

NGHIÊN CỨU ÁP DỤNG CÔNG NGHỆ LASER CLADDING NHẪM TỐI ƯU HÓA QUÁ TRÌNH SỬA CHỮA CHI TIẾT MÁY

RESEARCH ON THE APPLICATION OF LASER CLADDING TECHNOLOGY TO OPTIMIZE THE MACHINE PART REPAIR PROCESS

ThS. Trần Đình Văn, TS. Nguyễn Đình Tân, ThS. Bùi Quang Toàn

Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghệ Đông Á

TÓM TẮT

Trong bài báo này, trình bày về quy trình công nghệ sửa chữa chi tiết trục xi-lanh dầu dựa trên công nghệ laser cladding. Các thông số lớp phủ, bao gồm công suất laser và quỹ đạo phun, đã được tối ưu hóa để cải thiện chất lượng bề mặt và giảm thiểu khiếm khuyết. Kết quả thí nghiệm cho thấy lợi ích từ việc áp dụng lớp phủ laser LYF01, đặc biệt là với mẫu có tỷ lệ chồng chéo 50% và công suất 2500W. Quy trình này không chỉ cải thiện độ cứng và khả năng chống mài mòn của vật liệu nền mà còn đảm bảo hiệu suất tối ưu trong việc sửa chữa và bảo dưỡng.

Từ khóa: *Laser Cladding; Trục xi-lanh dầu; LYF01; Thép CT3; Quy trình công nghệ; Hàn đắp kim loại.*

ABSTRACT

In this paper, we present a technological process for repairing the details of oil cylinder shafts using laser cladding technology. Coating parameters, including laser power and spraying strategy, have been optimized to enhance surface quality and minimize defects. Experimental results show the benefits of applying the LYF01 laser coating, especially with a sample having a 50% overlapping rate and a power of 2500W. This process not only improves the hardness and wear resistance of the base material but also ensures optimal performance in repair and maintenance tasks.

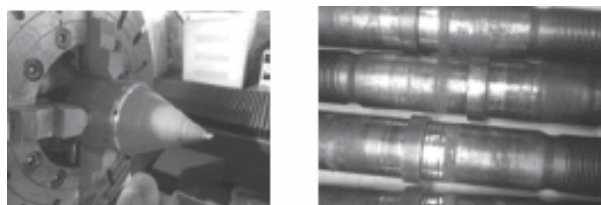
Keywords: *Laser cladding; Oil cylinder shaft; LYF01; CT3 steel; Technological process; Metal deposition welding.*



1. GIỚI THIỆU

Hiện nay, tại Việt Nam, việc áp dụng máy móc và thiết bị công nghiệp vào sản xuất đang trở nên phổ biến, đặc biệt trong những ngành như thủy điện và khai thác khoáng sản. Các thiết bị này thường có kích thước lớn và được thiết kế phức tạp để đáp ứng yêu cầu của môi trường làm việc khắc nghiệt. Ví dụ, kim phun thủy điện (hình 1) là thiết bị sử dụng áp lực nước cao để thực hiện nhiều nhiệm vụ trong công trình thủy điện, dùng để làm sạch bề mặt bê tông, loại bỏ rong rêu và các chất cặn bã khác từ các bộ phận của đập. Hàng năm, sau những mùa mưa bão, các nhà máy thủy điện làm việc quá công suất dẫn đến các chi tiết như vành chặn, kim phun, cánh dẫn hướng bị ăn mòn, xói mòn và xâm thực nặng. Trong ngành khai thác mỏ, xi-lanh thủy lực của máy phá đá thường tiếp xúc trực tiếp với các điều kiện môi trường có độ ẩm cao, bụi và các chất hóa học có thể gây ăn mòn dẫn đến chi tiết bị hư hỏng nặng và thường phải yêu cầu thay thế. Tuy nhiên, giải pháp thay thế không phải lúc nào cũng là lựa chọn tốt, đặc biệt trong bối cảnh hiện nay tại Việt Nam. Các giải pháp công nghệ mới được xem là một hướng tiếp cận tiết kiệm và bền vững hơn, không chỉ giảm thiểu tác động đến môi trường mà còn kéo dài tuổi thọ các chi tiết máy thay vì thay thế mới [1, 2]. Công nghệ sửa chữa dựa trên công nghệ laser cho phép phục hồi các chi tiết máy bị hư hỏng sử dụng phương pháp hàn bằng kim loại dạng bột [3]. Mục tiêu chính là phục hồi hình dạng và kích thước ban đầu của các chi tiết máy. Công nghệ này được áp dụng rộng rãi trong các ngành như hàng không vũ trụ, chế tạo máy và nhiều lĩnh vực khác. Đặc điểm nổi trội của việc sử dụng công nghệ laser trong sửa chữa là tốc độ sửa chữa nhanh mà vẫn đảm bảo yêu cầu kỹ thuật và chất lượng chi tiết máy [4, 5].

