trong một mô hình nghiên cứu thống nhất.

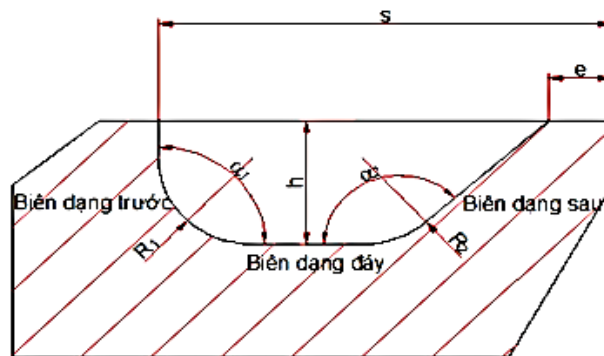
Tại Việt Nam, một số nghiên cứu đã khảo sát ảnh hưởng của hình học vít đến hiệu suất ép và chất lượng sản phẩm, một số khác đã áp dụng thuật toán di truyền để tối ưu biên dạng vít trong ép than sạch. Tuy nhiên, các nghiên cứu này chủ yếu dừng ở mức thử nghiệm đơn lẻ, chưa kết hợp mô phỏng DEM để dự đoán mài mòn, cũng như chưa triển khai công nghệ phun phủ tiên tiến cho vít ép. Trong khi đó, xử lý bề mặt HVOF đã được nghiên cứu trong một số ứng dụng công nghiệp nhưng vẫn còn hạn chế trong lĩnh vực vít ép tải trọng cao.

Kết luận, chương 1 khẳng định sự cần thiết nghiên cứu cải thiện độ bền mòn vít ép tải trọng cao, xuất phát từ yêu cầu thực tiễn của ngành sản xuất than sạch và các ngành công nghiệp tương tự. Hướng tiếp cận toàn diện của luận án là kết hợp tối ưu thiết kế hình học vít, mô phỏng DEM để phân tích dòng vật liệu và dự đoán mài mòn, cùng với công nghệ HVOF để tăng khả năng chống mài mòn và kéo dài tuổi thọ. Cách tiếp cận này không chỉ đáp ứng yêu cầu khoa học mà còn mang lại giá trị ứng dụng thực tiễn cao, đặt nền tảng cho các nghiên cứu thiết kế, mô phỏng và thực nghiệm ở các chương tiếp theo.

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

Chương 2 của luận án tập trung vào nghiên cứu tối ưu thiết kế vít ép tải trọng cao và mô phỏng quá trình ép vật liệu rời rạc. Quá trình làm việc của vít ép tải trọng cao chịu ảnh hưởng bởi nhiều chỉ tiêu như áp lực nén, thể tích nén, nhiệt độ và thời gian ép. Trong đó, áp suất nén và thể tích nén là hai yếu tố quan trọng nhất vì chúng liên quan trực tiếp đến mức độ mài mòn của vít. Do vậy, cần thiết kế biên dạng vít sao cho có thể tạo ra áp lực tác dụng vào vật liệu một cách nhanh chóng, đồng thời giảm ma sát giữa dòng nguyên liệu và bề mặt vít, đảm bảo cho nguyên liệu chuyển động ổn định trong suốt quá trình ép và giảm sự hao mòn của chi tiết.

Thể tích ép được xác định dựa trên giả thiết rằng không gian giữa biên dạng trước, đáy và sau của rãnh vít được điền đầy vật liệu. Thể tích này chính là lượng nguyên liệu được vận chuyển qua mỗi đơn vị tiết diện theo chiều dọc của trục vít. Các thông số hình học của vít, bao gồm góc trước α_1 , góc sau α_2 , bán kính lượn R_1 , R_2 , bước vít s , chiều rộng đỉnh cánh e và chiều sâu rãnh h , quyết định giá trị thể tích này. Thay đổi biên dạng thể tích theo phương dọc trục có thể đạt được thông qua điều chỉnh đường kính ngoài của vít (tạo vít hình nón), thay đổi chiều sâu rãnh (lõi vít hình nón) hoặc thay đổi bước vít. Việc kết hợp các thay đổi này cho phép đạt được một tỷ số nén hợp lý, từ đó cải thiện hiệu quả ép và giảm sự mài mòn.

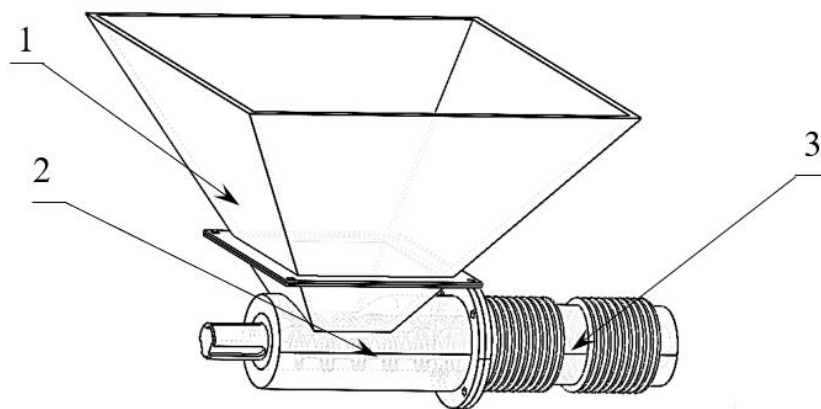


Hình 1: Biên dạng vít ép (theo mặt cắt dọc)

Áp suất nén trong vít ép phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm áp suất ban đầu của vật liệu, chiều dài vít, hệ số ma sát giữa nguyên liệu với buồng ép và giữa nguyên liệu với cánh vít, cũng như góc ma sát. Các góc trên biên dạng vít, bao gồm góc ở bề mặt ngoài, ở rãnh vít và ở đáy rãnh, cũng đóng vai trò quan trọng trong việc xác định sự phân bố áp suất dọc theo vít. Những góc này được xác định dựa trên mối quan hệ giữa bước vít và đường kính tại các vị trí khác nhau.

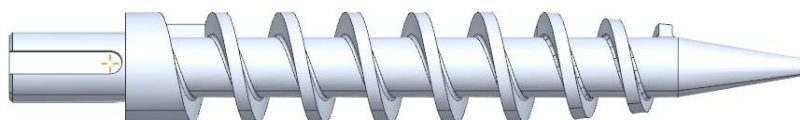
Nghiên cứu đã xây dựng phương pháp xác định biên dạng vít ép tải trọng cao bằng cách áp dụng giải thuật di truyền kết hợp phương pháp trọng số để giải bài toán tối ưu đa mục tiêu. Hai mục tiêu chính được xem xét là thể tích ép và áp suất nén. Trong quá trình tối ưu, biên dạng vít được coi là hàm mục tiêu phụ thuộc đồng thời vào hai yếu tố này. Khi tăng thể tích buồng ép, năng suất được cải thiện nhưng áp suất giảm; ngược lại, khi tăng áp suất, sự liên kết giữa các hạt vật liệu rời tốt hơn nhưng thể tích giảm và ma sát tăng, dẫn đến hiện tượng mài mòn nhanh. Do hai mục tiêu có xu hướng đối nghịch, phương pháp trọng số được sử dụng để xây dựng hàm mục tiêu tổng hợp, đồng thời xác định giới hạn của các chỉ tiêu theo điều kiện làm việc thực tế. Các biến thiết kế trong bài toán gồm góc trước α_1 , góc sau α_2 , bán kính lượn trước R_1 , bán kính lượn sau R_2 và chiều sâu rãnh vít h . Chương trình được lập trình trên MATLAB với công cụ tối ưu đa mục tiêu, sử dụng tỷ lệ lai ghép từ 60% đến 80%, tỷ lệ đột biến từ 2% đến 5% và thực hiện qua 800 thế hệ nhằm tìm ra bộ thông số tối ưu. Điều kiện biên được lựa chọn dựa trên thông số làm việc thực tế của vít ép với đường kính ngoài $D = 66$ mm, đường kính trong $d = 36$ mm và chiều rộng đỉnh cánh vít $e = 8$ mm. Kết quả tối ưu đã đưa ra ba trường hợp khác nhau của biên dạng vít ép. Ở trường hợp thứ nhất, áp suất tăng chậm nhất, áp lực phân bố không đều trên toàn bộ biên dạng, gây ra mòn cục bộ, tập trung tại các vị trí chân ren và chủ yếu ở ba ren cuối, làm giảm chất lượng làm việc của vít. Ở trường hợp thứ hai, áp suất tăng nhanh hơn, khả năng nén được cải thiện nhưng góc của vít làm nguyên liệu khó di chuyển qua bước vít tiếp theo, dẫn đến ma sát tăng và mòn chủ yếu ở phía sau biên dạng. Trường hợp thứ ba cho thấy áp suất tăng nhanh nhất, quá trình vận chuyển vật liệu thuận lợi hơn và các vị trí mòn phân bố đều hơn, làm giảm hiện tượng mòn cục bộ. Từ phân tích ba trường hợp này, phương án thứ ba được đánh giá là tối ưu nhất vì đảm bảo áp suất nén cao, khả năng vận chuyển vật liệu tốt và phân bố mòn hợp lý. Trên cơ sở các kết quả tối ưu, ba mô hình biên dạng vít tương ứng với ba trường hợp được thiết kế để tiếp tục thực hiện mô phỏng số, nhằm đánh giá và dự đoán quá trình làm việc của vít ép tải trọng cao. Quá trình này được mô tả thông qua sơ đồ khối mô phỏng quá trình ép mùn của trong hệ thống vít ép - buồng ép.

