

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ ĐỘ XỐP LỚP PHỦ WC-12Co TRÊN NỀN THÉP 40Cr CHẾ TẠO BẰNG CÔNG NGHỆ PHUN PHỦ HVOF ỨNG DỤNG PHỤC HỒI TRỤC CAM Ô TÔ

STUDY ON THE EVALUATION OF POROSITY IN HVOF-SPRAYED WC-12CO COATINGS ON 40Cr STEEL SUBSTRATES FOR AUTOMOTIVE CAMSHAFT RESTORATION APPLICATIONS

Phạm Văn Liệu, Dương Hải Nam

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp

Đến Tòa soạn ngày 01/4/2026, chấp nhận đăng ngày 15/5/2026

Tóm tắt: Trục cam là chi tiết làm việc dưới tải trọng tiếp xúc và ma sát lớn nên bề mặt vấu cam dễ bị mài mòn. Công nghệ phun HVOF được cho là giải pháp hiệu quả để phục hồi và nâng cao tuổi thọ cho các chi tiết. Nghiên cứu tập trung đánh giá độ xốp lớp phủ WC-12Co trên nền thép 40Cr nhằm ứng dụng phục hồi trục cam ô tô. Thí nghiệm thiết kế theo ma trận trực giao Taguchi L9 với ba thông số: lưu lượng cấp bột (m), tốc độ quay chi tiết (n) và bước dịch chuyển đầu phun (S). Cấu trúc vi mô được xác định theo tiêu chuẩn JIS H 8664:1997 bằng kính hiển vi quang học và phân tích ảnh SEM. Kết quả cho thấy cấu trúc đặc trưng của lớp phủ WC-12Co, các hạt WC phân bố đều trong nền Co. Độ xốp dao động trong khoảng 1,35–3,30%, trong đó giá trị nhỏ nhất là 1,35% với chế độ tối ưu (m = 30 g/phút, n = 150 vòng/phút, S = 8 mm/vòng). Lớp phủ có cấu trúc đặc, ít khuyết tật, phù hợp cho ứng dụng phục hồi và nâng cao độ bền bề mặt trục cam. Ngoài ra, với giá trị độ xốp thấp ($\leq 2\%$), lớp phủ WC-12Co có khả năng cải thiện đáng kể độ bền mỏi tiếp xúc và khả năng chống mài mòn, từ đó đáp ứng yêu cầu làm việc của vấu cam trong điều kiện tải trọng và ma sát lớn. Kết quả này cung cấp cơ sở khoa học cho việc ứng dụng lớp phủ trong phục hồi trục cam ô tô.

Từ khóa: HVOF, WC-12Co, độ xốp lớp phủ, thép 40Cr, phục hồi trục cam.

Abstract: The camshaft is a component operating under high contact loads and severe friction conditions; therefore, the cam lobe surface is highly susceptible to wear. High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) spraying technology is considered an effective solution for restoring and extending the service life of such components. This study focuses on evaluating the porosity of WC-12Co coatings deposited on 40Cr steel substrates for application in automotive camshaft restoration. The experiments were designed based on the Taguchi L9 orthogonal array with three parameters: powder feed rate (m), workpiece rotational speed (n), and spray gun traverse pitch (S). The microstructure was characterized according to JIS H 8664:1997 using optical microscopy and SEM image analysis. The results reveal the typical structure of the WC-12Co coating, in which WC particles are uniformly distributed within the Co matrix. The coating porosity ranged from 1.35% to 3.30%, with the minimum value of 1.35% obtained under the optimal conditions of m = 30 g/min, n = 150 rpm, and S = 8 mm/rev. The coating exhibited a dense structure with few defects, making it suitable for restoring and improving the surface durability of camshafts. Furthermore, with a low porosity value ($\leq 2\%$), the WC-12Co coating significantly enhances contact fatigue strength and wear resistance, thereby satisfying the operating requirements of cam lobes under high load and friction conditions. These results provide a scientific basis for the application of coatings in automotive camshaft restoration.

Keywords: HVOF, WC-12Co, coating porosity, 40Cr steel, camshaft restoration.

1. GIỚI THIỆU

Trong động cơ đốt trong, trục cam thuộc cơ cấu phân phối khí và có vai trò điều khiển quá trình đóng mở xupap theo đúng quy luật làm việc của động cơ. Thông qua sự quay đồng bộ với trục khuỷu, vấu cam tác động lên con đội hoặc cò mổ để điều khiển hành trình và thời điểm mở xupap. Vì vậy, trạng thái làm việc của trục cam ảnh hưởng trực tiếp đến quá trình trao đổi khí, công suất và hiệu suất làm việc của động cơ [1].

Trong quá trình làm việc, bề mặt vấu cam chịu tải trọng tiếp xúc lớn kết hợp với ma sát trượt và lăn liên tục. Ngoài ra, khu vực này còn làm việc trong môi trường bôi trơn và chịu ảnh hưởng của nhiệt độ cao, do đó bề mặt làm việc của trục cam dễ bị mài mòn, rỗ bề mặt hoặc bong tróc lớp vật liệu bề mặt. Các dạng hư hỏng này làm thay đổi biên dạng vấu cam, ảnh hưởng đến quy luật đóng mở xupap và làm giảm hiệu suất của động cơ.

Hiện nay, để phục hồi các chi tiết bị mài mòn, nhiều phương pháp đã được sử dụng như hàn đắp, mạ cứng crom và phun phủ nhiệt. Trong đó, công nghệ phun HVOF (High Velocity Oxygen Fuel – phun phủ nhiên liệu oxy tốc độ cao) được sử dụng rộng rãi do có khả năng tạo lớp phủ có độ bám dính cao, cấu trúc chắc và độ xốp thấp (thường nhỏ hơn 2%). Trong công nghệ này, các hạt bột vật liệu được gia tốc trong dòng khí cháy với vận tốc rất lớn, thường đạt 600 - 1200 m/s, trước khi va chạm và bám dính lên bề mặt nền. Nhờ đó, lớp phủ tạo thành có khả năng chống mài mòn tốt và phù hợp với các chi tiết chịu tải tiếp xúc lớn [2].