Công nghệ laser cladding được thực hiện bằng việc sử dụng dây hoặc nguyên liệu dạng bột. Trong quá trình này, tia laser tạo ra một vùng nóng chảy trên bề mặt của vật liệu, trong lúc dây hoặc bột được cung cấp vào đồng thời. Dù nguồn nhiệt từ tia laser có công suất cao, nhưng thời gian tiếp xúc ngắn, làm cho việc đông đặc và làm mát diễn ra nhanh chóng.



Hình 1. Chi tiết kim phun thủy điện và trục xi-lanh máy phá đá

Trên thế giới, công nghệ Laser cladding đang là một lựa chọn hàng đầu trong việc sửa chữa và tăng cường bề mặt của các chi tiết máy. Đặc biệt trong các ngành công nghiệp trọng điểm như hàng không vũ trụ, công nghệ ô tô, hóa dầu, luyện kim và đường sắt. Khả năng của công nghệ này được chứng minh qua việc giảm chi phí, tối ưu hóa quy trình và nâng cao chất lượng sản phẩm. Bằng cách sử dụng công nghệ laser cladding, các doanh nghiệp ngoài việc có thể cải thiện và tăng cường các thuộc tính của các bộ phận quan trọng, còn có thể kéo dài tuổi thọ của chúng, giảm tần suất và chi phí bảo dưỡng, sửa chữa. Đã có nhiều công trình nghiên cứu khoa học được công bố và đánh giá, kiểm chứng về tính hiệu quả của công nghệ laser cladding.

Sau khi nghiên cứu, Liu và cộng sự [6] đã áp dụng thành công công nghệ phủ laser cladding để khôi phục độ bền của cấu trúc và đồng thời đề xuất việc sử dụng công nghệ này để có thể phục hồi hình dạng của các cấu trúc máy bay bằng hợp kim nhôm và giảm sự ăn mòn. Nhóm nghiên cứu của Vedani [7] đã chỉ

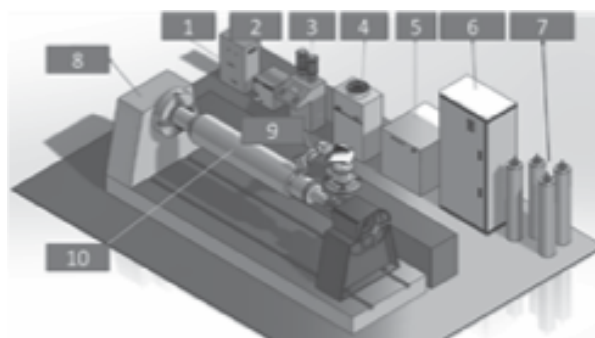
ra rằng cấu trúc của thép dụng cụ sau khi áp dụng công nghệ hàn laser cladding thì vùng kim loại hàn được tạo ra bởi một tia laser Nd-YAG chính xác hơn, có cấu trúc tinh vi hơn so với vật liệu hàn GTAW. Trong công bố [8] nghiên cứu ảnh hưởng về khả năng bồi đắp và năng lượng nhiệt ảnh hưởng đến cấu trúc và độ cứng của các lớp phủ, từ đó gây ra sự thay đổi của tính chất cơ học. Wilson và cộng sự [9] đã sửa chữa thành công các lỗ hỏng trên cánh gió của tua bin dựa trên một thuật toán tái tạo hình học bán tự động bằng công nghệ laser cladding. Shi và Bai [10] sử dụng phương pháp laser cladding để sửa chữa các bánh răng thép C45 bị hỏng, với việc cung cấp bột đồng thời và phương pháp quét trực của bánh răng và phát hiện ra rằng phương pháp phủ laser có thể thu được bề mặt mịn màng mà không có vết nứt.