Mô hình hình học của hệ thống vít ép - buồng ép được thiết kế bao gồm ba bộ phận chính. Phễu nạp liệu 1 có nhiệm vụ dẫn mùn của xuống trục vít một cách đều đặn, hạn chế tình trạng tắc nghẽn. Vít ép 2 được thiết kế để tạo lực nén dọc trục lên vật liệu, giúp tăng mật độ và định hình viên nén. Buồng ép và ống dẫn 3 đóng vai trò kiểm soát dòng chảy của vật liệu, đảm bảo sản phẩm đầu ra đạt được hình dạng và kích thước ổn định.



Hình 2: Mô hình hình học hệ thống vít ép - buồng ép

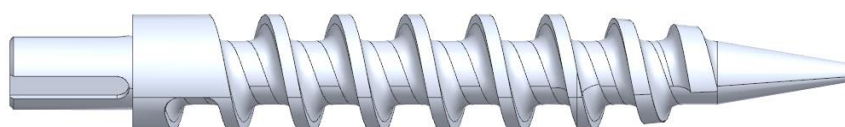
Trên phần mềm EDEM, ba mô hình mô phỏng đã được xây dựng để nghiên cứu quá trình ép mùn cưa. Mô hình thứ nhất mô phỏng quá trình ép sử dụng hình học vít ép hiện đang được dùng tại nhà máy. Mô hình thứ hai mô phỏng quá trình ép với vít ép có hình học đã được điều chỉnh theo các kết quả phân tích trước đó. Mô hình thứ ba mô phỏng quá trình ép với vít ép có hình học được tối ưu hóa hơn, cũng dựa trên các thông số phân tích và điều kiện làm việc thực tế. Các mô hình này là cơ sở để đánh giá và so sánh khả năng nén, phân bố lực và hiện tượng mài mòn, từ đó xác định phương án thiết kế đạt hiệu quả cao nhất.



Hình 3: 3D vít ép mô hình thứ nhất



Hình 4: 3D vít ép mô hình thứ 2



Hình 5: 3D vít ép thứ mô hình thứ 3

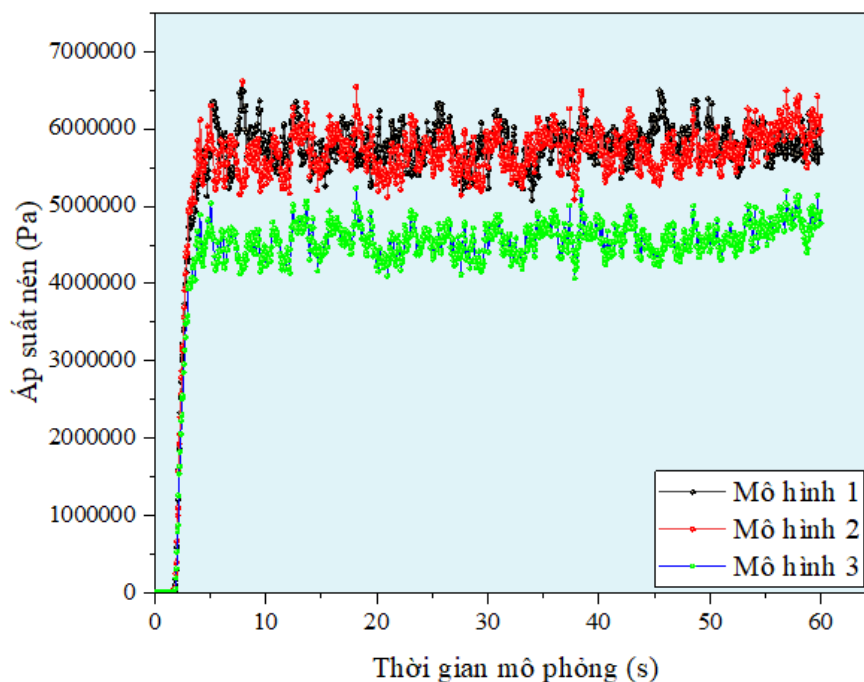
Trong nghiên cứu này, hai loại vật liệu được xem xét là mùn cưa và thép C45. Mùn cưa có hình dạng và kích thước hạt bất định, thường dao động trong khoảng từ 0,08 mm đến 0,6 mm, đồng thời thành phần của nó thay đổi

tùy thuộc vào loại gỗ và quy trình chế tạo. Do đặc điểm này, phương pháp mô phỏng vật liệu rời rạc (DEM) được lựa chọn vì nó cho phép mô tả chi tiết sự tương tác giữa các hạt trong suốt quá trình ép. Để đạt được kết quả mô phỏng chính xác, cần xác định và lựa chọn điều kiện làm việc sát với thực tế, bao gồm các thông số như kích thước và hình dạng hạt, khối lượng riêng, mô đun đàn hồi, hệ số Poisson, hệ số ma sát, lực kết dính và hệ số phục hồi. Các thông số này quyết định khả năng dự đoán hành vi dòng chảy, mức độ nén và sự mài mòn của bề mặt vít ép. Trong mô phỏng DEM, hai cách tiếp cận thường được sử dụng là mô hình cứng tuyệt đối và mô hình cứng tương đối. Phương pháp cứng tương đối được sử dụng vì có thể mô tả chi tiết hơn quá trình va chạm và mài mòn. Chuyển động của các hạt được tính theo định luật Newton, vị trí và vận tốc được cập nhật theo từng bước thời gian nhỏ, giúp tái hiện chính xác động học của hệ hạt. Bước thời gian được lựa chọn dựa trên thời gian Rayleigh nhằm đảm bảo tính ổn định và độ chính xác của mô phỏng. Để giảm thời gian xử lý, thuật toán chia không gian mô phỏng thành các ô lưới ba chiều, chỉ tính toán va chạm giữa các hạt trong cùng một ô hoặc ô lân cận. Sau khi phát hiện va chạm, các lực tiếp xúc được tính toán và sử dụng để cập nhật vị trí và vận tốc hạt ở bước tiếp theo.

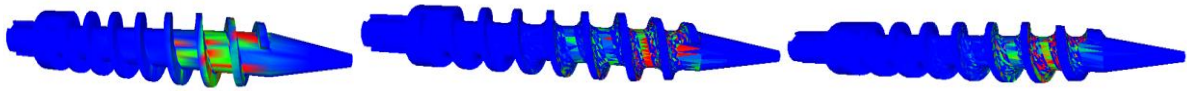
Lượng mòn của vít ép được xác định dựa trên chênh lệch khối lượng trước và sau khi làm việc hoặc tính theo độ sâu mòn. Hình dạng hạt trong DEM là yếu tố quan trọng để đảm bảo tính chính xác. Mô hình hạt cầu đơn giản có ưu điểm tính toán nhanh nhưng không phản ánh được sự bất quy tắc và cơ chế gài cơ học của vật liệu thực. Ngược lại, mô hình đa diện hoặc mô tả chi tiết hình dạng hạt cho kết quả chính xác hơn nhưng yêu cầu tính toán phức tạp. Do đó, nghiên cứu lựa chọn mô hình đại diện được hiệu chỉnh, sử dụng tổ hợp nhiều hạt cầu để tái hiện đặc điểm hình học bất quy tắc của mùn cưa, đồng thời duy trì hiệu suất tính toán hợp lý. Trong quá trình mô phỏng, ngoài các thông số của vật liệu rời rạc, các đặc tính cơ học của các chi tiết cứng như vít ép và bu lông ép bằng thép C45 cũng cần được xác định chính xác. Điều kiện biên hợp lý đóng vai trò quan trọng, không chỉ giúp mô phỏng quá trình vận chuyển và nén vật liệu mà còn dự đoán được sự phân bố lực dọc theo trục vít, các vùng có áp suất cao và các khu vực dễ xảy ra mài mòn. Sau khi thiết lập các thông số này, mô phỏng quá trình ép mùn cưa được thực hiện trên phần mềm EDEM với hệ số thời gian mô phỏng được lựa chọn tỷ lệ 1:1. Quá trình được tiến hành trong thời gian 60 giờ làm việc với bước thời gian rất nhỏ, giúp đảm bảo độ chính xác trong việc tính toán và theo dõi sự tương tác giữa hạt và bề mặt vít. Với khoảng 60 triệu bước tính toán cho mỗi 60 giây mô phỏng trên máy tính,