Vật liệu WC-12Co là vật liệu gốm kim loại được sử dụng phổ biến trong phun phủ HVOF nhờ sự kết hợp giữa độ cứng cao của pha

cacbit vonfram và độ dẻo dai của pha liên kết coban. Nhờ đó, lớp phủ có khả năng chống mài mòn cao đồng thời vẫn đảm bảo độ bền và khả năng chịu va đập, phù hợp cho phục hồi các chi tiết trong ngành cơ khí và ô tô như trục cam, trục bơm và các chi tiết chịu ma sát lớn [3].

Trong những năm gần đây, nhiều nhà nghiên cứu đã tập trung phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ trong quá trình phun HVOF đến chất lượng lớp phủ WC-12Co. Các thông số quan trọng thường được khảo sát bao gồm khoảng cách phun, lưu lượng oxy, nhiệt độ buồng phun và các thông số động học như tốc độ quay chi tiết và bước dịch chuyển đầu phun. Các thông số này ảnh hưởng trực tiếp đến trạng thái nhiệt của hạt, vận tốc va đập và khả năng dàn trải khi lắng đọng lên bề mặt nền.

Kết quả cho thấy sự thay đổi của các thông số công nghệ này có tác động đáng kể đến quá trình hình thành cấu trúc tế vi của lớp phủ, đặc biệt là mức độ dàn trải của các hạt nóng chảy, khả năng bám dính giữa lớp phủ và vật liệu nền, cũng như độ xốp của lớp phủ. Khi khoảng cách phun được lựa chọn phù hợp, các hạt WC-12Co đạt trạng thái nóng chảy hoặc bán nóng chảy tối ưu và va đập với vận tốc cao, tạo điều kiện cho quá trình dàn trải tốt và hình thành cấu trúc lớp phủ chắc. Ngược lại, khoảng cách phun không phù hợp có thể làm giảm mức độ nóng chảy hoặc vận tốc hạt, dẫn đến cấu trúc lớp phủ kém đặc chắc và làm tăng độ xốp [4].

Tuy nhiên, đối với các chi tiết dạng trục, điển hình là trục cam chế tạo bằng thép 40Cr, ảnh hưởng tổng hợp của các thông số công nghệ đến độ xốp của lớp phủ vẫn chưa được nghiên cứu một cách đầy đủ và có hệ thống. Trong khi đó, độ xốp là một trong những chỉ tiêu

quan trọng phản ánh mức độ đặc chắc của cấu trúc lớp phủ, đồng thời có ảnh hưởng trực tiếp đến khả năng chống mài mòn, độ bền mỏi tiếp xúc và độ bám dính giữa lớp phủ với vật liệu nền. Vì vậy, việc đánh giá định lượng mối quan hệ giữa các thông số công nghệ phun như lưu lượng cấp bột phun, tốc độ quay của chi tiết và bước dịch chuyển của đầu phun đến độ xốp của lớp phủ WC-12Co trên nền thép 40Cr có ý nghĩa khoa học và thực tiễn quan trọng. Kết quả nghiên cứu góp phần xác định miền thông số công nghệ phù hợp, nhằm nâng

cao chất lượng lớp phủ và mở rộng khả năng ứng dụng công nghệ phun phủ HVOF trong phục hồi trục cam ô tô.

2. VẬT LIỆU, THIẾT BỊ VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Vật liệu thí nghiệm

Vật liệu nền: Vật liệu nền được sử dụng trong nghiên cứu này là thép 40Cr, có cơ tính và thành phần hoá học được trình bày trong Bảng 1 và Bảng 2.

Bảng 1. Thành phần hoá học của thép 40Cr

Đơn vị tính: %

Mác thép	C	Si	Mn	Cr	Ni	Thành phần khác
40Cr	0.36 - 0.44	< 0.4	< 0.80	0.8 - 1.1	≤ 0.3	-

Bảng 2. Cơ tính của thép 40Cr

Mác thép	Trạng thái nhiệt luyện	Cơ tính			Độ cứng HB
		σ_k (MPa)	σ_{ch} (MPa)	δ (%)	
40Cr	Thường hoá	980	785	9	217

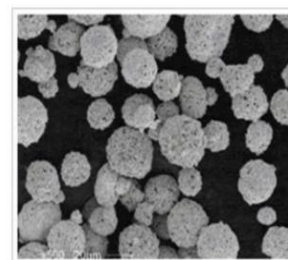
Mẫu thí nghiệm được chế tạo theo biên dạng của vấu cam như (Hình 1). Số lượng mẫu được thực hiện trong nghiên cứu này là 9 mẫu.



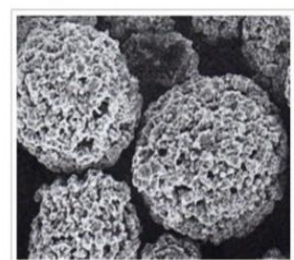
Hình 1. Vấu cam

Vật liệu bột phun: Vật liệu phủ được sử dụng trong quá trình thực nghiệm là bột hợp kim WC-12Co, được cung cấp bởi PAC Powder Alloy (Hoa Kỳ) có dạng hình cầu với kích thước hạt từ 5 đến 45 μm . Thành phần bột

gồm 88 % Cacbua Vonfram (WC) và 12 % Coban (Co) có khả năng chống mài mòn cao.



