

Cấu trúc tế vi, đặc tính cơ học và hành vi ma sát mài mòn của lớp phủ plasma NiCrBSi

Ngô Thanh Bình^{1*}, Vũ Văn Huy¹, Đoàn Thanh Vân¹,
Lương Thành Tựu², Nguyễn Ngọc Quý²

¹Chi nhánh Phía Nam – Trung tâm Nhiệt đới Việt-Nga.

²Trường Sĩ quan Kỹ thuật Quân sự – Tổng cục Kỹ thuật.

*Email: binhbauman85@gmail.com.

Nhận bài: 14/6/2022; Hoàn thiện: 26/7/2022; Chấp nhận đăng: 27/7/2022; Xuất bản: 26/8/2022.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.81.2022.112-121>

TÓM TẮT

Các chi tiết chịu mài mòn, làm việc trong điều kiện khắc nghiệt như trục khuỷu động cơ đốt trong, thường phải thay thế sau 1-2 lần mài về kích thước sửa chữa. Việc chế tạo mới trục khuỷu trong điều kiện Việt Nam còn nhiều hạn chế, do đó, phục hồi kích thước và chế tạo lớp phủ có khả năng chống mài mòn cao phù hợp với yêu cầu làm việc của từng loại động cơ là rất có ý nghĩa. Bài báo này giới thiệu kết quả ứng dụng công nghệ phun phủ plasma trong khí quyển với lớp phủ NiCrBSi để phục hồi các cổ trục khuỷu xe thiết giáp chở quân M113. Cấu trúc tế vi và đặc tính cơ học lớp phủ sau phun đã được khảo sát. Sau đó, các mẫu phủ được thực hiện đo ma sát mài mòn dưới các tải trọng khác nhau 10 N, 20 N và 30 N theo mô hình ball-on-flat. Cơ chế mòn chủ yếu là mòn oxy hóa và sự mài mòn. Lớp phủ có chất lượng tốt, trục khuỷu phục hồi bằng công nghệ phun phủ plasma trong khí quyển đảm bảo các yêu cầu kỹ thuật của xe M113.

Từ khóa: Phun phủ plasma; NiCrBSi; Ma sát; Mài mòn; Trục khuỷu.

1. MỞ ĐẦU

Phun phủ plasma là một trong những kỹ thuật phun phủ nhiệt được sử dụng nhiều do tính linh hoạt cao và ứng dụng của nó đối với nhiều loại vật liệu. Khả năng chống mài mòn được tăng cường nhờ lớp phủ phun plasma. Các lớp phủ cứng được sử dụng để bảo vệ chống lại mòn dính (adhesive wear) và mài mòn (abrasive resistance) thường được chế tạo bằng hợp kim nền niken, sắt, coban và molypden, gốm, cacbit vonfram và cacbit crom [1, 2]. Đối với nhiều ứng dụng, hợp kim nền Ni được sử dụng để cải thiện tính năng của các bộ phận có bề mặt bị mài mòn hoặc ăn mòn. Nó cũng có thể được sử dụng để thay thế lớp phủ crom cứng gây nguy hiểm cho sức khỏe con người và môi trường [3]. Nhiều nghiên cứu đã công bố về tính chất ma sát của lớp phủ nền Ni được tạo ra bằng kỹ thuật phun phủ nhiệt và bằng laser [4, 5]. Hợp kim nền Ni với một lượng pha gốm cứng được cho là có lợi hơn so với vật liệu kim loại được lắng đọng không có pha gốm. Cacbit vonfram (WC) và cacbit crom (Cr_3C_2) là các pha gia cường được khuyến nghị sử dụng phổ biến nhất [6, 7]. Khả năng chống mài mòn được tăng cường nhờ hợp kim nền Ni và hợp kim gia cường nền Ni được sản xuất bằng quá trình phun phủ nhiệt.

Các hợp kim niken thường được sử dụng làm vật liệu phủ bảo vệ cho các ứng dụng công nghiệp nhờ khả năng chống ăn mòn, mài mòn, oxy hóa ở nhiệt độ cao, vượt trội [8]. Trong đó, NiCrBSi là hợp kim tự chảy do sự hiện diện của B và Si, giúp tăng cường tính chất tự chảy của hợp kim, thuận lợi cho việc lắng đọng lớp phủ và tạo thành pha cứng với Ni, chẳng hạn như Ni_3B [9, 10]. Ngoài ra, crom có thể cải thiện hơn nữa khả năng chống ăn mòn và mài mòn của hợp kim niken thông qua sự bổ sung của các hạt cacbit gia cường (WC, VC) [11]. Hợp kim NiCrBSi với khả năng tạo hình vô định hình tốt cung cấp độ bền cơ học cao hơn, khả năng chống mài mòn và ăn mòn cao, độ đàn hồi tốt, được sử dụng nhiều trong động cơ, piston và nôi hơi [12].

Hành vi ma sát mài mòn của lớp phủ được kiểm soát bởi một số yếu tố: dạng hình học của phần tiếp xúc, bao gồm cả hình dạng vĩ mô và địa hình của bề mặt; các đặc tính vật liệu, đặc tính cơ học, cấu trúc tế vi và cuối cùng là các thông số vận hành như tốc độ, tải trọng pháp tuyến và

hiệt độ môi trường [13]. Tốc độ mòn, trong các điều kiện xác định rõ của thử nghiệm trong phòng thí nghiệm, có thể được biểu thị bằng cường độ mài mòn ma sát (tribological intensity) - thước đo các điều kiện gây ra mài mòn và hệ số mòn mô tả ứng xử của vật liệu [14]. Để định lượng độ mòn của một chi tiết, phải thực hiện các phép thử trong các điều kiện tương tự như các điều kiện của chế độ vận hành, tuy nhiên, thực hiện rất phức tạp. Do đó, các phép thử trong phòng thí nghiệm thường được sử dụng như một công cụ định tính để mô tả hành vi mài mòn của vật liệu được thử nghiệm.