kết quả cho phép phân tích chi tiết sự phân bố lực, áp suất và sự phát sinh mài mòn. Phương pháp thiết lập tương tự cũng được áp dụng cho các mô hình hình học khác của vít ép đã được xây dựng. Kết quả mô phỏng từ các mô hình này sẽ được so sánh và phân tích, nhằm đánh giá hiệu quả thiết kế và xác định những khu vực cần điều chỉnh để nâng cao hiệu suất và độ bền của hệ thống trong điều kiện làm việc thực tế.

Kết quả mô phỏng ba mô hình vít ép với các điều kiện đã thiết lập cho thấy sự khác biệt rõ rệt về phân bố và giá trị áp suất nén. Ở mô hình thứ nhất, áp suất tăng ban đầu chậm nhưng sau đó tăng nhanh, biểu hiện sự không ổn định trong giai đoạn đầu. Sự phân bố áp suất không đều trên toàn bộ vít, tập trung cục bộ ở một số vị trí, dẫn đến hiện tượng dồn ứ vật liệu, tắc nghẽn cục bộ và sinh nhiệt lớn. Mô hình thứ hai cho thấy giai đoạn nén ban đầu diễn ra nhanh và sau đó áp suất duy trì ổn định với dao động nhỏ. Quá trình ép ở mô hình này đạt trạng thái nén chặt, các hạt sắp xếp lại tốt, giảm tối đa khoảng rỗng. Tuy nhiên, áp suất cao tại các vị trí cuối cùng trên trục vít khiến khu vực này chịu mài mòn mạnh. Mô hình thứ ba thể hiện giai đoạn nén ban đầu nhanh, áp suất sau đó duy trì ổn định ở mức thấp hơn so với hai mô hình còn lại. Sự phân bố áp suất trong buồng ép đồng đều trên toàn bộ vùng ép, không tạo ra vùng tập trung áp lực lớn. Điều này giúp giảm mài mòn và hạn chế hư hỏng, đồng thời duy trì sự ổn định của quá trình làm việc.

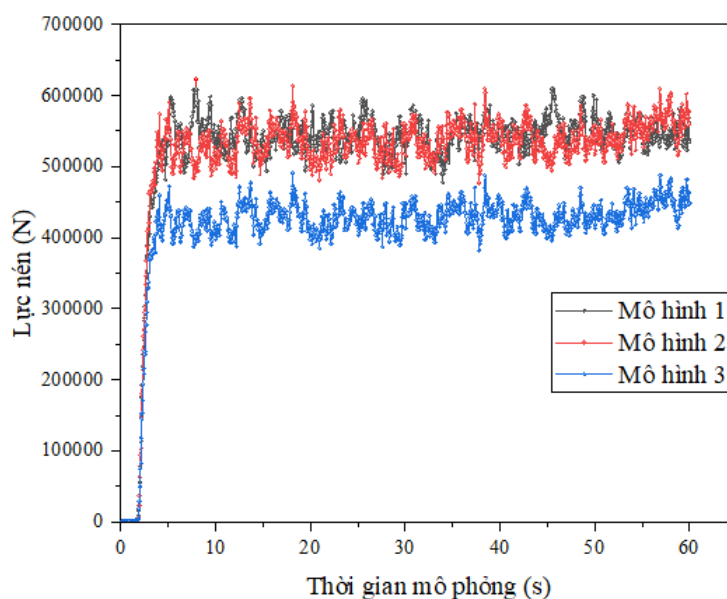


Hình 6: Đồ thị Áp suất 3 mô hình



Hình 7: Hình ảnh phân bố áp suất 3 mô hình

Lực nén là yếu tố quan trọng ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu quả làm việc của vít ép, vì nó phản ánh tổng lực tác dụng lên vật liệu dọc trục vít trong suốt quá trình ép. Kết quả mô phỏng cho thấy, ở mô hình thứ nhất, lực nén tập trung mạnh ở ba bước vít cuối, đặc biệt tăng cao tại bước vít thứ hai. Lực tác động phân bố không đều, xuất hiện muộn và dồn vào vùng cuối, khiến vít ép chịu ứng suất lớn cục bộ, dễ xảy ra mài mòn nhanh và hư hỏng ở các vị trí này. Ở mô hình thứ hai, lực nén bắt đầu xuất hiện sớm hơn, phân bố đều hơn dọc theo vùng ép và tăng dần về phía cuối. Xu hướng này có lợi trong việc gia tăng khả năng nén ở giai đoạn cuối, giúp viên nén đạt mật độ tối đa trước khi thoát ra khỏi buồng ép. Tuy nhiên, sự tăng mạnh lực nén ở đoạn cuối khiến vít chịu tải trọng và ứng suất cao, dẫn đến nguy cơ mài mòn và biến dạng tại khu vực này nếu làm việc lâu dài. Mô hình thứ ba thể hiện lực nén thấp và ổn định trên toàn bộ chiều dài vùng ép. Đặc điểm này giúp giảm tải tác động lên vít, hạn chế ma sát và mài mòn, đồng thời kéo dài tuổi thọ thiết bị. Tuy nhiên, do lực nén duy trì ở mức thấp, sản phẩm viên nén tạo ra từ mô hình này có thể không đạt độ chắc và mật độ cao như ở hai mô hình đầu. Từ kết quả so sánh, mô hình thứ nhất và thứ hai đều đảm bảo viên nén chắc chắn nhưng đi kèm nguy cơ mài mòn cao, trong khi mô hình thứ ba ưu tiên tuổi thọ vít ép với mức lực nén thấp hơn, dù chất lượng viên thành phẩm có thể kém hơn.