X500



X2000

Hình 2. Bột phun WC-12Co

Trước khi tiến hành phun phủ, bề mặt mẫu thép 40Cr được xử lý bằng phương pháp phun hạt mài với hạt Al_2O_3 nhằm tạo độ nhám bề mặt và tăng khả năng bám dính của lớp phủ. Độ nhám bề mặt sau khi phun hạt mài đạt khoảng $R_a = 8 - 10 \mu\text{m}$ [5]. Sau đó, mẫu được làm sạch bằng khí nén và dung môi để loại bỏ

bụi và tạp chất trước khi tiến hành phun phủ.

2.2. Thiết bị thực nghiệm

Thiết bị sử dụng trong thí nghiệm phun phủ là hệ thống phun HVOF model MP-2100 Manual HVOF Control Panel, do Metallizing Equipment Co. Pvt. Ltd. (Jodhpur, India) cung cấp. Hệ thống bao gồm các bộ phận chính: hệ thống cấp khí (oxy, propan và khí nén), bộ cấp bột PF-3350, bảng điều khiển lưu lượng MP-2100, súng phun HVOF HP-2700-M và các thiết bị hỗ trợ khác. Các thông số kỹ thuật của hệ thống phun được trình bày trong Bảng 3 và được duy trì ổn định trong toàn bộ quá trình thí nghiệm.

Bảng 3. Thông số kỹ thuật hệ thống phun HVOF

TT	Khí	Lưu lượng (LPM)	Áp suất
1	Oxy	250-350	10.0 kg/cm ²
2	LPG/Propane	60-80	7.0 kg/cm ²
3	Khí nén	600-700	7.0 kg/cm ²

Chế độ công nghệ phun được lựa chọn dựa trên cơ sở phân tích lý thuyết về công nghệ phun HVOF kết hợp với các kết quả nghiên cứu đã được công bố trong các tài liệu [5], [6], [7], [8] nhằm xác định phạm vi thông số phù hợp cho quá trình thực nghiệm. Ba thông số công nghệ chính được khảo sát gồm: lưu lượng cấp bột (m), tốc độ quay chi tiết (n) và bước dịch chuyển đầu phun (S). Mỗi thông số được lựa chọn ở ba mức giá trị và các thí nghiệm được bố trí theo ma trận trực giao L9 của phương pháp Taguchi. Mô hình bố trí thí nghiệm và kết quả độ xốp của lớp phủ được trình bày trong Bảng 4.

Bảng 4. Ma trận trực giao L9 theo phương pháp Taguchi và kết quả độ xốp lớp phủ

TT	“Thông số phun”			Độ xốp (%)
	m (g/phút)	n (vòng/phút)	S (mm/vòng)	
1	30	50	4	3,11
2	30	100	6	2,09
3	30	150	8	1,35
4	32	50	6	2,72
5	32	100	8	2,07
6	32	150	4	2,23
7	34	50	8	2,89
8	34	100	6	3,30
9	34	150	4	1,85

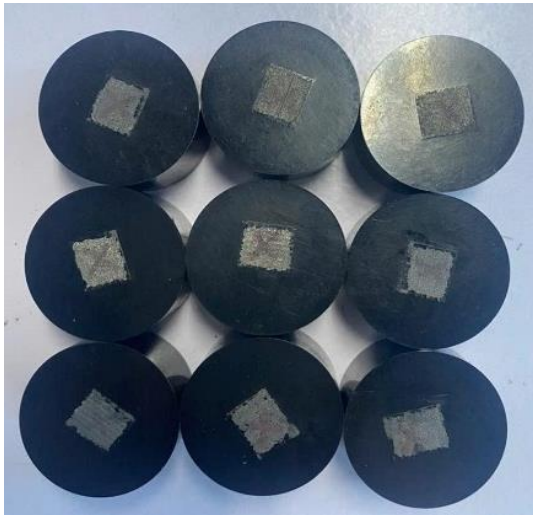
Trong quá trình phun phủ, khoảng cách phun được duy trì ở mức 250 mm và góc phun vuông góc với bề mặt mẫu được giữ ổn định trong toàn bộ quá trình thực nghiệm. Mỗi thí nghiệm được lặp lại ba lần để đảm bảo độ tin cậy của kết quả đo độ xốp.

2.3. Phương pháp xác định độ xốp lớp phủ

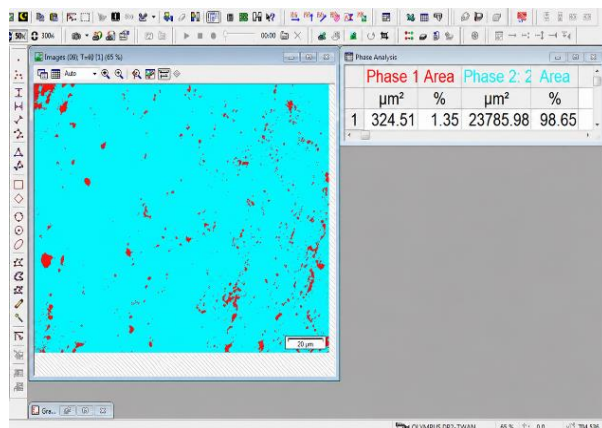
Độ xốp của lớp phủ được xác định bằng phương pháp phân tích ảnh hiển vi theo tiêu chuẩn JIS H 8664:1997 [9]. Mẫu sau khi phun phủ được cắt theo phương vuông góc với bề mặt lớp phủ, sau đó được đúc trong nhựa epoxy, mài và đánh bóng theo quy trình chuẩn của phân tích kim tương để thu được bề mặt quan sát phẳng và không có vết xước (Hình 3).