Trong bài báo này, lớp phủ NiCrBSi được chế tạo bằng kỹ thuật phun phủ plasma khí quyển (atmospheric plasma spray - APS), sau đó thí nghiệm ma sát mài mòn được thực hiện theo mô hình ball-on-flat với các tải 10 N, 20 N và 30 N. Hình ảnh vết mòn được khảo sát bằng kỹ thuật SEM/EDS, ảnh địa hình để đánh giá cơ chế mòn. Kết quả nghiên cứu nhằm định hướng ứng dụng lớp phủ NiCrBSi để phục hồi trục khuỷu động cơ xe thiết giáp chở quân M113.

2. VẬT LIỆU VÀ PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

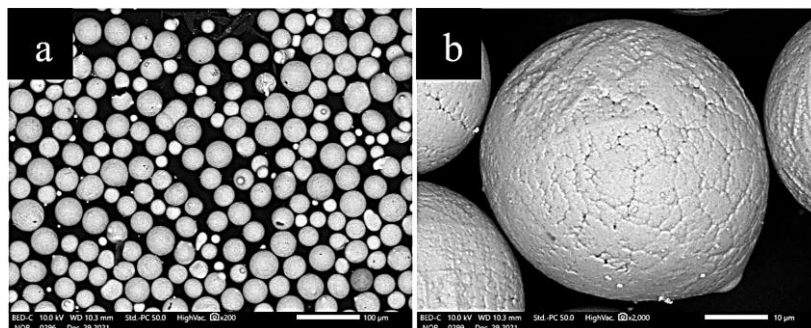
2.1. Vật liệu đế, vật liệu phủ và phương pháp chế tạo

2.1.1. Vật liệu đế

Vật liệu trong nghiên cứu được cắt dây từ trục khuỷu động cơ xe M113. Thành phần (% trọng lượng) gồm 0,43 C, 0,69 Mn, 0,004 max P, 0,02 max S, 0,22 Si, 0,09 Cr, 0,10÷0,12 Mo, 0,05 Ni, 0,02 Cu, 0,002 V và còn lại là Fe. Các mẫu thép tấm 30 mm x 30 mm x 5 mm sau phủ được chuẩn bị để đánh giá kim tương, xác định các đặc tính cơ học và đo mài mòn ma sát.

2.1.2. Vật liệu phủ

Bột NiCrBSi với thành phần (% trọng lượng) 0,3÷0,6 C, 9,5÷12,5 Cr, 1,9÷2,3 B, 3,4÷4,3 Si, 2,1÷3,5 Fe và còn lại là Ni. Kích thước hạt của bột phủ nằm trong khoảng $-45/+15 \mu\text{m}$. Ảnh chụp SEM của bột NiCrBSi cho thấy rằng vật liệu có dạng hình cầu (hình 1).



Hình 1. Ảnh SEM bột NiCrBSi (a) và ảnh phóng đại (b).

2.1.3. Phương pháp chế tạo lớp phủ

Thiết bị phun phủ plasma khí quyển MPS-50M/100M Mass Flow “View” Air Plasma Spray System, sử dụng súng phun 9MBM, MECPL, India được sử dụng để chế tạo lớp phủ. Trước khi chế tạo lớp phủ, các mẫu kim loại được tẩy sạch dầu mỡ bằng axeton và sau đó được hoạt hóa bề mặt bằng hạt oxit nhôm Al_2O_3 , grit 36 đạt độ nhám Ra từ 6,5÷7,0 μm , giúp tăng liên kết cơ học giữa vật liệu nền và vật liệu phun phủ. Các thông số phun phủ plasma được sử dụng lại từ báo cáo [15]. Tốc độ di chuyển của súng được sử dụng là 0,3 m/s. Tốc độ cấp bột là 35 g/phút. Thép nền được làm mát bằng các tia khí nén trong và sau quá trình phun. Độ dày lớp phủ được đo bằng thiết bị DeFelsko PosiTector 6000 FNS3 và hình ảnh SEM mặt cắt ngang.

2.2. Phương pháp nghiên cứu

2.2.1. Chuẩn bị mẫu kim tương

Các mẫu vật được cắt bằng đĩa kim cương trên máy Leco MSX 205 M2, sau đó, tạo mẫu kim

tương bằng máy đúc mẫu nóng XQ-2B $\Phi 30$ mm. Các mẫu được mài bằng giấy nhám SiC có độ hạt khác nhau và đánh bóng bằng dung dịch kim cương (diamond polishing suspension) trên máy Leco Spectrum System® 1000.

2.2.2. SEM/EDS

Hình thái học và thành phần lớp phủ của các mẫu nghiên cứu được phân tích trên thiết bị SEM JEOL JSM-IT200. Ảnh SEM-EDS được chụp với năng lượng 10 và 15 keV.

2.2.3. Phân tích XRD

Máy Bruker D2 Phaser với phần mềm DIFFRAC.EVA được sử dụng để tiến hành phân tích XRD của bột phun và lớp phủ sau phun plasma. Phân tích được thực hiện với bức xạ Cu K α và bộ lọc niken ở 10 mA dưới hiệu điện thế 30 kV, góc 2 θ quét từ 5° đến 80°. Mỗi 0,02° lấy tín hiệu 1 lần, mỗi lần 0,15 s.

2.2.4. Độ nhám bề mặt

Các giá trị độ nhám bề mặt Ra của các mẫu sau hoạt hóa bề mặt và sau phủ được đo bằng máy đo độ nhám bề mặt Mitutoyo SurfTest SJ-410 (chiều dài lấy mẫu 12,5 mm, chiều dài cut-off 2,5 mm). Sau khi lắng đọng lớp phủ phun nhiệt, giá trị Ra là giá trị trung bình của năm vị trí khác nhau trên mẫu. Ngoài ra, giá trị độ nhám bề mặt Sa cũng được đo trên thiết bị ZeGage™ Pro HR 3D optical profiler, Zygo Corporation, USA.