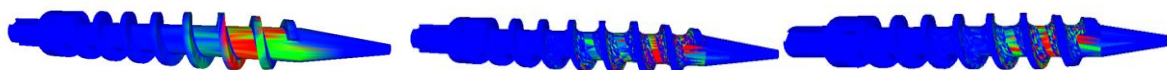


Hình 8: Đồ thị tổng lực nén 3 mô hình



Hình 9: Hình ảnh phân bố tổng lực nén 3 mô hình

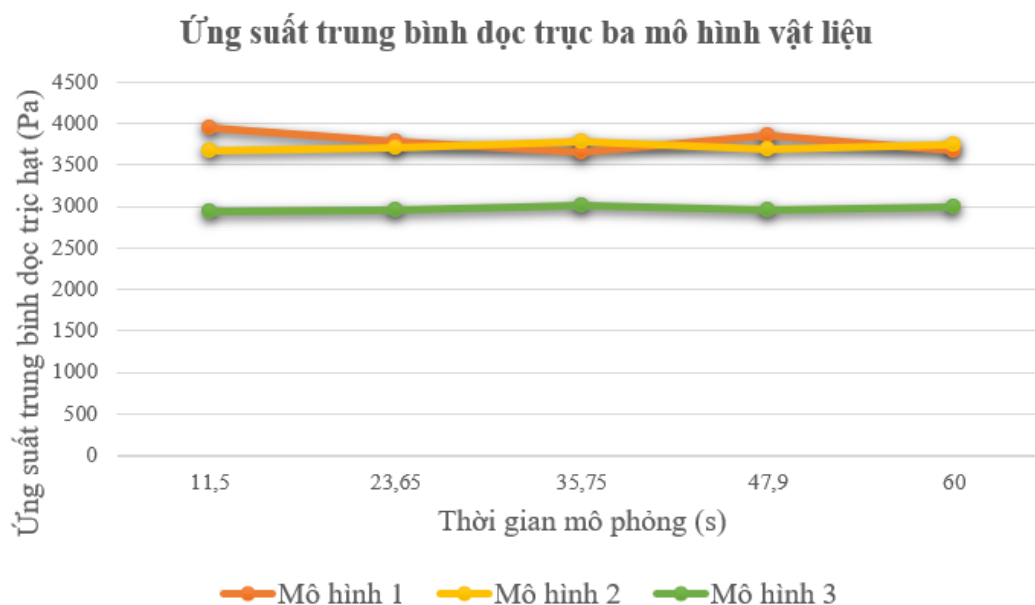
Tổng lực tác dụng lên vít ép bao gồm lực pháp tuyến, lực tiếp tuyến và lực ma sát, tập trung chủ yếu tại vùng nén của vật liệu rời. Kết quả mô phỏng cho thấy sự khác biệt rõ rệt trong phân bố lực giữa ba mô hình. Ở mô hình thứ nhất, tổng lực chủ yếu tập trung mạnh ở bước vít thứ hai và tăng cao ở giai đoạn cuối. Mức lực lớn này giúp đảm bảo vật liệu được nén chặt, tạo ra viên nén có mật độ và độ bền cơ học cao. Tuy nhiên, nó cũng gây ra tải trọng cơ học lớn lên bề mặt vít, dẫn đến mài mòn nhanh, biến dạng cục bộ và tiềm ẩn nguy cơ nứt gãy ở vùng chịu lực cao. Trong mô hình thứ hai, tổng lực giảm nhẹ so với mô hình thứ nhất nhưng vẫn giữ ở mức tương đối cao. Lực phân bố đều hơn và có xu hướng tăng dần từ đầu đến cuối trục vít. Sự gia tăng tuần tự này hỗ trợ quá trình nén được kiểm soát tốt hơn, giúp viên nén đạt chất lượng đồng đều, đồng thời giảm bớt hiện tượng tập trung ứng suất đột ngột. Tuy vậy, vùng cuối trục vít vẫn phải chịu tải trọng cao, kéo theo nguy cơ mài mòn mạnh tại khu vực này. Mô hình thứ ba thể hiện tổng lực thấp hơn hẳn hai mô hình còn lại và duy trì ổn định trên toàn bộ chiều dài vùng ép. Không có hiện tượng tăng lực đột ngột ở cuối, điều này làm giảm đáng kể tải trọng cơ học tác dụng lên vít và hạn chế ma sát cũng như mài mòn. Mặc dù lực thấp có thể làm giảm khả năng nén chặt vật liệu, mô hình này lại có lợi thế rõ rệt trong việc kéo dài tuổi thọ của vít và giảm thiểu rủi ro hư hỏng trong quá trình vận hành.



Hình 10: Hình ảnh phân bố ứng suất dọc trục 3 mô hình

Ứng suất dọc trục của hạt vật liệu rời phát sinh khi các hạt bị nén trong buồng ép, chịu lực truyền từ các hạt khác hoặc từ bề mặt vít ép. Lực nén này phân bố trên diện tích mặt cắt ngang của từng hạt, tạo ra mức ứng suất nhất định. Phân tích phân bố ứng suất trên ba mô hình cho thấy các vùng tập trung ứng suất chủ yếu nằm tại cánh vít thứ hai và thứ ba, nơi chịu lực ép lớn nhất. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình thứ nhất duy trì mức ứng suất dọc trục cao nhất. Điều này đảm bảo sự nén chặt của vật liệu, tăng độ kết dính và tạo ra viên nén chắc chắn, nhưng đồng thời cũng làm gia tăng mức độ mài mòn của vít ép, đặc biệt ở các vùng chịu tải cao. Mô hình thứ hai có ứng suất dọc trục thấp hơn mô hình thứ nhất, đồng thời phân bố ứng suất ổn định hơn với biến thiên nhỏ.

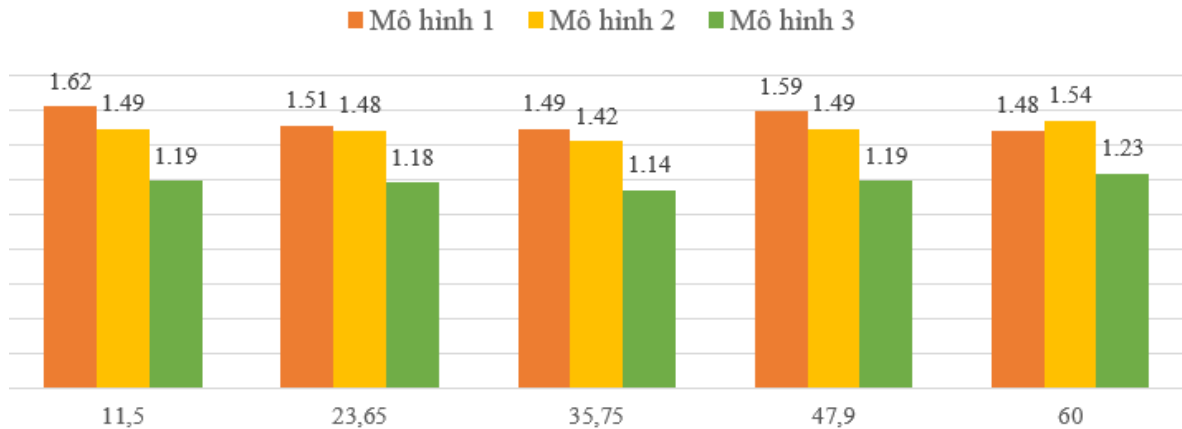
Đặc điểm này giúp giảm tải trọng lên vít so với mô hình đầu tiên trong khi vẫn đảm bảo chất lượng nén của viên. Mô hình thứ ba thể hiện ứng suất dọc trục thấp nhất và duy trì ở mức ổn định trong suốt quá trình mô phỏng. Mức ứng suất này tuy làm giảm độ nén của viên sản phẩm, nhưng lại giúp hạn chế đáng kể tác động cơ học lên vít ép, giảm nguy cơ biến dạng và mài mòn. Chính vì vậy, mô hình này mang lại lợi thế rõ rệt trong việc kéo dài tuổi thọ của vít và các chi tiết cơ khí liên quan.



Hình 11: Đồ thị ứng suất dọc trục 3 mô hình

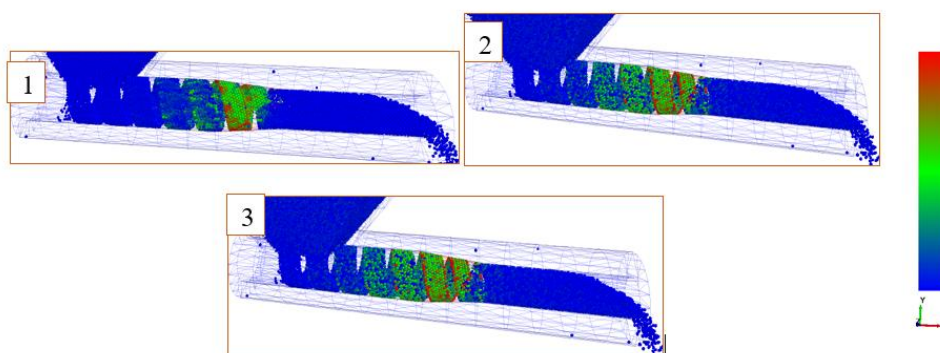
Lực nén tác dụng lên vật liệu rời trong quá trình ép phát sinh từ sự tiếp xúc giữa các hạt với nhau và với bề mặt vít ép. Kết quả mô phỏng cho thấy lực nén trung bình tác dụng lên hạt ở mô hình thứ nhất luôn cao nhất. Điều này phản ánh khả năng nén chặt của vật liệu, giúp sản phẩm đạt độ kết dính và độ chắc cao. Tuy nhiên, lực nén lớn cũng làm tăng tải trọng tác động lên vít ép, gây ma sát và mài mòn nhanh, đồng thời làm gia tăng chi phí bảo trì. Mô hình thứ hai thể hiện lực nén trung bình chỉ thấp hơn một chút so với mô hình thứ nhất. Nhờ đó, mô hình này vẫn đảm bảo khả năng nén chặt của viên sản phẩm, trong khi mức độ mài mòn vít ép được giảm nhẹ so với mô hình đầu tiên. Mô hình thứ ba có lực nén trung bình thấp nhất và duy trì ổn định trong suốt quá trình làm việc. Mặc dù điều này có thể làm sản phẩm ít chặt hơn, nó lại mang lại lợi thế rõ rệt trong việc giảm tải trọng tác động lên bề mặt vít và buồng ép, hạn chế ma sát, giảm mài mòn, kéo dài tuổi thọ thiết bị và giảm nhu cầu bảo trì.