Trong bài báo này, nhóm tác giả đã đề xuất và xây dựng quy trình công nghệ sửa chữa chi tiết trục xi-lanh dầu. Ở đây, mô hình 3D của chi tiết hỏng được thiết kế lại. Công nghệ laser cladding được sử dụng làm phương pháp sửa chữa và gia công thứ cấp, được tiến hành trên chi tiết để đảm bảo độ chính xác về kích thước hình học. Ngoài ra, để tăng tính năng cơ học, nhóm nghiên cứu sử dụng LYF01 làm vật liệu bột. Các thông số lớp phủ tối ưu bao gồm công suất laser, khoảng cách giữa đầu laser và phôi, khoảng cách giữa ống cấp bột và phôi, tốc độ phun và khả năng phun, tỷ lệ chong chéo được nghiên cứu một cách có hệ thống để giảm thiểu các khiếm khuyết bên trong và cải thiện chất lượng bề mặt. Cuối cùng, các đặc tính cơ học của răng tái tạo được kiểm tra và so sánh với chi tiết ban đầu.

2. THÍ NGHIỆM

Trong nghiên cứu này, hệ thống laser

cladding SFR6063 được sử dụng. Hệ thống này bao gồm nguồn laser có công suất từ 4KW đến 6KW, Robot FANUC M-10iD/M-20iD, các thiết bị đồ gá, bộ làm mát nước và máy phân phối bột, cùng với bình khí bảo vệ Nito và Argon, thể hiện như minh họa trong hình 2. Bàn làm việc, được chế tạo từ gang chất lượng cao, có gân tăng cứng bên trong, đảm bảo khả năng chịu lực. Mâm cặp của hộp trục chính sử dụng mâm cặp bốn chấu với khẩu độ rộng, đáp ứng được nhu cầu kẹp nhiều loại phôi. Tính năng chống bụi được áp dụng trên tất cả các bộ phận di chuyển, bảo vệ thiết bị và tăng tuổi thọ. Laser sợi quang công suất cao kết hợp đầu phủ laser và vòi phun tốc độ cao, cho phép xử lý phôi với hiệu quả và độ chính xác cao. Đường dẫn quang khép kín được sử dụng, giúp bảo vệ và gia tăng tuổi thọ ống kính.

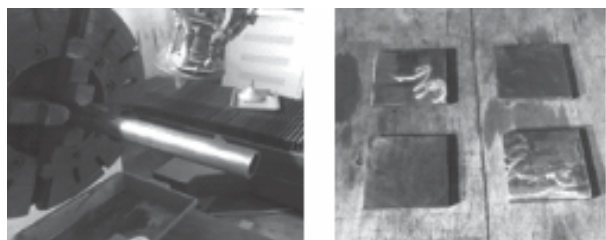


Hình 2. Sơ đồ thiết bị thí nghiệm hệ thống laser cladding SFR6063:

1 – Nguồn, 2 – Tủ điều khiển, 3 – Máy cấp bột, 4 – Máy làm lạnh, 5 – Tủ Raycus, 6 – Tủ điều khiển hệ thống, 7 – Bình khí Argon, 8 – Gá đỡ phôi, 9 – Cánh tay robot; 10 – Chi tiết cần sửa chữa