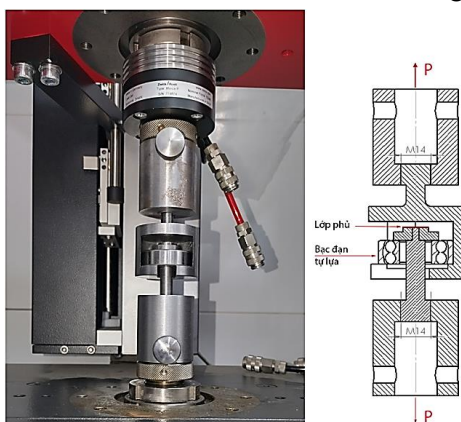
2.2.5. Độ cứng tế vi

Máy đo độ cứng tế vi Hardness Vickers Tester HV-1000ZDT được sử dụng để đánh giá độ cứng tế vi của các mẫu được phủ. Lực đo 300 gf, thời gian giữ tải 10 s. Giá trị độ cứng lớp phủ là giá trị trung bình của 5 lần đo.

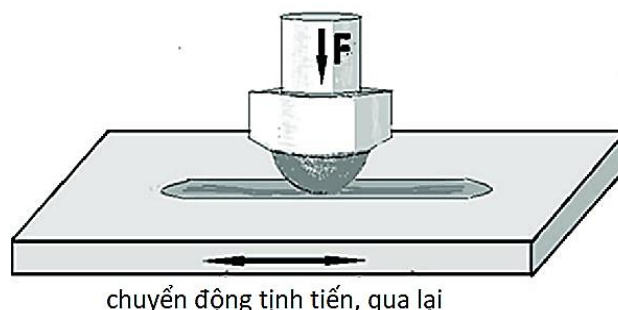
2.2.6. Độ xốp và độ bền bám dính

Độ xốp của lớp phủ là giá trị trung bình độ xốp của 5 vị trí mặt cắt ngang lớp phủ, được chụp bằng thiết bị Leica DMi8 M, sử dụng phần mềm phân tích hình ảnh SIAMS 700, SIAMS Ltd.

Độ bền bám dính được xác định theo phương pháp chốt sử dụng máy kéo nén vạn năng Zwick/Roell Z010 AllroundLine, 10 kN (hình 2). Độ bền bám dính của lớp phủ là giá trị trung bình của 9 mẫu đo. Cơ cấu kiểm tra độ bám dính lớp phủ bằng phương pháp chốt lắp đặt trên máy kéo nén vạn năng, thiết kế và chỉnh sửa từ ý tưởng của tài liệu [2]. Các chốt có đường kính 3mm được chế tạo từ vật liệu trục khuỷu để đánh giá độ bền bám dính. Chốt được lắp ghép vào đĩa, sau đó tiến hành làm sạch bề mặt, hoạt hóa bề mặt và phun phủ theo các thông số như đã chế tạo các lớp phủ khác. Sau đó bộ chốt và đĩa được lấy ra, lắp ghép vào cơ cấu hình 2 thông qua một bạc đạn tự lùa để khử độ lệch tâm giúp giảm sai số khi đo.



Hình 2. Cơ cấu kiểm tra độ bám dính và bản vẽ mặt cắt ngang của cơ cấu.



Hình 3. Sơ đồ thử nghiệm mài mòn trượt ball-on-flat.

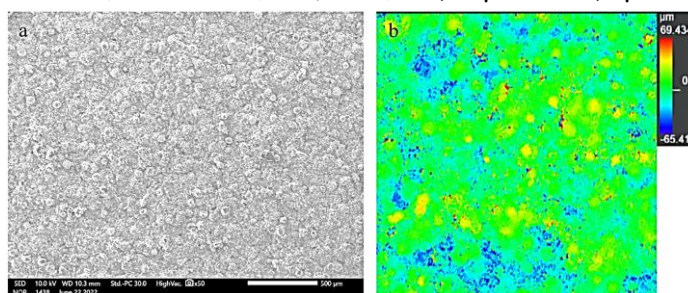
2.2.7. Đo mài mòn ma sát

Các nghiên cứu về mài mòn ma sát được thực hiện trên Micro-Tribometer CETR-UMT-2, Bruker Corporation, USA bằng thí nghiệm trượt ball-on-flat trong điều kiện ma sát khô (hình 3). Các thử nghiệm được thực hiện dựa theo tiêu chuẩn ASTM G133-95: bi 100Cr6 đường kính 4,76 mm, tần số trượt 5,0 Hz, hành trình trượt 10,0 mm, tổng thời gian trượt 1000 s, nhiệt độ phòng, với ba mức giá trị tải lên bi là 10 N, 20 N và 30 N. Sự thay đổi trọng lượng của mẫu trước và sau khi hoàn thành thử nghiệm được đo bằng cân phân tích 4 số lẻ. Tổn thất thể tích (mm^3) của mẫu được tính bằng cách lấy khối lượng mất đi chia cho trọng lượng riêng của lớp phủ. Tốc độ mài mòn (mm^3/Nm) đối với các mẫu phủ được tính toán sau mỗi lần thử nghiệm, bằng tỉ số tổn thất thể tích/(áp lực tác dụng lên bi x tổng quãng đường trượt)

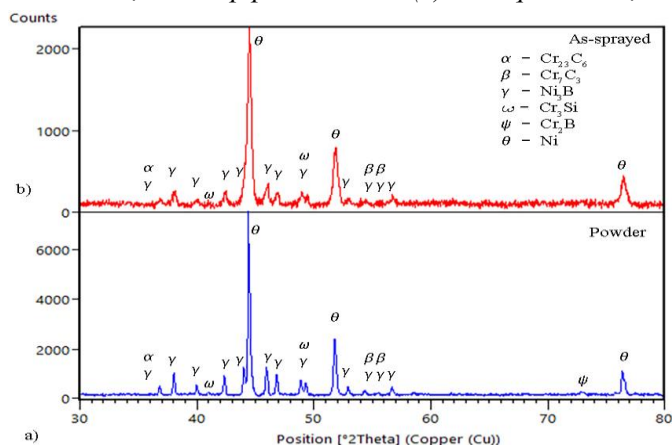
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Cấu trúc của lớp phủ

Hình ảnh thô đại của lớp phủ sau phun plasma khí quyển được thể hiện trong hình 4, lớp phủ có màu trắng bạc. Bề mặt sau phủ quan sát thấy một số lượng lớn hạt dạng cầu tròn trên bề mặt. Các giá trị trung bình của độ nhám bề mặt Ra, Sa đạt 10,07 μm và 13,9 μm .