LỰC NÉN TRUNG BÌNH LÊN HẠT 3 MÔ HÌNH VÍT ÉP



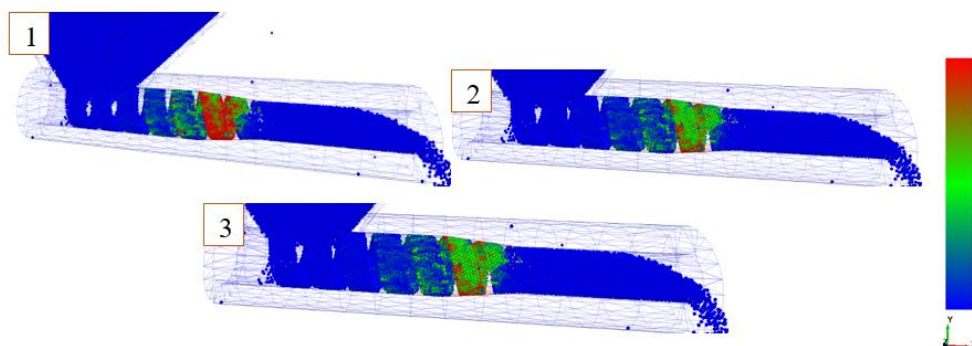
Hình 12: Đồ thị Lực nén trung bình tác dụng lên vật liệu 3 mô hình

Thông lượng nhiệt trung bình là chỉ số phản ánh mức độ trao đổi nhiệt giữa các hạt trong quá trình ép. Giá trị này càng cao cho thấy hệ hạt trao đổi nhiệt mạnh, hỗ trợ quá trình nén nhưng cũng tiềm ẩn nguy cơ nóng cục bộ. Ngược lại, thông lượng nhiệt thấp giúp hạn chế biến dạng nhiệt nhưng có thể làm giảm sự liên kết giữa các hạt. Kết quả mô phỏng cho thấy ở cả ba mô hình, thông lượng nhiệt tập trung chủ yếu tại vùng ép vật liệu. Mô hình thứ nhất duy trì thông lượng nhiệt trung bình cao nhất, cho thấy quá trình sinh nhiệt và truyền nhiệt trong hệ vật liệu diễn ra mạnh. Điều này giúp tăng khả năng nén và cải thiện độ kết dính của viên nén, tuy nhiên lại làm vít ép chịu tác động nhiệt lớn, dễ dẫn đến biến dạng, nứt và mài mòn nhanh hơn. Mô hình thứ hai có thông lượng nhiệt trung bình thấp hơn so với mô hình thứ nhất, đồng thời phân bố nhiệt ổn định hơn. Nhờ vậy, nguy cơ biến dạng nhiệt của vít ép được giảm bớt, trong khi vẫn duy trì khả năng nén và chất lượng viên sản phẩm ở mức chấp nhận được. Mô hình thứ ba thể hiện thông lượng nhiệt thấp nhất và ổn định trong suốt quá trình làm việc. Điều này giúp giảm đáng kể tác động nhiệt lên vít, hạn chế biến dạng và kéo dài tuổi thọ thiết bị. Tuy nhiên, mức nhiệt thấp có thể làm giảm một phần khả năng kết dính giữa các hạt, khiến sản phẩm nén kém chắc hơn so với hai mô hình còn lại.



Hình 13: Hình ảnh thông lượng nhiệt trung bình 3 mô hình

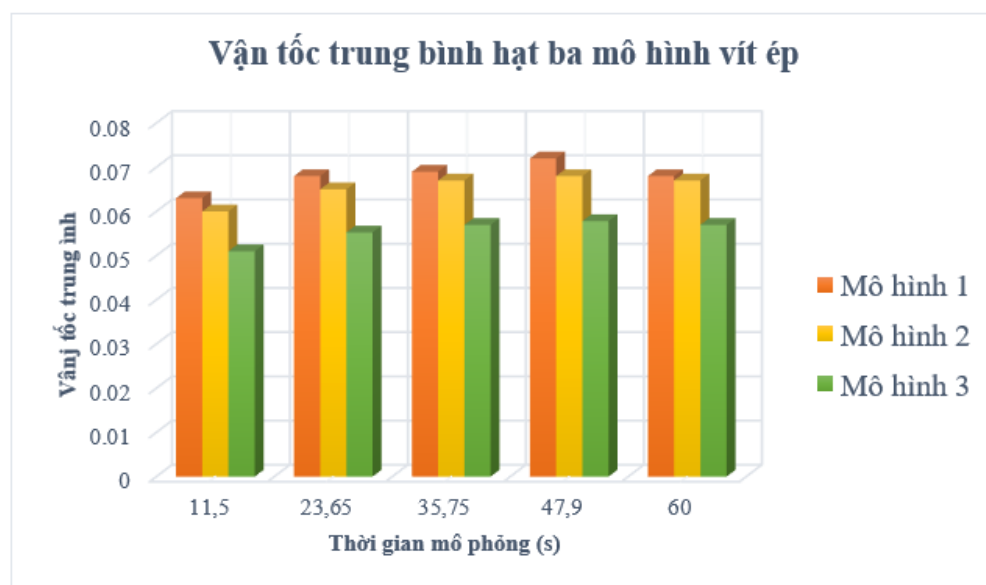
Tensor ứng suất trung bình trên hạt phản ánh trạng thái ứng suất tổng hợp bên trong từng hạt và toàn bộ hệ vật liệu trong quá trình ép. Kết quả mô phỏng cho thấy ở cả ba mô hình, tensor ứng suất tập trung chủ yếu tại các bước vít đầu tiên, đặc biệt là bước vít thứ nhất và thứ hai, nơi vật liệu được nén chặt nhất. Đây là khu vực chịu nội lực cao nhất, quyết định trực tiếp đến mật độ và độ kết dính của viên nén. Ở mô hình thứ nhất, tensor ứng suất luôn duy trì ở mức cao nhất. Điều này giúp tăng cường khả năng nén, tạo viên nén chắc và có mật độ cao. Tuy nhiên, giá trị ứng suất lớn cũng làm vít ép chịu nội lực phức tạp, dẫn đến nguy cơ mài mòn, biến dạng và nứt gãy ở nhiều vị trí, làm giảm tuổi thọ thiết bị. Mô hình thứ hai có tensor ứng suất thấp hơn so với mô hình thứ nhất và biến thiên ổn định hơn. Sự ổn định này giúp kiểm soát tốt quá trình nén, vừa đảm bảo chất lượng sản phẩm, vừa giảm tải trọng phức tạp lên vít ép. Tuy nhiên, do vẫn duy trì mức ứng suất tương đối cao, nguy cơ mài mòn ở các vùng chịu lực vẫn tồn tại. Mô hình thứ ba thể hiện giá trị tensor ứng suất thấp nhất trong cả ba mô hình. Điều này chứng tỏ nội lực tác động lên vít ép thấp, giúp hạn chế mài mòn, giảm biến dạng và nguy cơ hư hỏng, đồng thời kéo dài thời gian vận hành liên tục mà không cần bảo trì thường xuyên.



Hình 14: Hình ảnh Tensor ứng suất 3 mô hình

Vận tốc trung bình của hạt phản ánh sự di chuyển của dòng vật liệu trong quá trình ép và chịu ảnh hưởng lớn từ điều kiện nén tại các vị trí khác