Mẫu sau khi chuẩn bị được quan sát bằng kính hiển vi quang học kết hợp với hệ thống phần mềm phân tích ảnh. Trong ảnh hiển vi, các vùng lỗ rỗng được phần mềm nhận dạng và tách biệt khỏi vùng vật liệu của lớp phủ. Phần mềm tiến hành tính toán tỷ lệ diện tích lỗ rỗng

so với tổng diện tích vùng quan sát. Giá trị phần trăm diện tích lỗ rỗng này được xem là độ xốp của lớp phủ. Phương pháp phân tích ảnh số cho phép xác định độ xốp một cách định lượng, có độ chính xác và được sử dụng phổ biến trong nghiên cứu lớp phủ phun nhiệt (Hình 4).



Hình 3. Mẫu kiểm tra độ xốp lớp phủ



Hình 4. Ảnh chụp phân tích độ xốp lớp phủ

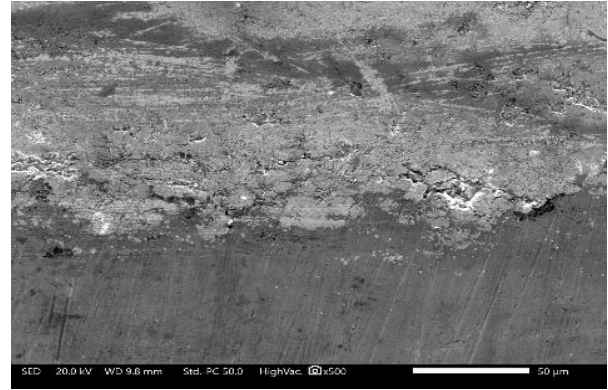
Ngoài ra, mỗi mẫu được đo tại nhiều vùng quan sát khác nhau và giá trị độ xốp được tính trung bình kèm theo sai số tiêu chuẩn nhằm đảm bảo độ tin cậy của kết quả. Phương pháp xử lý số liệu thống kê được sử dụng để đánh giá độ lặp lại của thí nghiệm.

Ngoài tiêu chuẩn JIS H 8664:1997, kết quả phân tích cũng được đối chiếu với các phương pháp đánh giá độ xốp theo tiêu chuẩn ASTM

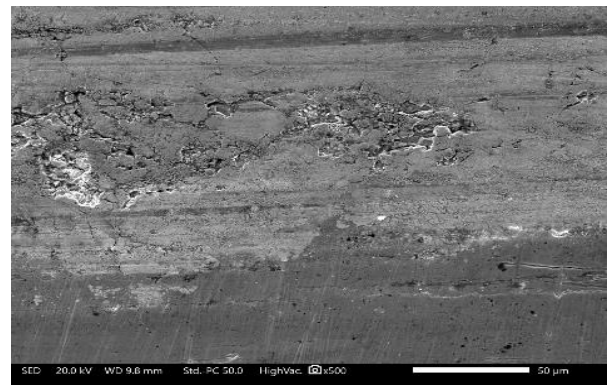
E2109 [10] nhằm nâng cao tính tương thích và khả năng so sánh quốc tế của nghiên cứu.

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

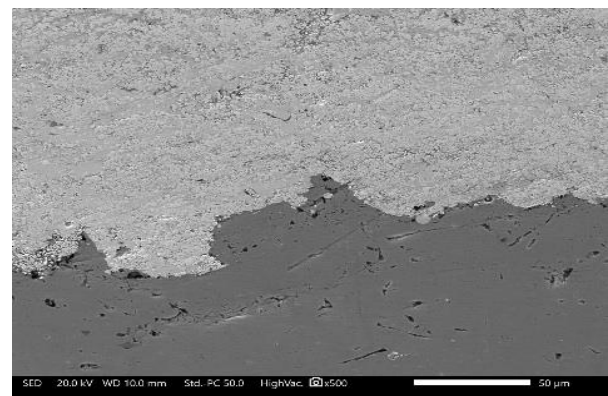
3.1. Phân tích cấu trúc mặt cắt ngang của lớp phủ



Mẫu 1



Mẫu 8



Mẫu 9

Hình 5. Ảnh SEM cấu trúc mặt cắt ngang của lớp phủ

Quan sát ảnh SEM mặt cắt ngang của lớp phủ WC-12Co phun bằng công nghệ HVOF ở các

mẫu đại diện (Mẫu 1, Mẫu 8 và Mẫu 9) như trình bày trong Hình 5 cho thấy cấu trúc vi mô đặc trưng của lớp phủ gồm kim loại gồm các hạt WC phân tán trong nền liên kết kim loại Co. Các hạt WC có độ tương phản sáng hơn và phân bố tương đối đồng đều trong pha nền Co tối hơn, tạo nên cấu trúc dạng phiến mỏng hình thành do quá trình va đập và dàn trải của các hạt phun nóng chảy và bán nóng chảy khi lắng đọng trên bề mặt nền. Sự phân bố của các hạt WC trong nền Co đóng vai trò quan trọng trong việc tạo nên sự kết hợp giữa độ cứng cao của pha cacbit và độ dẻo dai của pha kim loại liên kết.