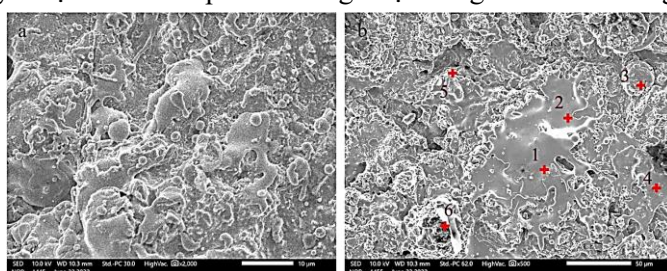
Hình 4. Ảnh macro bề mặt của lớp phủ NiCrBSi (a), ảnh quét 3D độ nhám bề mặt (b).



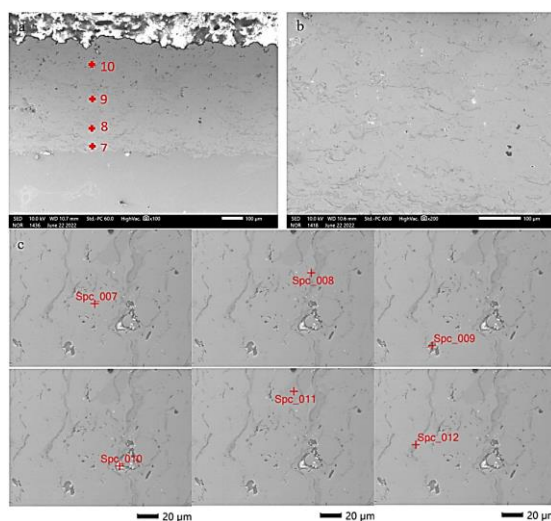
Hình 5. XRD bột NiCrBSi trước (a) và sau phun phủ plasma (b).

Phân tích nhiễu xạ tia X (XRD) của bột cho thấy Ni là pha có cường độ mạnh (hình 5a). Cr_2B và Ni_3B là các pha cường độ trung bình. Biểu đồ nhiễu xạ XRD bề mặt lớp phủ sau phun lên mẫu thép chế tạo trực khuỷu được thể hiện trong hình 5b, thành phần pha trước và sau phun phủ ít có sự thay đổi. Các đỉnh của biểu đồ cho thấy sự hiện diện của Ni là pha chính. Ni_3B được phát hiện là pha có cường độ trung bình. Các đỉnh của Cr_2B , Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , Cr_7Si cũng có thể nhìn thấy trong biểu đồ. Các tác giả [10, 17, 18] cho rằng Ni là pha chính trong lớp phủ, cùng với các pha khác là Ni_2Si , CrB , Cr_2B , NiB và Cr_3C_7 . Hơn nữa, các nhà nghiên cứu này cũng cho rằng các pha borid và cacbit là pha gia cường của lớp phủ.

Lớp phủ NiCrBSi phun plasma khí quyển có hình thái bề mặt giống như vảy nước (hình 6a), dạng thường gặp khi động năng hạt kim loại nóng chảy cao, chất lượng lớp phủ được dự đoán sẽ được cải thiện đáng kể [10]. Trên bề mặt lớp phủ có rất nhiều hạt cầu nhỏ, kích thước micro và sub-micro, là kết quả của các giọt kim loại nóng chảy va đập vào bề mặt, bị biến dạng thành các phiến tấm và xé thành nhiều hạt nhỏ. Một số khoảng trống đã được nhìn thấy ở bề mặt của lớp phủ, những vị trí này có thể hình thành rỗ xốp nếu quá trình lắng đọng tiếp theo không thể lấp đầy chúng. Một số hạt cầu tròn, không nóng chảy hoàn toàn cũng được quan sát thấy trên bề mặt lớp phủ. Phân tích EDS chỉ ra sự hiện diện không đầy đủ của Ni, Cr, Si, B và không đồng đều trong các điểm trên bề mặt của lớp phủ, cùng với sự hiện diện của một lượng đáng kể nguyên tố oxy tại một số điểm (điểm 3, 5, 6 - hình 6b). Điều này cho thấy khả năng hình thành các oxit trong cấu trúc lớp phủ (bảng 1). Hình thái lớp phủ NiCrBSi trong nghiên cứu này tương tự với lớp phủ phủ bằng kỹ thuật HVOF và plasma cũng được công bố bởi các tác giả [16, 17].



Hình 6. Hình thái bề mặt và kết quả phân tích EDS trong điều kiện sau phun phủ.



Hình 7. Cấu trúc tế vi mặt cắt ngang (a), ảnh phóng đại (b) và vị trí phân tích EDS một số pha trong lớp phủ NiCrBSi.

Bảng 1. Thành phần hóa học bề mặt của lớp phủ của các điểm hình 5.