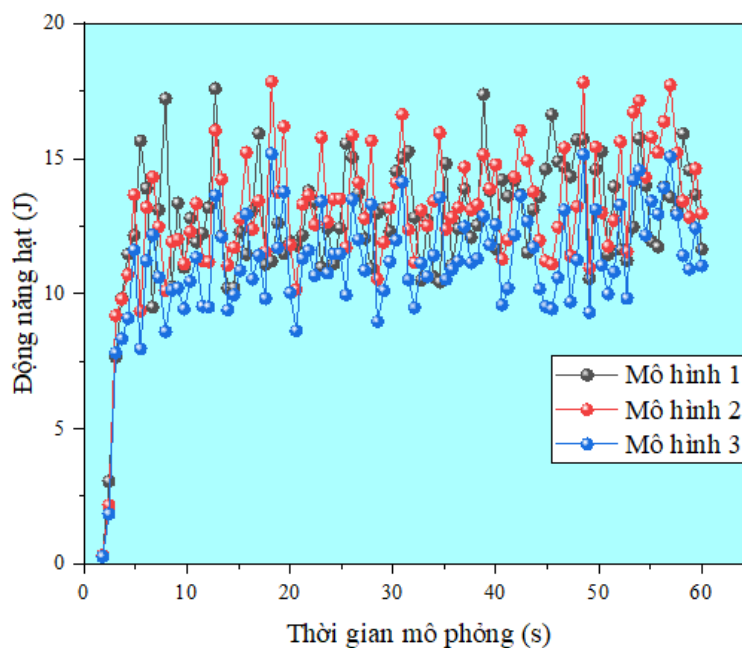
nhau trên trục vít. Kết quả mô phỏng cho thấy vận tốc cao xuất hiện chủ yếu ở vùng nạp liệu và đầu ra, nơi các hạt di chuyển tự do. Ngược lại, tại khu vực nén chặt, đặc biệt ở bước vít thứ hai, vận tốc giảm rõ rệt do sự gia tăng lực nén làm dòng hạt chậm lại, giúp tăng mật độ và ổn định cấu trúc viên nén. Kết quả tính toán chỉ ra rằng ở mô hình thứ nhất, vận tốc trung bình của hạt cao nhất trong cả ba mô hình. Điều này hỗ trợ quá trình nạp liệu nhanh, tăng năng suất, nhưng cũng khiến va đập và ma sát giữa các hạt với bề mặt vít cũng như buồng ép mạnh hơn, dẫn đến mài mòn nhanh. Mô hình thứ hai có vận tốc trung bình thấp hơn, với sự tăng dần từ đầu đến cuối trục vít, thể hiện quá trình nén diễn ra có kiểm soát, hạn chế va đập đột ngột và giảm phần nào mài mòn, mặc dù vẫn còn rủi ro ma sát lớn ở đoạn cuối. Mô hình thứ ba duy trì vận tốc hạt ở mức rất thấp và ổn định trong suốt quá trình ép. Đặc điểm này giúp giảm đáng kể sự va chạm và ma sát giữa các hạt và bề mặt vít, từ đó giảm mài mòn và kéo dài tuổi thọ thiết bị. Tuy nhiên, vận tốc thấp có thể khiến năng suất giảm và khả năng nén chặt của viên thành phẩm không cao nếu không có các biện pháp hỗ trợ bổ sung.



Hình 15: Đồ thị Vận tốc trung bình hạt 3 mô hình

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

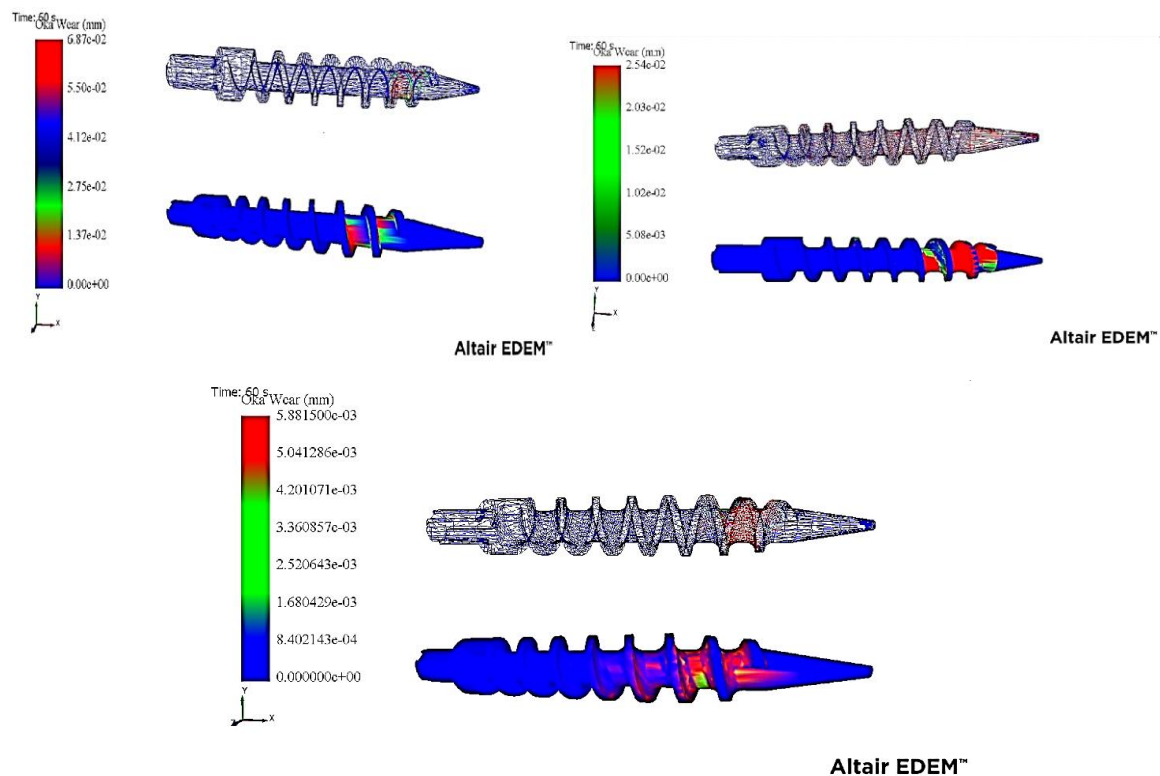
nằm ngang, sự thay đổi vị trí của hạt theo phương trọng lực là rất nhỏ, do đó thế năng gần như không biến đổi đáng kể. Ngược lại, vận tốc của hạt thay đổi liên tục do chịu tác động của lực pháp tuyến, lực tiếp tuyến và ma sát trượt, khiến động năng trở thành thành phần chi phối toàn bộ cơ chế truyền 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.



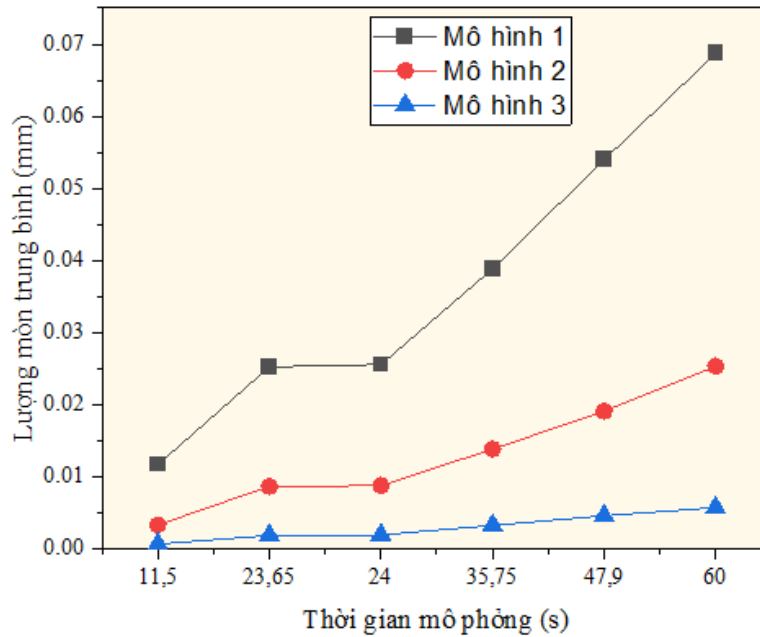
Hình 16: Đồ thị động năng hạt 3 mô hình

Mài mòn là hiện tượng hao hụt vật liệu trên bề mặt vít ép do tác động đồng thời của ma sát, tải trọng, va chạm và môi trường làm việc khắc nghiệt. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình vít ép thứ nhất có mức độ mòn lớn nhất, với mòn tập trung chủ yếu ở ba cánh vít đầu tiên, đặc biệt tại các vị trí chân cánh. Lượng mòn tăng nhanh theo thời gian, đạt giá trị trung bình 0,0687 mm và tổng lượng mòn 497,8 mm sau 60 giờ mô phỏng. Mòn không phân bố đều, tập trung cục bộ gây nguy cơ hỏng hóc sớm. Mô hình vít ép thứ hai thể hiện sự giảm rõ rệt về lượng mòn so với mô hình đầu tiên. Mòn vẫn chủ yếu xuất hiện ở các bước vít đầu, nhưng phân bố đều hơn. Sau 60 giờ, lượng mòn trung bình đạt 0,0254 mm và tổng lượng mòn 163,2 mm. Việc điều chỉnh hình học vít ở mô hình này đã làm giảm áp suất và phân bố lực tốt hơn, nhờ đó mòn giảm và thiết bị vận hành ổn định hơn. Mô hình vít ép thứ ba cho thấy hiệu quả giảm mòn vượt trội. Mòn được phân bố đồng đều trên ba bước vít đầu tiên và giảm đáng kể ở các vị trí quan trọng. Lượng mòn trung bình chỉ còn 0,0058 mm, trong khi tổng lượng mòn đạt 40,6 mm sau 60 giờ. Kết quả này chứng minh

rằng thiết kế hình học tối ưu giúp giảm tải cơ học, hạn chế ma sát và bảo vệ bề mặt vít ép hiệu quả hơn so với hai mô hình trước. So sánh tổng thể, mô hình thứ nhất chịu mài mòn cao nhất do áp suất và lực tác dụng lớn, dẫn đến ma sát và nhiệt cao. Mô hình thứ hai cải thiện phân bố lực, giảm mòn nhưng vẫn tồn tại rủi ro tập trung ứng suất ở một số vị trí. Mô hình thứ ba đạt mức mòn thấp và ổn định nhất, kéo dài tuổi thọ vít ép, mặc dù cần xem xét thêm các biện pháp để duy trì chất lượng viên nén khi lực và áp suất thấp hơn.