Trước khi tiến hành sửa chữa các chi tiết thực tế, các thí nghiệm trên bề mặt các mẫu thép CT3 bằng phương pháp laser cladding. Mục đích của nghiên cứu thực nghiệm nhằm nghiên cứu ảnh hưởng của công suất laser, tốc độ quét và tỷ lệ chong chéo đến vi cấu trúc, chất lượng lớp phủ và sự khuếch tán các phân tử bề mặt, từ đó đưa ra công suất laser, tốc độ quét và

tỷ lệ chồng chéo tối ưu giúp tiết kiệm thời gian gia công nhằm đem lại hiệu quả cao hơn. Trong quá trình thí nghiệm, việc lựa chọn phôi và bột kim loại được tiến hành một cách cẩn trọng dựa trên các tiêu chí kỹ thuật và đặc điểm của chi tiết máy. Hai dạng chi tiết là dạng trục và mặt phẳng được chọn để làm thí nghiệm. Đối với chi tiết dạng trục (hình 3) có kích thước $D = 56\text{mm}$, $d = 42\text{mm}$, $L = 450\text{mm}$, chất liệu là thép CT3. Đối với chi tiết dạng phẳng có kích thước $100 \times 100 \times 10\text{mm}$, tổng số lượng là 4, vật liệu sử dụng là thép CT3. Bột LYF01 được lựa chọn dựa trên khuyến cáo từ nhà sản xuất cùng với việc phân tích đặc tính của vật liệu nền.



Hình 3. Phôi dạng trục và dạng tấm phẳng

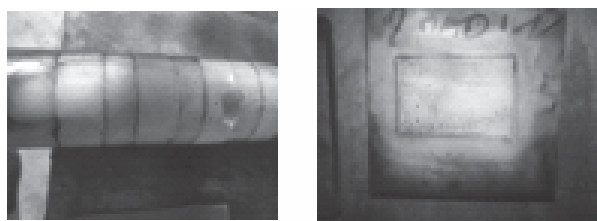
Thép CT3 không có độ cứng quá cao, việc chọn bột có độ cứng cao có thể dẫn đến hiện tượng nứt vỡ. Do đó, dựa trên các khuyến cáo và nghiên cứu từ các bài báo liên quan, bột LYF01 với kích thước hạt $15\text{--}53\text{ }\mu\text{m}$ được lựa chọn để tiến hành thí nghiệm. Trong quá trình phun phủ bột niken lên bề mặt thép, áp dụng tỷ lệ chồng chéo 50%, có nghĩa là mỗi đường phủ mới sẽ che phủ một nửa đường trước đó, loại bỏ khe hở và tạo nên một lớp phủ liền mạch. Kích thước của phần chồng chéo này là 1mm, đảm bảo rằng nếu một đường phủ rộng 2mm thì nửa đường đó sẽ được lấp đầy bởi đường tiếp theo, từ đó cải thiện độ bám dính và tạo ra một lớp phủ đồng nhất.

Bảng 1. Thông số thí nghiệm

Thông số	Giá trị
Công suất đầu ra của máy	2500W
Khí phụ trợ	Argon
Góc giữa cửa xả bột và bề mặt để	45°
Khoảng cách giữa đầu laser và phôi	10 cm
Khoảng cách giữa ống cấp bột và phôi	5 cm
Tốc độ quét	100mm/phút
Tỷ lệ chồng chéo	50% – 1mm