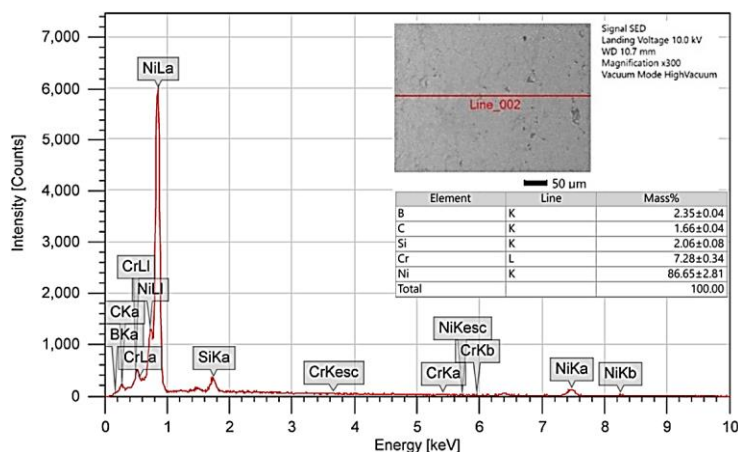
Điểm	Nguyên tố, % khối lượng					
	B	C	O	Si	Cr	Ni
1	-	-	0,70±0,04	1,72±0,09	0,65±0,19	96,93±3,59
2	-	-	0,98±0,05	3,21±0,11	0,85±0,18	94,96±3,39
3	2,71±0,05	7,42±0,09	36,44±0,25	3,70±0,13	49,73±1,10	-
4	-	-	-	2,72±0,11	3,21±0,34	94,07±3,37
5	2,54±0,19	-	11,43±0,56	-	69,11±5,35	16,92±9,01
6	-	-	53,51±0,66	6,00±0,42	23,84±1,91	16,66±4,88

Cấu trúc tế vi mặt cắt ngang và thành phần nguyên tố trên mặt cắt ngang của lớp phủ được thể hiện trong hình 7, hình 8. Hình ảnh tế vi cho thấy lớp phủ có độ xít chặt cao. Giao diện lớp phủ/nền không có khuyết tật, cho thấy có sự liên kết tốt của lớp phủ với vật liệu nền. Mặt cắt ngang cũng cho thấy sự hiện diện của các lỗ xốp trong lớp phủ và một số ít ở bề mặt phân cách lớp phủ/vật liệu nền. Độ dày trung bình của lớp phủ cũng được đo từ hình ảnh SEM mặt cắt ngang. Độ dày trung bình của lớp phủ là đạt $490 \pm 10 \mu\text{m}$.

Phân tích EDS đã xác nhận sự hiện diện của tất cả các nguyên tố cơ bản của bột phủ là Ni, Cr, B và Si (hình 7). Hàm lượng O cũng được tìm thấy trong lớp phủ cho thấy khả năng bị oxy hóa của một số nguyên tố cơ bản của lớp phủ (các điểm Spc_008, Spc_012).

Bảng 2. Thành phần hóa học lớp phủ của các điểm được phân tích trong hình 6.

Điểm	Nguyên tố, % khối lượng				
	B	O	Si	Cr	Ni
7	-	-	$2,52 \pm 0,12$	$1,02 \pm 0,37$	$96,46 \pm 4,09$
8	-	-	$3,20 \pm 0,14$	$0,37 \pm 0,22$	$96,43 \pm 4,25$
9	-	-	$3,76 \pm 0,17$	$5,39 \pm 0,58$	$90,85 \pm 4,76$
10	-	-	$2,54 \pm 0,12$	$0,77 \pm 0,21$	$96,70 \pm 3,98$
Spc_007	$0,99 \pm 0,03$	-	$1,76 \pm 0,10$	$0,30 \pm 0,32$	$96,94 \pm 3,79$
Spc_008	-	$56,76 \pm 0,45$	$0,86 \pm 0,14$	$36,95 \pm 1,54$	$5,43 \pm 2,32$
Spc_009	-	-	$5,16 \pm 0,62$	$3,66 \pm 1,38$	$91,18 \pm 13,41$
Spc_010	-	-	$20,14 \pm 2,67$	$26,04 \pm 7,51$	$53,82 \pm 31,80$
Spc_011	$2,09 \pm 0,05$	-	$2,41 \pm 0,11$	$0,39 \pm 0,32$	$95,10 \pm 3,67$
Spc_012	$1,06 \pm 0,05$	$52,16 \pm 0,44$	-	$38,09 \pm 1,60$	$8,69 \pm 2,73$



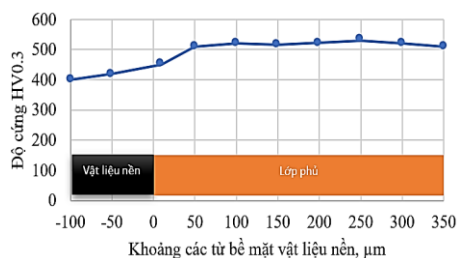
Hình 8. Thành phần hóa học lớp phủ sau phun trên mặt cắt ngang.

3.2. Đặc tính cơ học của lớp phủ

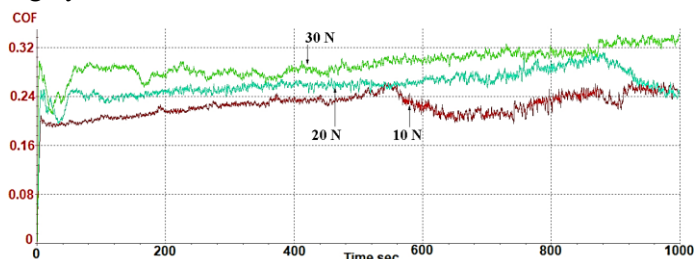
Các giá trị độ cứng tế vi của các lớp phủ khi phun đã được đánh giá. Hình 8 biểu thị giá trị độ cứng vật liệu nền và độ cứng lớp phủ theo hướng vuông góc với bề mặt phân cách vật liệu nền/lớp phủ. Giá trị độ cứng lớp phủ trung bình đạt 518 HV0.3. Giá trị độ xốp tính toán được <math><1,3\%</math>.