Hình 16: Lượng mòn trung bình 3 mô hình



Hình 17: Tổng Lượng mòn 3 mô hình

Kết quả từ chương 2 khẳng định rằng hệ thống vít ép - bu lông ép với vật liệu mún của đã được xây dựng thành công cả về sơ đồ khối, mô hình hình học và mô phỏng số. Các kết quả mô phỏng cho thấy mô hình thứ nhất và mô hình thứ hai đạt áp suất, lực nén và ứng suất dọc trục cao, giúp viên nén có mật độ chắc chắn. Tuy nhiên, điều này cũng dẫn đến tổng lượng mòn lớn, tập trung nhiều ở cuối trục vít, làm tăng nguy cơ hư hỏng và chi phí bảo trì. Ngược lại, mô hình thứ ba duy trì các chỉ tiêu cơ học ở mức thấp và ổn định hơn, với vận tốc hạt nhỏ, giảm va đập và ma sát, kiểm soát mài mòn tốt và lượng mòn phân bố đều hơn trên chiều dài vít. Từ các kết quả đạt được, có thể khẳng định mô hình thứ ba là phương án tối ưu, đáp ứng đồng thời mục tiêu chống mài mòn, duy trì hiệu suất ép và nâng cao độ bền làm việc của vít ép. Thông số hình học mô hình 3 được thể hiện như bảng 1:

Bảng 1. 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

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

Chương 3 trình bày những yếu tố cơ bản quyết định đến độ bền mòn của lớp phủ, đồng thời mô tả phương pháp nghiên cứu và cách thức đánh giá trong thực nghiệm. Độ bền mòn không chỉ phụ thuộc vào một yếu tố riêng lẻ mà là kết quả tổng hợp của nhiều đặc tính vật lý và cơ học như cấu trúc lớp phủ, độ cứng, chiều dày lớp phủ. Các yếu tố này tương tác lẫn nhau và cùng ảnh hưởng đến khả năng bảo vệ bề mặt khỏi sự mài mòn. Trong bối cảnh này, công nghệ phun phủ HVOF cho phép kiểm soát tốt các thông số ảnh hưởng, nhờ đó tạo ra lớp phủ có độ bền mòn cao và ổn định. Phương pháp thực nghiệm được xây dựng nhằm đánh giá chi tiết độ bền mòn của lớp phủ, với các bước nghiên cứu được mô tả trong sơ đồ khối phương pháp thực nghiệm.

Vật liệu nền sử dụng để chế tạo vít ép và mẫu thí nghiệm là thép C45, loại thép phổ biến trong chế tạo cơ khí, đặc biệt phù hợp với chi tiết dạng xoắn vít nhờ tính chất cơ học tốt. Mẫu thí nghiệm được cắt trực tiếp từ vít ép nhằm giữ nguyên biên dạng thực tế, sau đó được phun phủ bề mặt bằng công nghệ HVOF. Các mẫu này được mài, đánh bóng và tẩm thực trước khi chụp ảnh SEM và đo độ cứng, đảm bảo bề mặt đạt chất lượng phân tích. Vật liệu phun phủ sử dụng gồm bột hợp kim Ni pha WC.

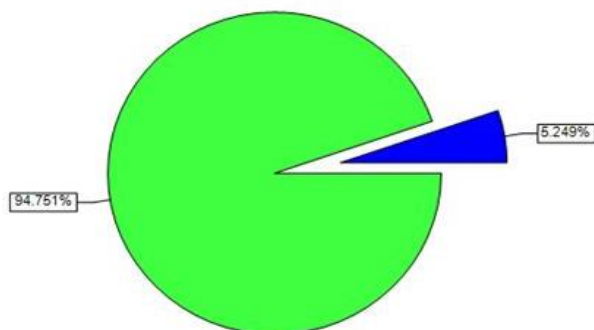
Hệ thống thiết bị phun phủ HVOF được sử dụng là loại HP-2700M, bao gồm bộ cấp bột PF-3350 với khả năng điều khiển lưu lượng chính xác, bộ cấp khí gồm oxy, propan, nitơ và hệ thống khí nén, cùng bộ điều chỉnh lưu lượng MP-2100. Súng phun HP-2700M được lựa chọn để đảm bảo điều kiện phun phù hợp với kích thước hạt và tính chất vật liệu, giúp kiểm soát quá trình tạo lớp phủ. Trong quá trình nghiên cứu, nhiều thiết bị đo lường được sử dụng để đánh giá các đặc tính lớp phủ. Kính hiển vi quang học Leica DM750 M dùng để phân tích độ hạt và cấu trúc lớp phủ với các mức phóng đại khác nhau, kết hợp phần mềm LAS V4.12 hỗ trợ phân tích hình ảnh. Độ cứng lớp phủ được xác định bằng máy ISOSCAN HV2 AC, sử dụng phương pháp đâm mũi kim cương Vickers hoặc Knoop, với khả năng điều chỉnh tải trọng và định vị chính xác theo ba phương. Các thiết bị này được sử dụng tại phòng thí nghiệm Trường Cơ khí ô tô - Đại học Công nghiệp Hà Nội, đảm bảo độ chính xác cao trong thử nghiệm.

Trong nghiên cứu, phương pháp đo cấu trúc lớp phủ tập trung vào hai yếu tố chính là độ hạt và độ xốp, vốn có ảnh hưởng lớn đến độ bền mòn của lớp phủ phun HVOF. Bột phun sử dụng là loại hợp kim Nickel pha Cacbit Wolfram

(WC), được biết đến với khả năng chịu ma sát và chống mài mòn cao, thích hợp để bảo vệ vít ép hoạt động trong điều kiện áp suất và nhiệt độ khắc nghiệt. Quá trình phun phủ được thực hiện với các thông số chính gồm lưu lượng phun, khoảng cách phun và tỷ lệ oxy/propan. Để đảm bảo chất lượng lớp phủ, các thông số tối ưu được lựa chọn gồm lưu lượng phun 25-35 g/ph, khoảng cách 0,2-0,3 m và tỷ lệ oxy/propan từ 3-5. Độ hạt của lớp phủ được đo bằng kính hiển vi quang học Leica với độ phóng đại x300. Kết quả cho thấy kích thước hạt sau phun HVOF đạt từ 401 nm đến 2,78 μm . Sự xuất hiện của các hạt mịn và đồng đều chứng minh rằng lớp phủ đạt chất lượng cao, tạo bề mặt đặc chắc, góp phần nâng cao khả năng chống mài mòn. Độ xốp của lớp phủ cũng được đánh giá thông qua ảnh SEM với độ phóng đại 300 lần, kết hợp phân tích phần trăm lỗ xốp. Kết quả phân tích cho thấy cấu trúc lớp phủ đạt độ đặc tốt khi các thông số phun được lựa chọn hợp lý, giảm thiểu lỗ xốp, từ đó cải thiện đáng kể khả năng bảo vệ bề mặt vít ép trong điều kiện làm việc khắc nghiệt.