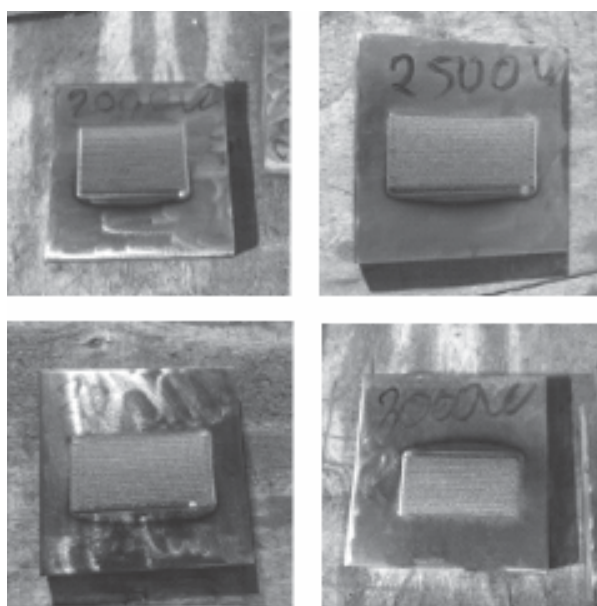
3. KẾT QUẢ

Sau khi tiến hành quá trình phun lớp phủ laser, việc kiểm tra nứt vỡ trên bề mặt của lớp phủ là một bước quan trọng để đảm bảo chất lượng và tính đồng nhất của lớp phủ. Phương pháp thẩm thấu, một kỹ thuật không phá hủy, đã được áp dụng trong việc kiểm tra này. Trong quá trình kiểm tra bằng phương pháp thẩm thấu, chất lỏng (thường là chất nhuộm màu) được sử dụng để thẩm thấu vào các khe nứt hoặc lỗ hổng trên bề mặt lớp phủ (hình 4). Sau một khoảng thời gian cụ thể để thẩm thấu, bề mặt được làm sạch và chất chỉ thị được phun lên. Mọi khe nứt hoặc lỗ hổng sẽ thể hiện rõ ràng dưới dạng các đường màu sắc, do chất nhuộm đã thẩm thấu xuất hiện trên bề mặt dưới tác động của chất chỉ thị.



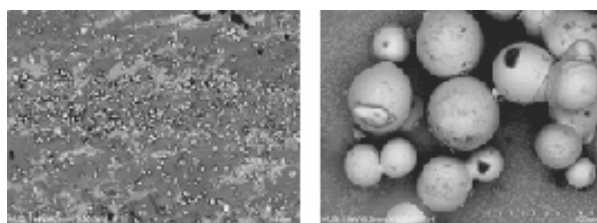
Hình 4. Phôi sau khi phun và đang trong quá trình kiểm tra thẩm thấu

Kết quả từ phương pháp thăm thấu đã cho thấy rằng, lớp phủ tạo ra từ công suất 2000W, 2500W, 3000W, 1500W không chỉ có độ nhẵn và độ mịn cao, mà còn không có dấu hiệu của nứt vỡ hoặc lỗ hổng. Điều này thể hiện lớp phủ có độ bám dính tốt và độ đồng nhất cao. Lớp phủ tại mức công suất 1500W và 2000W có bề mặt đẹp, nhưng vẫn tồn tại vấn đề với bột không hoàn toàn nóng chảy, làm giảm hiệu quả chi phí. Đối với lớp phủ ở mức công suất 2700W và 3000W lại gặp vấn đề với hiện tượng cháy trên bề mặt xung quanh vùng nóng chảy và gây ra biến dạng cho phôi, như cong vênh. Do đó, công suất 2500W có bề mặt phủ nhẵn nhất và tối ưu hóa lượng bột tiêu thụ, giúp tiết kiệm chi phí (hình 5).