Giá trị độ bền bám dính trung bình của lớp phủ đo được theo phương pháp chốt >math>60,4 \text{ MPa}</math>. Sự bong tróc lớp bám dính ở bề mặt phân cách giữa vật liệu nền và lớp phủ là nguyên nhân chính dẫn đến hỏng ở hầu hết các mẫu thử nghiệm. Theo nghiên cứu [19], các hạt nóng chảy không hoàn toàn, va chạm vào bề mặt vật liệu nền với vận tốc cao hơn, bị biến dạng dẻo và hình dạng vết dát không phẳng hoàn toàn. Nó tạo ra một áp lực lớn tác động lên bề mặt nền và lớp phủ

chứa các ứng suất nén dư. Do đó, lớp phủ với các hạt không nóng chảy hoàn toàn sở hữu độ bền kết dính tốt. Mặt khác, các hạt bột hoàn toàn tan chảy khi bay, vận tốc va chạm thấp hơn, chúng bị san phẳng khi va chạm, dẫn đến áp suất tiếp xúc thấp hơn, khi đó, độ bám dính kém hơn. Độ bám dính của lớp phủ trong nghiên cứu này cải thiện hơn so với độ bám dính phun bằng plasma và gần bằng kỹ thuật HVOF trong nghiên cứu [17] (độ bám dính lớp phủ sử dụng bằng kỹ thuật plasma và HVOF lần lượt là 45 và 65 MPa). Điều này được lý giải do tốc độ của bột kim loại trước khi va đập vào đế cao hơn, làm cho cấu trúc bề mặt lớp phủ quan sát được có hình vảy nước, khá giống với lớp phủ đạt được bằng kỹ thuật HVOF.



Hình 9. Độ cứng tế vi của lớp phủ NiCrBSi.

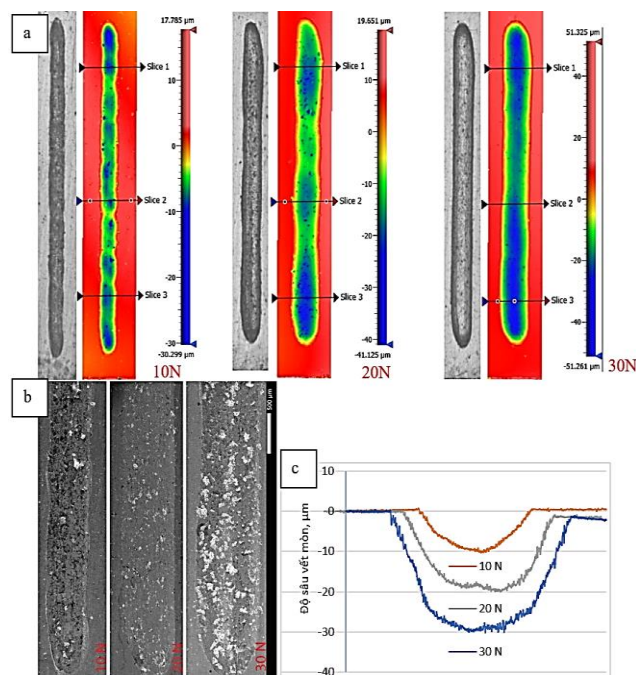


Hình 10. Hệ số ma sát COF của lớp phủ APS NiCrBSi dưới các tải trọng 10 N, 20 N và 30 N.

3.3. Hành vi ma sát mài mòn

Hình 10 thể hiện giá trị trung bình của các hệ số ma sát thu được với tải 10 N, 20 N và 30 N. Sự hao hụt trọng lượng của các mẫu và tốc độ mòn của các mẫu thử được thể hiện trong bảng 3.

Hệ số ma sát đo được thay đổi từ 0,18 đến 0,33. Các mẫu thử phun APS đều cho thấy giá trị hệ số ma sát khá thấp. Quan sát biểu đồ hình 10 ta thấy, hệ số ma sát tăng khi tải thử nghiệm tăng. Sau 900 s hệ số ma sát tải 20 N có xu hướng giảm, và ở cuối chu kỳ thử nghiệm hệ số ma sát với tải 10 N và 20 N tương đương nhau. Với tải 30 N hệ số ma sát vẫn có xu hướng tăng ở cuối chu kỳ thử nghiệm. Đối với tải 10 N sau 550 s thấy hệ số ma sát giảm và sau đó trở về trạng thái ổn định sau 900 s thử nghiệm.

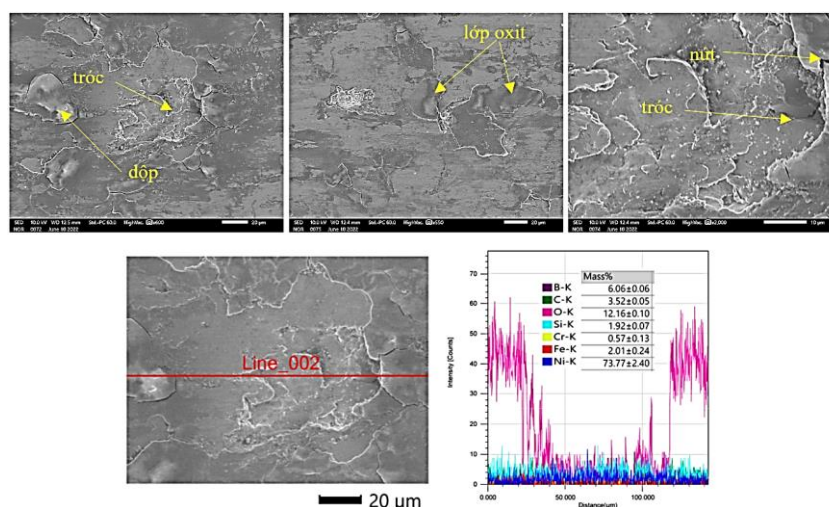


Hình 11. Ảnh quét optical profiler (a), SEM (b) và độ sâu trung bình vết mòn (c).