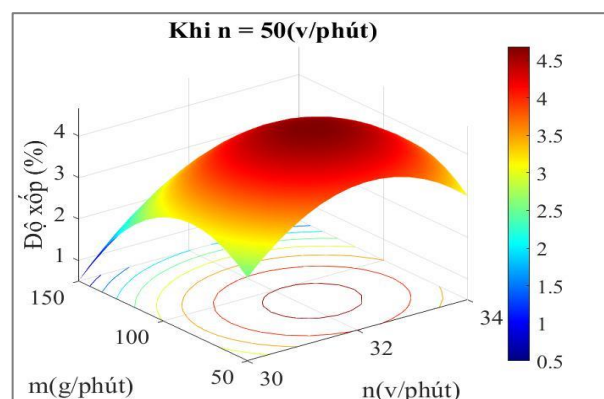
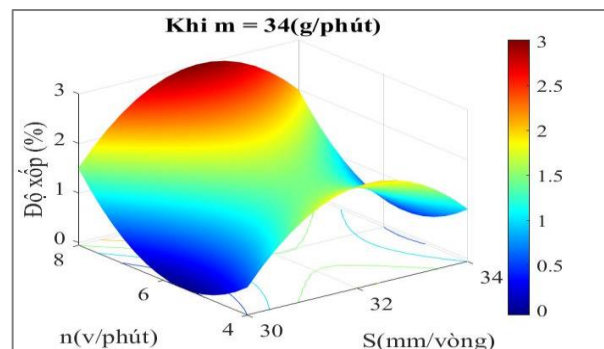
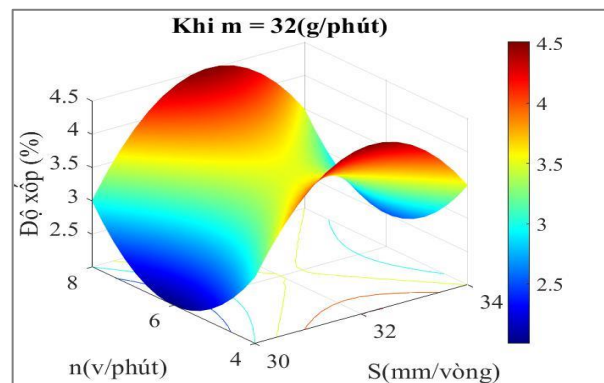
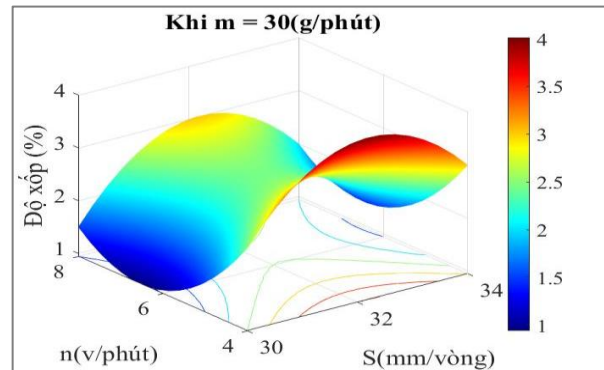
So sánh giữa các mẫu cho thấy mẫu 1 và mẫu 8 xuất hiện một số vùng không đồng nhất, trong đó có các lỗ rỗng nhỏ và khe nứt tế vi dọc theo ranh giới giữa các phiến mỏng. Các khuyết tật này có thể liên quan đến sự nóng chảy chưa hoàn toàn của một số hạt bột hoặc sự tích tụ ứng suất dư trong quá trình nguội nhanh sau khi phun. Ngược lại, mẫu 9 thể hiện cấu trúc tương đối đặc sít hơn, với mật độ khuyết tật thấp và sự phân bố hạt WC đồng đều hơn trong nền Co.

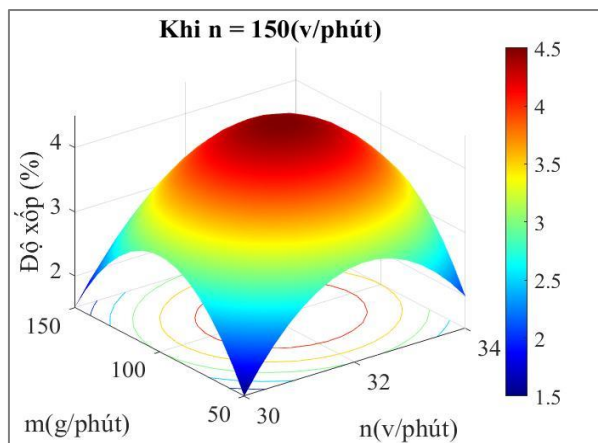
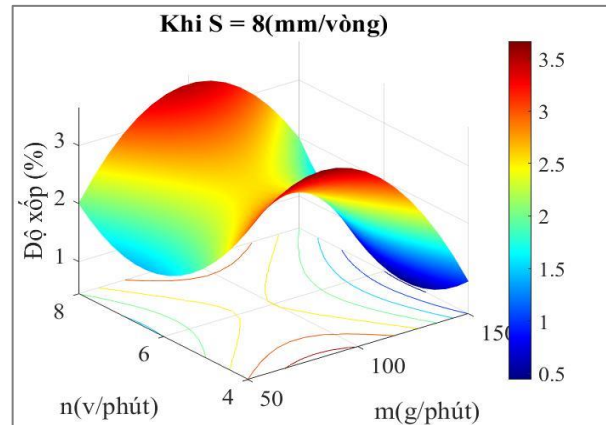
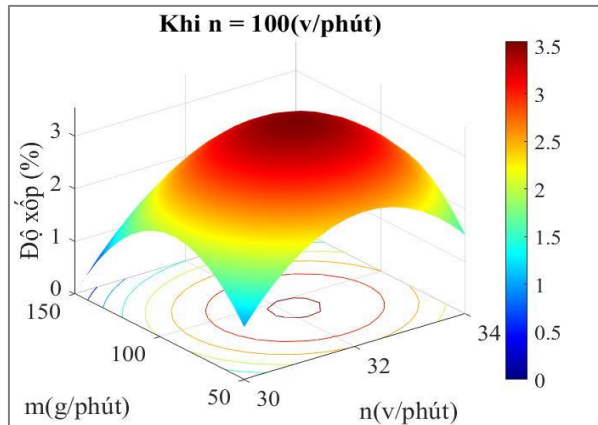
Tại vùng ranh giới giữa lớp phủ và nền thép 40Cr, quan sát thấy bề mặt liên kết khá liên tục, không có hiện tượng tách lớp. Điều này cho thấy lớp phủ có độ bám dính tốt với nền, chủ yếu nhờ cơ chế liên kết cơ học hình thành từ sự biến dạng mạnh của các hạt nóng chảy khi va chạm với bề mặt nền đã được tạo nhám từ trước. Nhìn chung, lớp phủ WC-12Co khi phun bằng công nghệ HVOF được đặc trưng bởi cấu trúc vi mô tương đối đặc sít, tuy vẫn tồn tại một số khe nứt tế vi và lỗ rỗng nhỏ do đặc điểm của quá trình phun phủ nhiệt.