Hình 5. Ảnh phôi thép CT3 tại công suất 2000W, 2500W, 2700W, 3000W

Dựa vào kết quả kiểm tra vi cấu trúc SEM (hình 6) ở các công suất khác nhau, rõ ràng mức công suất 2500W cho ra lớp phủ laser với mối liên kết tốt và chất lượng bề nhẵn, không có hiện tượng nứt vỡ và đáp ứng tiêu chuẩn về độ cứng của bột. Tại các độ phóng 1mm và 100μm để cập đến kích thước của vùng mẫu được quan sát. Đối với 1mm thể hiện hình ảnh tổng quan về toàn bộ khu vực và 100μm cung cấp hình ảnh chi tiết về cấu trúc vi mô của bề mặt. Hai cấp độ phóng đại này giúp nhóm nghiên cứu phân tích các đặc điểm khác biệt trong cấu trúc và mô hình của mẫu vật ở các mức độ khác nhau, từ đó thu thập thông tin chi tiết có giá trị. Kết quả thí nghiệm cho thấy độ dày của lớp phủ tăng theo mức độ gia tăng của công suất laser. Với mẫu có công suất 2500W, độ dày tối đa của lớp chuyển tiếp đạt khoảng 50μm và vùng ảnh hưởng nhiệt của môi hàn khá nhỏ.



Hình 6. Ảnh SEM của dạng mặt phẳng ở công suất 2500W tại độ phóng 1mm và 100μm

Đặc biệt, mẫu có tỷ lệ chồng chéo 50% đã thể hiện độ phẳng tốt nhất. Dựa trên các thí nghiệm, chúng ta xác định rằng các thông số tối ưu cho việc laser cladding với thép CT3 và bột LYF01 là công suất 2500W, tốc độ quét 100mm/phút và tỷ lệ chồng chéo là 50%. Với việc áp dụng lớp phủ laser LYF01, vật liệu nền có độ cứng và khả năng chống mài mòn tăng cao, đảm bảo hiệu suất tối ưu cho quá trình sửa chữa và bảo dưỡng.

4. QUY TRÌNH CÔNG NGHỆ

Trục xi-lanh bơm dầu thủy lực (hình 7) là một trong những bộ phận của búa phá đá 🖐️

(hình 7), được thiết kế đặc biệt để thực hiện nhiệm vụ điều khiển hướng dầu di chuyển, chi tiết này đồng thời cũng giữ vai trò quan trọng trong việc kiểm soát dòng dầu, đảm bảo dòng thủy lực được chuyển động một cách linh hoạt và hiệu quả, giúp piston tạo ra năng lượng tác động mạnh mẽ và chính xác. Tuy nhiên, qua

thời gian sử dụng và tác động từ môi trường, trục xi-lanh có thể bị mài mòn, gây ra sự cố trong quá trình hoạt động. Để khắc phục và gia tăng tuổi thọ cho trục xi-lanh, phương pháp sửa chữa bằng laser cladding được áp dụng. Quy trình sửa chữa chi tiết trục xi-lanh bơm dầu thủy lực của búa phá đá được thể hiện ở bảng 2.

Bảng 2. Quy trình sửa chữa chi tiết trục xi-lanh bơm dầu thủy lực của búa phá đá

Nguyên công	Thiết bị, dụng cụ	Bước gia công	Kiểm tra
Chuẩn bị	Chai xịt chống rỉ RP7, Bình gas khô mini	Làm sạch, kiểm tra kích thước	Thước cặp, Panme
Phun phủ Niken	Robot SFR&6063 Đầu phun phủ laser	Phun lớp phủ theo kích thước quy định	Thước cặp, Panme, Đồng hồ so
Tiện	T620 Dao tiện ngoài thân cong 45°, T15K6	Tiện thô $t = 0,5\text{mm}$, Tiện tinh $t = 0,2\text{mm}$	Thước cặp, Panme, Đồng hồ so
Mài	Máy mài 3151 Đá mài tròn ngoài	Mài thô, Mùi tinh	Thước cặp, Panme, Đồng hồ so
Kiểm tra và làm sạch		Kiểm tra kích thước và độ cứng, làm sạch sản phẩm	Panme chính xác cao, Máy đo độ cứng



