

# NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA NỒNG ĐỘ OXY TỚI ĐỘ NHÁM BỀ MẶT CHI TIẾT THÉP KHÔNG GỈ 316L ĐÁNH BÓNG BẰNG LASER XUNG SỢI QUANG

STUDY ON THE INFLUENCE OF OXYGEN LEVEL ON THE SURFACE ROUGHNESS OF 316L STAINLESS STEEL  
POLISHED BY NANOSECOND PULSED FIBER LASER

Lê Văn Văn<sup>1</sup>, Trần Văn Châu<sup>2</sup>,  
Nguyễn Thái Tất Hoàn<sup>1</sup>, Vũ Thanh Tùng<sup>1,\*</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huic5804.2025.326>

## TÓM TẮT

Đánh bóng bằng laser là một trong những công nghệ tiên tiến giúp làm giảm độ nhám bề mặt chi tiết mà không cần sự tiếp xúc của dụng cụ gia công và chi tiết đánh bóng. So với các phương pháp đánh bóng thông thường, đánh bóng bằng laser không gây ra mài mòn dụng cụ, không có phoi gia công, có thể gia công được các vật liệu đặc biệt như thủy tinh, gốm. Hơn nữa có thể đánh bóng được các dạng bề mặt phức tạp bằng cách điều khiển chùm tia laser. Quá trình đánh bóng bằng laser có thể được thực hiện một cách hiệu quả khi kiểm soát tốt các thông số công nghệ. Tuy vậy, có quá nhiều những yếu tố ảnh hưởng đến quá trình này và việc kiểm soát được tất cả chúng là vấn đề vô cùng khó khăn. Nhiều nghiên cứu đã tập trung để cố gắng giải quyết vấn đề này. Trong bài báo này, tác giả nghiên cứu sự ảnh hưởng nồng độ khí oxy tới chất lượng bề mặt chi tiết thép không gỉ 316L, được đánh bóng bằng laser xung sợi quang. Kết quả nghiên cứu cho thấy, việc giảm nồng độ oxy trong vùng gia công tỷ lệ thuận với hiệu quả đánh bóng, đồng thời cũng hạn chế khả năng bị oxy hóa lớp kim loại bề mặt của chi tiết. Các kết quả nghiên cứu là cơ sở tham khảo hữu ích cho các nghiên cứu tiếp theo về đánh bóng bằng laser xung sợi quang.

**Từ khóa:** Đánh bóng, laser xung, 316L.

## ABSTRACT

Laser polishing is an advanced technology that reduces surface roughness without direct contact between the polishing tool and the workpiece. Compared to conventional methods, it causes no tool wear, generates no machining debris, and can be applied to processing hard-to-polish materials such as glass and ceramics. Additionally, laser polishing is well-suited for complex surface geometries due to its conformable polishing beam characteristic. The effectiveness of laser polishing depends on precise control of processing parameters. However, identifying key factors and managing them efficiently remains challenging. As a result, numerous studies have been dedicated to addressing this issue. In this study, the authors examine the impact of oxygen level on the surface quality of 316L stainless steel polished using pulsed fiber laser technology. The findings reveal that lowering the oxygen level in the machining zone enhances polishing efficiency while simultaneously reducing surface oxidation. This research offers both fundamental and practical insights into laser polishing processes, serving as a reliable reference for future studies in this field.

**Keywords:** Laser polishing, pulsed laser, 316L.

<sup>1</sup>Trường Cơ khí, Đại học Bách khoa Hà Nội

<sup>2</sup>Trung tâm Công nghệ, Học viện Kỹ thuật Quân sự

\*Email: [tung.vuthanh@hust.edu.vn](mailto:tung.vuthanh@hust.edu.vn)

Ngày nhận bài: 11/4/2025

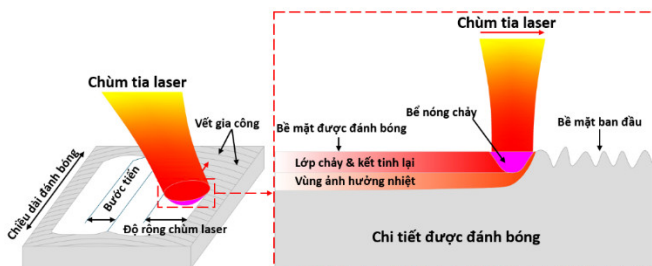
Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 09/7/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/9/2025