3.2. Ảnh hưởng của các thông số phun đến độ xốp lớp phủ

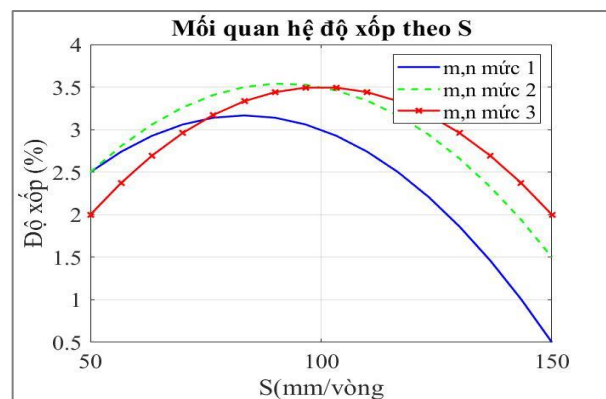
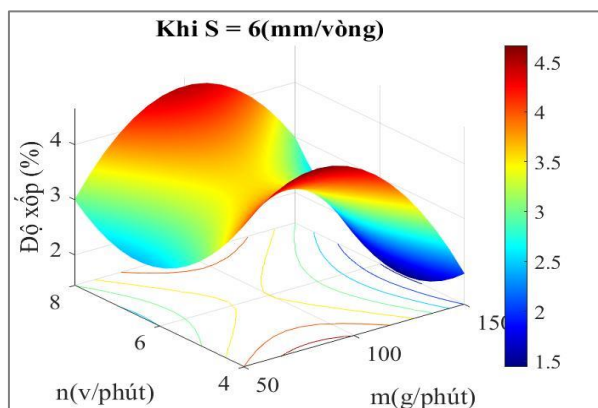
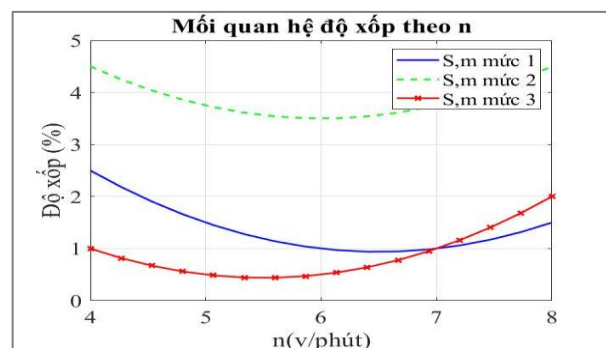
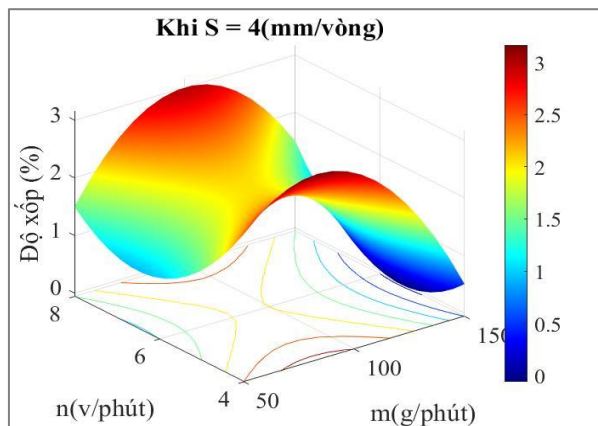
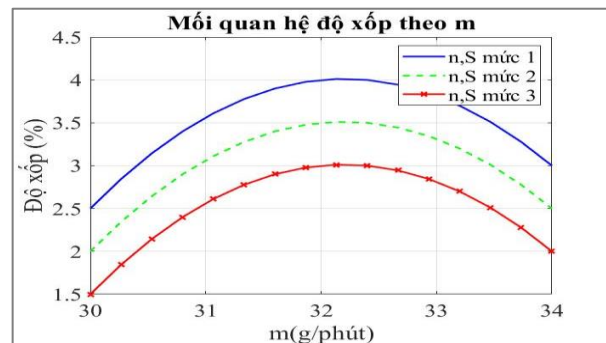
Từ các kết quả nghiên cứu trong Bảng 4 đã tiến hành xây dựng được các đồ thị biểu diễn

mối quan hệ giữa độ xốp của lớp phủ với các thông số công nghệ như: lưu lượng cấp bột phun (m), tốc độ quay chi tiết (n) và bước dịch chuyển đầu phun (S).





Hình 6. Đồ thị 3D biểu diễn mối quan hệ giữa các thông số phun với độ xấp lớp phủ



Hình 7. Đồ thị 2D biểu diễn mối quan hệ giữa các thông số phun với độ xấp lớp phủ

Các đồ thị 3D và 2D trong Hình 5 và Hình 6 cho thấy độ xốp của lớp phủ WC-12Co phun bằng công nghệ HVOF phụ thuộc vào sự kết hợp của các thông số công nghệ như lưu lượng cấp bột phun (m), tốc độ quay chi tiết (n) và bước dịch chuyển đầu phun (S). Sự biến thiên này phản ánh trực tiếp trạng thái nung nóng hạt, mật độ hạt trong dòng phun và mức độ chồng lấp giữa các vệt phủ trong quá trình hình thành lớp phủ.