Bảng 1: 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)	$\overline{\text{Po}}$ (%)
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



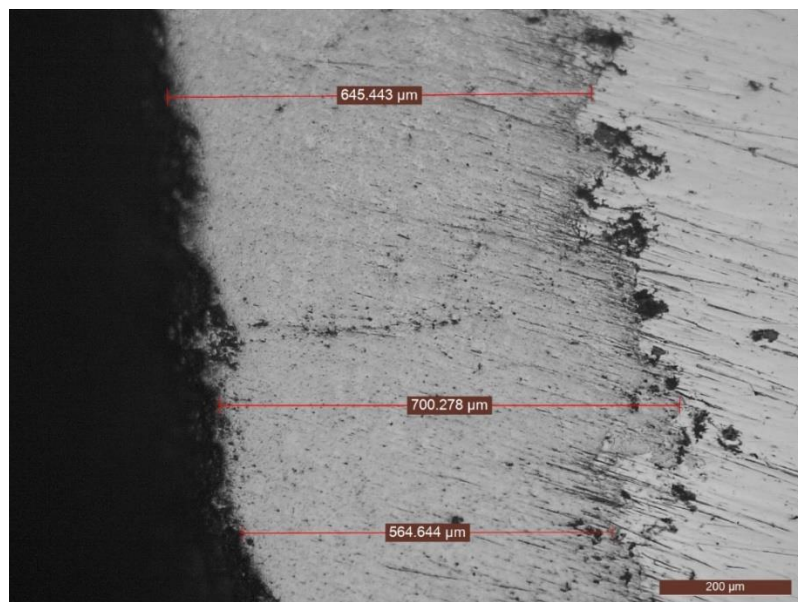
Hình 18: Ảnh phân tích theo % của độ xốp lớp phủ

Độ cứng của lớp phủ là yếu tố quan trọng quyết định khả năng chống mài mòn. Trong quá trình tạo lớp phủ, các hạt phun va đập mạnh vào bề mặt, gây biến dạng và rèn ép các phần tử, làm tăng độ đặc chắc và độ cứng. Đặc biệt, công nghệ phun HVOF với tốc độ hạt cao và nhiệt độ nguồn nhiệt tương đối thấp giúp tăng cường tính bền và độ cứng lớp phủ so với các phương pháp phun nhiệt khác. Trong nghiên cứu này, các mẫu thực nghiệm được chế tạo với 9 chế độ phun khác nhau để khảo sát ảnh hưởng của thông số phun đến độ cứng lớp phủ. Ba thông số được thay đổi gồm: lưu lượng phun ở ba mức 25, 30 và 35 g/phút; khoảng cách phun ở ba mức 0,2; 0,25 và 0,3 m; tỷ lệ oxy/propan ở ba mức 4, 5 và 6. Kết quả đo độ cứng thu được từ các mẫu ở 9 chế độ phun được trình bày trong bảng trực giao Taguchi L9, cho thấy sự thay đổi rõ rệt của độ cứng lớp phủ theo từng tổ hợp thông số phun.

Bảng 2: Bảng Taguchi L9 với các giá trị độ cứng đo được

TT	F (g/min)	D (m)	R	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

Chiều dày lớp phủ trên nền thép C45 được xác định bằng kính hiển vi quang học Leica với độ phóng đại x300, cho phép quan sát và đo đạc chính xác cấu trúc lớp phủ sau khi phun HVOF. Kết quả đo từ 9 mẫu thí nghiệm cho thấy giá trị chiều dày dao động trong khoảng từ 406,518 μm đến 747,009 μm . Khoảng dao động này phản ánh sự ổn định của quá trình phun phủ, đồng thời cho thấy khả năng kiểm soát tốt các thông số phun để tạo ra lớp phủ có độ đồng đều cao. Kết quả cũng chứng minh rằng phương pháp HVOF không chỉ cho lớp phủ bám dính tốt mà còn đảm bảo độ dày đạt yêu cầu, từ đó góp phần nâng cao tuổi thọ và hiệu suất làm việc của các chi tiết cơ khí được phủ.



Hình 19: Ảnh phóng đại x300 đo kích thước hạt của lớp phủ

Trong nghiên cứu, bột phun HVOF được lựa chọn với thành phần WC và Ni nhờ khả năng chịu mài mòn, nhiệt độ và áp suất cao, phù hợp tạo lớp phủ chống mài mòn và ăn mòn. Bột được pha trộn theo các tỷ lệ khác nhau để phun phủ, đo cơ tính và thử nghiệm thực tế. Thử nghiệm cho thấy lớp phủ có hạt mịn ($0,4\text{--}2,8\text{ }\mu\text{m}$), độ xốp thấp và độ cứng cao. Lớp phủ tạo bởi HVOF có cấu trúc lớp dày đặc ($400\text{--}750\text{ }\mu\text{m}$), 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 $400\text{--}750\text{ }\mu\text{m}$, đảm bảo khả năng bảo vệ bề mặt mà không gây ứng suất dư quá lớn. 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

Chương 4 tập trung vào thực nghiệm và phân tích kết quả nhằm đánh giá độ bền mòn vít ép tải trọng cao trong thực tế.

Quá trình thử nghiệm và đánh giá độ bền mòn của vít ép tải trọng cao trong điều kiện làm việc thực tế được trình bày. Thí nghiệm được thực hiện bằng cách so sánh lượng mòn của 4 loại vít: vít ép mô hình 1, vít ép mô hình 1 có phủ HVOF, vít ép tối ưu (mô hình 3) không phủ và vít ép tối ưu có phủ HVOF. Mỗi loại vít được lắp đặt trong máy ép, vận hành liên tục 24 giờ với cùng điều kiện và thông số, sau đó được cân chính xác để xác định khối lượng hao hụt do mài mòn. Kết quả cho 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, sự kết hợp hai giải pháp mang đến hiệu quả tối ưu, không chỉ kéo dài tuổi thọ làm việc mà còn giảm chi phí bảo trì và nâng cao hiệu suất vận hành của vít ép tải trọng cao.

Sau khi hoàn thành các thử nghiệm đo lượng mòn bằng phương pháp cân khối lượng, công nghệ quét 3D được sử dụng để kiểm tra chi tiết hơn về sự phân bố, hình dạng và mức độ mòn cục bộ trên bề mặt vít ép. 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.

Kết luận, nghiên cứu đã tập trung vào việc tối ưu thiết kế vít ép tải trọng cao và áp dụng công nghệ phun phủ HVOF để cải thiện độ bền mòn. Quá trình phân tích và thực nghiệm cho thấy việc điều chỉnh biên dạng, đặc biệt tăng chiều dày cánh tại vùng chịu tải, giúp phân bố lực đều hơn và giảm mài mòn cục bộ. Mô hình vít ép thứ ba, với thiết kế tối ưu và lớp phủ HVOF, thể hiện khả năng chịu tải tốt, giảm biến dạng và duy trì hình dạng trong quá trình vận hành. Các kết quả mô phỏng cũng khẳng định lượng mòn chủ yếu tập trung ở vùng giữa cánh vít thứ nhất đến thứ ba, nhưng mức độ mòn giảm dần từ mô hình thứ nhất đến mô hình thứ ba, kéo dài đáng kể thời gian làm việc.

Công nghệ phun phủ HVOF đã chứng minh khả năng tạo ra lớp phủ tốt. Lớp phủ có cấu trúc dạng lớp với độ dày từ $400\text{ }\mu\text{m}$ đến $750\text{ }\mu\text{m}$, được kiểm chứng bằng kính hiển vi quang học. Các yếu tố ảnh hưởng đến đặc tính lớp phủ cũng được xác định rõ: khoảng cách phun có tác động lớn nhất đến độ xốp và độ cứng, trong khi tỷ lệ oxy/propan quyết định độ bám dính. Từ dữ liệu thực nghiệm, các mô hình toán học hồi quy đã được xây dựng, cho phép tìm ra chế độ phun tối ưu nhằm nâng cao hiệu suất lớp phủ.

Trong hướng nghiên cứu tiếp theo, cần khảo sát thêm các vật liệu phủ mới và điều chỉnh thông số HVOF để tiếp tục cải thiện độ bền mòn và giảm chi phí. Các phương pháp cải tiến lớp phủ, như sử dụng vật liệu composite hoặc lớp phủ chịu nhiệt cao, sẽ được thử nghiệm để tăng khả năng bảo vệ vít. Đồng thời, việc ứng dụng trí tuệ nhân tạo trong mô phỏng và tối ưu hóa thiết kế sẽ nâng cao độ chính xác dự đoán về mài mòn và tuổi thọ vít ép. Ngoài ra, mở rộng thực nghiệm trong các môi trường sản xuất khác nhau sẽ giúp đánh giá tác động của điều kiện làm việc đa dạng. Cuối cùng, nghiên cứu thiết kế vít ép thông minh tích hợp cảm biến và thử nghiệm các lớp phủ sinh học thân thiện

môi trường sẽ mở ra hướng tiếp cận mới, đáp ứng cả yêu cầu kỹ thuật và bảo vệ môi trường.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC ĐÃ CÔNG BỐ

- [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 Mở 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, LATs, 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 học Mở 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] Pérowski, 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.