Hình 7. Ảnh máy phá đá

4.1. Nguyên công phun bột niken

Nguyên công này liên quan đến việc phun bột niken lên các vị trí bị mài mòn trên chi tiết máy. Trong quá trình phun phủ laser sử dụng đồ gá gồm hai mũi chống tâm năm bậc tự do. Nguồn laser hoạt động với công suất đầu ra 2500W. Khí Argon đóng vai trò khí phụ trợ, bảo vệ lớp phủ tránh bị oxy hóa. Cửa xả bột và bề mặt để tạo ra góc khoảng 45°. Đầu laser cách phôi 10cm, trong khi ống cấp bột cách

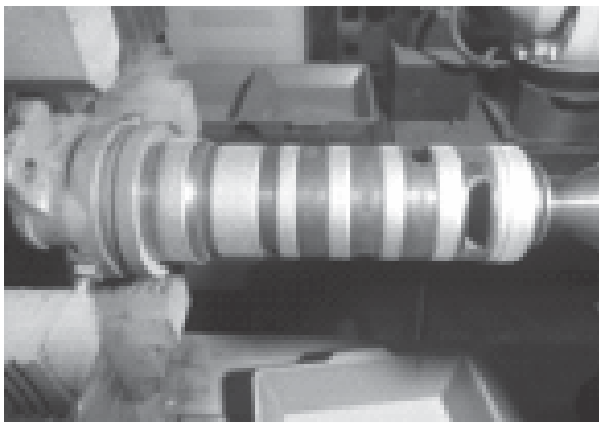
phôi 5cm, tốc độ quét 100mm/ph, độ rộng và độ dày của lớp phun đều là 2mm và tỷ lệ chồng chéo là 50%. Trong suốt quá trình phun, lượng bột niken sử dụng lên tới 0,5kg. Bao gồm 7 bước công nghệ phun lần lượt bề mặt có đường kính từ $D = 152\text{mm}$ đến $D = 182\text{mm}$ và chiều dài từ $L = 17\text{mm}$ đến $L = 37\text{mm}$. Ví dụ, bước 1 tập trung vào việc phun trên phần trục có $D = 152\text{mm}$ và $L = 32\text{mm}$, tạo ra diện tích phun $15481,77\text{mm}^2$. Các bước tiếp theo cũng theo quy định rõ kích thước của từng phần trục và kết quả diện tích sau khi phun (Hình 8).

4.2. Nguyên công tiện

Sau nguyên công phun phủ là nguyên công tiện, nhằm đưa chi tiết về đúng kích thước lắp ghép. Cụ thể, chi tiết sẽ được tiện từ đường kính ban đầu xuống đường kính mong muốn

thông qua các bước tiện thô: Bước 1 đến Bước 6: Chi tiết với đường kính ban đầu 154mm được tiện với chiều dài biến đổi từ 32mm đến 37mm. Mục tiêu của mỗi bước là đưa đường kính chi tiết xuống còn 153,5mm. Quá trình tiện sử dụng chiều sâu cắt là 0,5mm, bước tiến dao 0,35mm/ph và tốc độ cắt 62 m/ph.

Bước 7: Giai đoạn này chú trọng vào việc tiện chi tiết có đường kính ban đầu là 184mm và chiều dài 27mm. Kết thúc bước này, đường kính chi tiết nên là 183,5mm với cùng chế độ cắt như các bước trước.



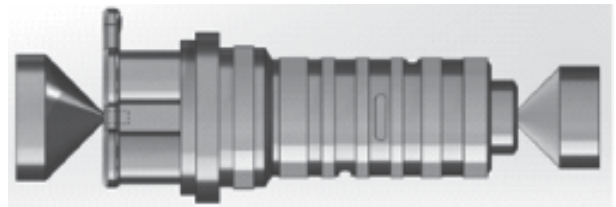
Hình 8. Chi tiết trục xi-lanh sau khi phun phủ

Bảng 3. Thông số gia công tiện

Bước	L (mm)	S (mm/vg)	N (vg/ph)	T (ph)
1	32	0.36	550	0.162
2	27	0.36	550	0.136
3	17	0.36	550	0.086
4	17	0.36	550	0.086
5	17	0.36	550	0.086
6	32	0.36	550	0.187
7	27	0.36	550	0.136

4.3. Nguyên công mài

Chi tiết trải qua hai giai đoạn mài để đạt độ nhám 1,25. Mài thô với máy mài 3151, chạy dao 0,72 mm/ph, 60 vòng quay/ph và công suất 6,3 kW; sau đó là mài tinh giảm chạy dao xuống 0,46 mm/ph, 40 vòng quay/ph và công suất 2,2 kW.