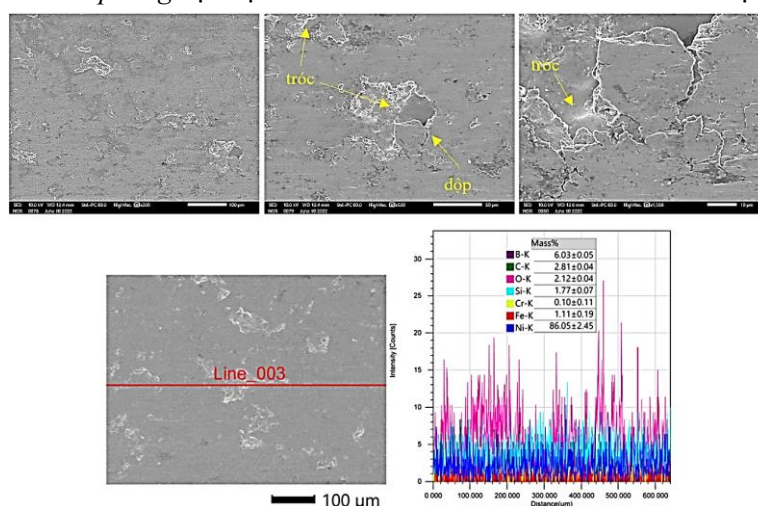
Bảng 3. Khối lượng hao hụt và tốc độ mòn.

STT	Tải, N	Khối lượng hao hụt, mg	Tốc độ mòn, mm ³ /Nm x 10 ⁻⁶
1	10	22,4	3,20
2	20	61,8	4,41
3	30	97,9	4,66

Hình ảnh vết mòn sau thử nghiệm được chụp bởi thiết bị quét bề mặt quang học ZeGage™ Pro HR 3D (hình 11a) và kính hiển vi điện tử quét SEM (hình 11b). Khi tăng tải thử nghiệm, số lượng các điểm bị bong tróc ngày càng tăng (điểm bị bong tróc có dạng vết đốm trắng bên dưới vết mòn khi chụp SEM, hình 11b). Bề rộng và chiều sâu vết mòn trở nên ổn định hơn khi tăng tải thử nghiệm từ 10 N đến 30 N (hình 11a). Độ sâu trung bình của 3 mặt cắt mỗi vết mòn được tính toán và vẽ lại ở hình 11c.



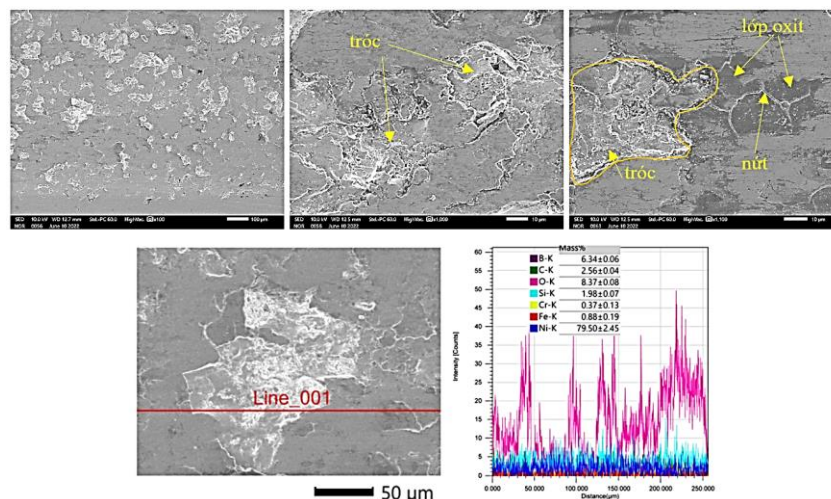
Hình 12. Hình ảnh phóng đại một số điểm và EDS line scan vết mòn tải trọng 10 N.



Hình 13. Hình ảnh phóng đại một số điểm và EDS line scan vết mòn tải trọng 20 N.

Một số điểm phóng đại và EDS quét theo đường (line scan) của các vết mòn được thể hiện trên hình 12-14. Quan sát ảnh phóng đại ta thấy, các hồng học của vật liệu chủ yếu là bong tróc, rộp, xước, biến dạng dẻo tại vết tróc. Ảnh quét EDS ngang qua các vị trí bị bong tróc thấy sự giảm rõ rệt nồng độ oxy tại vị trí bong tróc, còn trên bề mặt là các lớp oxit với hàm lượng oxy

cao. Sự hình thành các lớp oxit có thể là kết quả của quá trình trượt mãnh liệt giữa bi và lớp phủ dưới áp lực cao, dẫn đến nhiệt độ lớp phủ dưới vết trượt tăng cao và vật liệu bề mặt lớp phủ tương tác với oxy trong không khí tạo thành các oxit. Sự hình thành các lớp oxit chủ yếu ở vết mòn với tải 10 N và 30 N (các mảng sẫm màu hình 12, 14). Đối với thử nghiệm ở 20 N không nhìn thấy lớp oxit rõ nét trên bề mặt lớp phủ, dữ liệu EDS cho thấy hàm lượng oxy thấp hơn so với trường hợp tải 10 N và 30 N.



Hình 14. Hình ảnh phóng đại một số điểm và EDS line scan vết mòn tải trọng 30 N.

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã khảo sát cấu trúc tế vi, đặc tính cơ học và hành vi ma sát mài mòn của lớp phủ plasma NiCrBSi. Một số kết quả có thể được rút ra:

- Bằng kỹ thuật phun phủ plasma đã chế tạo lớp phủ có chất lượng tốt: độ xốp dưới 1,3%, độ cứng đạt 518HV_{0,3}, độ bền bám dính hơn 60,4 MPa.