Khi lưu lượng cấp bột m lần lượt là 30, 32 và 34 g/phút, các đồ thị cho thấy độ xốp của lớp phủ biến thiên theo xu hướng dạng parabol, trong đó giá trị độ xốp đạt cực đại khi $m = 32$ g/phút và giảm khi lưu lượng cấp bột tăng. Có thể giải thích hiện tượng này như sau, khi lưu lượng cấp bột ở mức thấp, số lượng hạt tham gia vào dòng phun ít, dẫn đến mật độ lắng đọng thấp và khả năng lấp đầy các khoảng trống giữa các phiến mỏng hạn chế. Ngược lại, khi lưu lượng bột quá cao, xác suất có nhiều hơn các hạt bột không đạt trạng thái nóng chảy hoặc bán nóng chảy phù hợp trước khi va chạm lên bề mặt nền, dẫn đến sự hình thành các khuyết tật dạng lỗ rỗng trong lớp phủ. Điều này cho thấy sự tồn tại của thông số tối ưu cho lưu lượng bột nhằm đảm bảo sự nóng chảy và biến dạng dẻo hiệu quả của các hạt WC-12Co.

Khi tốc độ quay chi tiết lần lượt là $n = 50, 100$ và 150 v/phút, các đường cong trên đồ thị cho thấy độ xốp có xu hướng giảm dần khi n tăng từ 50 đến 100 v/phút và sau đó tăng trở lại khi n tiếp tục tăng đến 150 vòng/phút. Có thể giải thích hiện tượng này như sau, khi tốc độ quay thấp, mật độ vật liệu lắng đọng tại một vị trí tương đối lớn, có thể dẫn đến sự tích tụ cục bộ và phân bố nhiệt không đồng đều. Khi n tăng đến giá trị trung bình, quá trình phân bố vật liệu trên bề mặt trở nên đồng đều hơn, giúp các phiến mỏng chồng lấp tốt và làm giảm độ

xốp. Tuy nhiên, nếu tốc độ quay quá cao, thời gian tương tác giữa dòng hạt với bề mặt nền giảm, làm giảm khả năng dàn trải của các hạt nóng chảy và dẫn đến sự gia tăng lỗ rỗng trong cấu trúc lớp phủ.

Sự ảnh hưởng của bước dịch chuyển đầu phun S đến độ xốp có thể được giải thích thông qua cơ chế chồng lấp các phiến mỏng. Khi S nhỏ, các vệt phun chồng lấp nhiều, giúp giảm khoảng trống giữa các lớp. Khi S tăng, mức độ chồng lấp giảm, dẫn đến tăng độ xốp. Tuy nhiên, ở giá trị S lớn hơn, sự phân bố nhiệt và vật liệu có xu hướng ổn định hơn, làm tăng khả năng dàn trải của các hạt nóng chảy, từ đó cải thiện độ đặc sít của lớp phủ.

Cơ chế hình thành lỗ xốp trong lớp phủ HVOF chủ yếu liên quan đến trạng thái nhiệt và động học của hạt phun. Khi vận tốc hạt thấp hoặc nhiệt độ không đủ, hạt không đạt trạng thái bán nóng chảy tối ưu, dẫn đến khả năng dàn trải kém và hình thành lỗ rỗng. Ngược lại, khi nhiệt độ và vận tốc phù hợp, các hạt va đập mạnh và biến dạng dẻo tốt, tạo nên cấu trúc đặc sít. Ngoài ra, khoảng cách phun và tốc độ làm nguội cũng ảnh hưởng đến sự hình thành ứng suất dư và vi nứt trong lớp phủ.

Từ toàn bộ các bề mặt đáp ứng, bộ thông số cho độ xốp thấp nhất nằm gần biên tối ưu của miền khảo sát, tương ứng với $m = 30$ g/phút, $n = 150$ vòng/phút và $S = 8$ mm/vòng. Đây là tổ hợp cho phép duy trì mật độ cấp bột vừa phải, tốc độ quay đủ để phân bố đều vật liệu, đồng thời bảo đảm mức chồng lấp cao giữa các vệt phun, từ đó hạn chế sự hình thành lỗ rỗng và nâng cao độ đặc sít của lớp phủ.

Kết quả trong Bảng 4 cho thấy mẫu số 3 có giá trị độ xốp thấp nhất đạt 1,35 %, trong khi mẫu số 8 có độ xốp cao nhất đạt 3,30 %. Sự khác biệt này có thể được giải thích dựa trên

trạng thái nóng chảy của các hạt WC-12Co trong quá trình phun. Khi các hạt bột được gia nhiệt đầy đủ và đạt trạng thái bán nóng chảy thích hợp trước khi va chạm với bề mặt nền, chúng sẽ đàn hồi mạnh và tạo thành các phiến mỏng có khả năng chồng lấp tốt, từ đó làm giảm sự hình thành các lỗ rỗng trong lớp phủ. Ngược lại, khi mật độ cấp bột quá lớn hoặc thời gian gia nhiệt không đủ, một phần hạt bột có thể không đạt trạng thái nóng chảy thích hợp, dẫn đến sự hình thành các lỗ rỗng và khuyết tật trong cấu trúc lớp phủ. Với mức độ xốp thấp ($\approx 1,35\%$), lớp phủ WC-12Co có khả năng hạn chế sự khởi đầu và phát triển vết nứt mỏi tiếp xúc, đồng thời giảm khả năng thấm dầu và tác nhân ăn mòn. Điều này góp phần nâng cao độ bền mỏi và tuổi thọ làm việc của vấu cam trong điều kiện ma sát và tải trọng lớn, qua đó khẳng định tiềm năng ứng dụng thực tế của lớp phủ trong phục hồi trục cam ô tô.