Hình 9. Chi tiết xi-lanh sau khi mài

Sau khi hoàn thành các giai đoạn gia công, chi tiết sẽ được chuyển vào nguyên công kiểm tra để đảm bảo chất lượng và độ chính xác. Hình dạng hình học của chi tiết được kiểm tra để đảm bảo không có sai sót trong quá trình gia công và tuân thủ các tiêu chuẩn thiết kế. Tiếp theo, độ cứng của chi tiết được đo và so sánh với yêu cầu (~25 HRC). Lớp phun được kiểm tra tình trạng nứt; nếu có vết nứt, các biện pháp xử lý như xử lý nhiệt hoặc xử lý bề mặt sẽ được tiến hành. Cuối cùng, chi tiết sẽ được mài sạch ba-va và cạnh sắc để đảm bảo an toàn, sau đó vệ sinh, loại bỏ bụi, dầu mỡ và các tạp chất khác.

5. KẾT LUẬN

Qua nghiên cứu này, nhóm tác giả đã phát triển thành công một quy trình sửa chữa trục xi-lanh dầu sử dụng công nghệ laser cladding, tái thiết kế bằng mô hình 3D và sử dụng vật liệu bột LYF01. Thông qua thí nghiệm, nhóm tác giả xác định được các thông số tối ưu là công suất 2500W, tốc độ quét 100mm/phút và tỷ lệ chồng chéo 50%, cải thiện độ cứng và độ bền chống mài mòn. Quy trình này đã được

kiểm chứng không chỉ qua kết quả thí nghiệm mà còn trong áp dụng thực tế, chứng minh tính hiệu quả và tiềm năng ứng dụng rộng rãi. ❖

Ngày nhận bài: **16/02/2024**

Ngày phản biện: **26/3/2024**

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Sundin E, Bras B. *Making functional sales environmentally and economically beneficial through product remanufacturing*. J Clean Prod 2005;13(9):913–25.
- [2]. Demirel N, Gökçen H. *A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment*. Int J Adv Manuf Technol 2008;39(11–12):1197–206.
- [3]. Gu DD, et al. *Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms*. Int Mater Rev 2013;57(3):133–64.
- [4]. Capello E, Previtali B. *The influence of operator skills, process parameters and materials on clad shape in repair using laser cladding by wire*. J Mater Process Technol 2006;174(1):223–32.
- [5]. Lourenço JM, et al. *Fatigue and fracture behavior of laser clad repair of AerMet® 100 ultra-high strength steel*. Int J Fatigue 2016; 85:18–30.
- [6]. Liu Q, et al. *Laser cladding as a potential repair technology for damaged aircraft components*. Int J Struct Integr 2011;2(3):314–31.
- [7]. Vedani M. *Microstructural evolution of tool steels after Nd-YAG laser repair welding*. J Mater Sci 2004;39(1):241–9.
- [8]. Paydas H, et al. *Laser cladding as repair technology for Ti–6Al–4V alloy: influence of building strategy on microstructure and hardness*. Mater Des 2015;85(C):497–510.
- [9]. Wilson J Michael, et al. *Remanufacturing of turbine blades by laser direct deposition with its energy and environmental impact analysis*. J Clean Prod 2014;80(80):170–8.
- [10]. Shi J, Bai SQ. *Research on gear repairing technology by laser cladding*. Key Eng Mater 2013; 546:40–4.