- Thử nghiệm ball-on-flat đã xác định được hệ số ma sát, cơ chế mài mòn và tốc độ mòn của lớp phủ dưới các tải khác nhau. Hệ số ma sát của lớp phủ đạt $0,18 \pm 0,33$. Cơ chế mòn chủ yếu là sự oxy hóa tạo thành các lớp oxit và sự mài mòn lớp phủ. Mức độ bong tróc lớp phủ và tốc độ mòn tăng khi tăng tải thử nghiệm.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trung tâm Nhiệt đới Việt-Nga/BQP trong đề tài mã số 3754/QĐ-TTNDVN.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. M. I. Boulos, P. L. Fauchais, and J. V. R. Heberlein, "Thermal Spray Fundamentals: From Powder to Part", Springer Cham, 2nd ed., 1136 p, (2021).
- [2]. Балдаев Л.Х., Борисов В.Н., and Вахалин В.А., "Газотермическое напыление", Market DS, 344 p, (2007).
- [3]. K. Meekhanthong and S. Wirojanupatump, "Characterization and comparison of thermally sprayed hard coatings as alternative to hard chrome plating", Advanced Materials Research, vol. 974, pp. 183–187, (2014).
- [4]. H. Yu et al., "Bonding and sliding wear behaviors of the plasma sprayed NiCrBSi coatings", Tribol. Int., vol. 66, pp. 105–113, (2013).
- [5]. J. M. Miguel, J. M. Guilemany, and S. Vizcaino, "Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes", Tribol. Int., vol. 36, no. 3, pp. 181–187, (2003).
- [6]. Shabana, M. M. M. Sarcar, K. N. S. Suman, and S. Kamaluddin, "Tribological and Corrosion behavior of HVOF Sprayed WC-Co, NiCrBSi and Cr3C2-NiCr Coatings and analysis using Design of Experiments", Mater. Today Proc., vol. 2, no. 4–5, pp. 2654–2665, (2015).

- [7]. R. Rachidi, B. El Kihel, F. Delaunois, V. Vitry, and D. Deschuyteneer, "Wear performance of thermally sprayed NiCrBSi and NiCrBSi-WC coatings under two different wear modes", *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 8, pp. 4550–4559, (2017).
- [8]. A. Günen and A. Çürük, "Properties and High-Temperature Wear Behavior of Remelted NiCrBSi Coatings", *JOM* 2019 722, vol. 72, no. 2, pp. 673–683, (2019),
- [9]. F. Otsubo, H. Era, and K. Kishitake, "Structure and phases in nickel-base self-fluxing alloy coating containing high chromium and boron", *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 107-113, (2000).
- [10]. G. Singh, M. Kaur, and R. Upadhyaya, "Wear and Friction Behavior of NiCrBSi Coatings at Elevated Temperatures", *J. Therm. Spray Technol.*, vol. 28, pp. 1081–1102, (2019).
- [11]. I. C. Grigorescu, C. Di Rauso, R. Drira-Halouani, B. Lavelle, R. Di Giampaolo, and J. Lira, "Phase characterization in Ni alloy-hard carbide composites for fused coatings", *Surf. Coatings Technol.*, vol. 76–77, part 2, pp. 494-498, (1995).
- [12]. S. Huang et al., "Microstructural Characteristics of Plasma Sprayed NiCrBSi Coatings and Their Wear and Corrosion Behaviors", *Coatings*, vol. 11, no. 2, 170, (2021).
- [13]. K. Holmberg, A. Matthews, and H. Ronkainen, "Coatings tribology - Contact mechanisms and surface design", *Tribology International*, vol. 31, no. 1–3, pp. 107-120, (1998).
- [14]. I. M. Hutchings, "Abrasive and erosive wear tests for thin coatings: A unified approach", *Tribology International*, vol. 31, no. 1–3, pp. 5-15, (1998).
- [15]. Ngô Thanh Bình, Vũ Văn Huy, Đoàn Thanh Vân, "Nghiên cứu chế tạo lớp phủ NiCrBSi trên nền thép C45 bằng phun phủ plasma", *Kỷ yếu hội nghị khoa học 30 năm ngày truyền thống Chi nhánh Phía Nam, Trung tâm Nhiệt đới Việt-Nga: Khoa học và công nghệ nhiệt đới: Từ nghiên cứu cơ bản đến ứng dụng*, TP. HCM, pp. 125–132, (2021).
- [16]. N. L. Parthasarathi, M. Duraiselvam, and U. Borah, "Effect of plasma spraying parameter on wear resistance of NiCrBSiFe plasma coatings on austenitic stainless steel at elevated temperatures at various loads", *Mater. Des.*, vol. 36, pp. 141–151, (2012).
- [17]. M. P. Planche, H. Liao, B. Normand, and C. Coddet, "Relationships between NiCrBSi particle characteristics and corresponding coating properties using different thermal spraying processes", *Surf. Coatings Technol.*, vol. 200, pp. 2465–2473, (2005).
- [18]. S. Natarajan, E. Edward Anand, K. S. Akhilesh, A. Rajagopal, and P. P. Nambiar, "Effect of graphite addition on the microstructure, hardness and abrasive wear behavior of plasma sprayed NiCrBSi coatings", *Mater. Chem. Phys.*, vol. 175, pp. 100–106, (2016).
- [19]. D. Kong and B. Zhao, "Effects of loads on friction–wear properties of HVOF sprayed NiCrBSi alloy coatings by laser remelting", *J. Alloys Compd.*, vol. 705, pp. 700–707, (2017).

ABSTRACT

Microstructure, mechanical properties and abrasive wear behaviour of plasma sprayed NiCrBSi coating

For wear-resistant parts, working in extreme conditions such as the crankshaft of internal combustion engines, it should be replaced after 1-2 times of grinding to the repair size. The manufacturing of the new crankshafts in Vietnam is still limited, so restoration of the size and depositing a coating with high wear resistance that is suitable with the working requirements of each type of engine are meaningful. This paper presented the results of applying atmospheric plasma spraying technology with NiCrBSi coating to renovate the crankshaft journal of the M113 armored personnel carrier. The coating microstructure and mechanical properties as-sprayed were investigated. After that, the tribological performances of the coated specimens were studied on ball-on-flat tribometer under different loads of 10, 20 and 30 N. Wear mechanisms were mainly oxidative wear and abrasive wear. The quality of coating was good, the crankshafts which were restored by atmospheric plasma spraying technology qualified the technical requirements of the M113.

Keywords: Atmospheric plasma spray; NiCrBSi; Friction; Wear; Crankshaft.