Kết quả nghiên cứu cho thấy lớp phủ không chỉ đạt độ xốp thấp mà còn nằm trong khoảng phù hợp đối với các chỉ tiết làm việc trong điều kiện bôi trơn. Điều này cho phép lớp phủ vừa đảm bảo độ bền mài mòn, vừa duy trì khả năng giữ dầu bôi trơn, qua đó nâng cao hiệu quả làm việc và tuổi thọ của trục cam. Đây là cơ sở khoa học quan trọng để khẳng định tính khả thi của ứng dụng phục hồi trục cam bằng công nghệ phun phủ HVOF.

Để đánh giá mức độ ảnh hưởng của từng thông số công nghệ đến độ xốp, phương pháp phân tích phương sai (ANOVA) được áp dụng. Kết quả cho thấy tốc độ quay chi tiết (n) và bước dịch chuyển đầu phun (S) có ảnh hưởng lớn hơn so với lưu lượng cấp bột (m).

Điều này phù hợp với bản chất quá trình hình thành lớp phủ, trong đó mức độ chồng lấp và phân bố nhiệt đóng vai trò quyết định đến độ đặc sít của cấu trúc.

Kết quả nghiên cứu này cũng phù hợp với các công bố trước đây về lớp phủ WC-Co phun bằng công nghệ HVOF, trong đó độ xốp của lớp phủ thường nằm trong khoảng 1 - 3 % khi các thông số phun được lựa chọn phù hợp. Điều này cho thấy các thông số công nghệ được lựa chọn trong nghiên cứu này có khả năng tạo ra lớp phủ có cấu trúc tương đối đặc sít và chất lượng lớp phủ tốt.

4. KẾT LUẬN

Từ các kết quả nghiên cứu có thể rút ra một số kết luận chính như sau. Lớp phủ WC-12Co phun bằng công nghệ HVOF trên nền thép 40Cr có cấu trúc vi mô đặc trưng của vật liệu gồm kim loại, trong đó các hạt WC phân bố trong nền liên kết Co và lớp phủ có liên kết tốt với nền thép. Độ xốp của lớp phủ chịu ảnh hưởng rõ rệt của các thông số công nghệ phun như lưu lượng cấp bột, tốc độ quay chi tiết và bước dịch chuyển đầu phun. Trong phạm vi khảo sát, giá trị độ xốp của lớp phủ dao động trong khoảng 1,35–3,30 %. Bộ thông số công nghệ tối ưu thu được là $m = 30$ g/phút, $n = 150$ vòng/phút và $S = 8$ mm/vòng, tương ứng với độ xốp nhỏ nhất đạt 1,35 %. Kết quả nghiên cứu cho thấy lớp phủ WC-12Co có cấu trúc tương đối đặc chắc và có khả năng ứng dụng trong phục hồi bề mặt trục cam ô tô. Trong các nghiên cứu tiếp theo cần tiếp tục đánh giá độ cứng, độ bám dính và khả năng chống mài mòn của lớp phủ trong điều kiện làm việc thực tế của động cơ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. X. Khoa and O. Lim, A Study to Investigate the Effect of Valve Mechanisms on Exhaust Residual Gas and

- Effective Release Energy of a Motorcycle Engine, *Energies*, vol. 14, no. 17, p. 5564, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14175564.
- [2] Q. Wang, J. Xiang, G. Chen, Y. Cheng, X. Zhao, and S. Zhang, Propylene flow, microstructure and performance of WC-12Co coatings using a gas-fuel HVOF spray process, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 10, pp. 1653–1660, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2013.04.007.
- [3] F.-L. Toma *et al.*, Microstructural Characterization and Oscillating Sliding Wear Investigations of the Aqueous Suspension Sprayed HVOF WC-12Co Coatings, *J Therm Spray Tech*, vol. 32, no. 2, pp. 456–472, Mar. 2023, doi: 10.1007/s11666-023-01529-x.
- [4] S.-S. Bang *et al.*, Effect of the Spray Distance on the Properties of High Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Sprayed WC-12Co Coatings, *J Nanosci Nanotechnol*, vol. 18, no. 3, pp. 1931–1934, Mar. 2018, doi: 10.1166/jnn.2018.14990.
- [5] P. Nguyen, T.-H. Doan, and T. Canh, Multi-objective optimization of WC-12Co coating by high-velocity oxygen fuel spray using multiple regression-based weighted signal-to-noise ratio, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 235, p. 095440542097666, Jan. 2021, doi: 10.1177/0954405420976663.
- [6] M. Staia, A. Mejias, S. Kossman, and E. Puchi-Cabrera, Tribocorrosion Performance of WC-12Co HVOF-Sprayed Coatings Reinforced with Carbon Nanotubes, *Crystals*, vol. 13, p. 457, Mar. 2023, doi: 10.3390/cryst13030457.
- [7] F. Tarasi, M. S. Mahdipoor, A. Dolatabadi, and M. Medraj, HVOF and HVOF Coatings of Agglomerated Tungsten Carbide-Cobalt Powders for Water Droplet Erosion Application, *Journal of Thermal Spray Technology*, Oct. 2016, doi: 10.1007/s11666-016-0465-x.
- [8] Dang Xuan Thao, Chu Anh Tuan, Pham Duc Cuong, A Research on the Optimization of Certain Plasma Spraying Parameters to Enhance the Shear Adhesion Strength of WC-Ni Coatings on FC300 Material Surfaces, *Engineering, Technology and Applied Science Research*, Volume: 15, Issue: 4, Pages: 24429-24435, 2025. <https://doi.org/10.48084/etasr.11101>
- [9] Japanese Standards Association, *JIS H 8664:1997, Test Methods for Thermal Sprayed Coatings*, Tokyo, Japan: JSA, 1997.
- [10] ASTM International, ASTM E2109-01(2021), Standard Test Methods for Determining Area Percentage Porosity in Thermal Sprayed Coatings, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2021.

Thông tin liên hệ:

Phạm Văn Liệu

Điện thoại: 0912768737 - Email: pvlieu@uneti.edu.vn

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Kinh tế - Kỹ thuật Công nghiệp