### 1. GIỚI THIỆU

Thép không gỉ 316L là một loại hợp kim thuộc dòng austenitic có chứa molybden (Mo) [1], giúp tăng khả năng chống ăn mòn, đặc biệt trong môi trường chứa clo và axit. Đây là phiên bản carbon thấp của thép không gỉ 316, được thiết kế để giảm thiểu nguy cơ ăn mòn kẽ hở và tăng khả năng hàn. Với khả năng chống ăn mòn vượt trội, giữ được độ bền và độ dẻo dai ngay ở nhiệt độ thấp, đặc biệt không nhiễm từ, hợp kim 316L được ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực y tế, hàng hải, công nghiệp hóa chất và đồ trang sức, nhất là đồng hồ cao cấp.

Đánh bóng bằng laser nổi lên là một trong các phương pháp hoàn thiện bề mặt mới đầy hứa hẹn, đó là một quá trình nhiệt động lực học phức tạp, trong đó các chùm tia laser có cường độ cao tác động lên bề mặt kim loại, sau đó làm nóng chảy một lớp mỏng trên bề mặt của chúng. Khi chùm tia laser tương tác với bề mặt kim loại, một vũng nóng chảy được tạo ra trên một lớp mỏng của bề mặt kim loại. Bể nóng chảy này ở trạng thái lỏng sau đó được phân phối lại xung quanh khu vực lân cận dưới tác động đa hướng của sức căng bề mặt [2]. Không có sự loại bỏ vật liệu nào diễn ra trong quá trình nóng chảy lại vì kim loại được làm rắn lại trên cùng một bề mặt. Hình 1 thể hiện nguyên lý đánh bóng bằng laser.



Hình 1. Nguyên lý đánh bóng bằng laser

Về bản chất, đánh bóng bằng laser là một quy trình dựa trên nguyên lý nhiệt động lực học. Khi tia laser làm nóng chảy bề mặt kim loại, sức căng bề mặt sẽ khiến lớp kim loại nóng chảy tự trải phẳng, sau đó tái đông đặc, giúp làm giảm các mấp mô trên bề mặt. Tuy nhiên, trong quá trình tăng nhiệt độ và nóng chảy, kim loại có xu hướng phản ứng với oxy trong không khí, tạo ra lớp ôxít kim loại. Lớp ôxít này có nhiệt độ nóng chảy cao hơn so với kim loại nền, gây cản trở cho quá trình đánh bóng ở các giai đoạn tiếp theo. Do đó, việc sử dụng khí bảo vệ là cần thiết để hạn chế hoặc loại bỏ sự hình thành ôxít, đảm bảo hiệu quả của quá trình đánh bóng bằng laser.

Ảnh hưởng của khí bảo vệ tới chất lượng bề mặt chi tiết đánh bóng bằng laser đã được L. Giorleo và cộng sự nghiên cứu trong quá trình đánh bóng vật liệu Titan [3]. Trong

nghiên cứu này, các tác giả đã sử dụng khí Nitơ bơm trực tiếp vào bề mặt gia công với các mức áp suất 0bar, 5bar và 10bar. Kết quả thí nghiệm cho thấy, việc có khí bảo vệ làm chất lượng bề mặt chi tiết đánh bóng được cải thiện tốt hơn so với điều kiện không có khí bảo vệ. Điều này được giải thích là do khí bảo vệ có vai trò quan trọng trong việc tránh các giọt nóng chảy trên bề mặt đã được đánh bóng, bảo vệ vùng gia công khỏi hiện tượng oxy hóa và tăng hiệu suất của quy trình bằng cách loại bỏ plasma ra khỏi vùng làm việc. Tolgahan Ermergen và cộng sự đã đánh bóng các mẫu Ti-6Al-4V được sản xuất bằng phương pháp bồi đắp (SLM) sử dụng Argon làm khí bảo vệ [4]. Nghiên cứu đã chỉ ra rằng, sự ổn định của dòng khí bảo vệ trong quá trình đánh bóng bằng laser đóng vai trò quan trọng trong việc đạt được bề mặt vật liệu đồng đều. Mặc dù có thể xảy ra các thay đổi về chất lượng bề mặt ngay cả khi dòng khí không ổn định, kết quả của việc thay đổi bề mặt có thể khác nhau tùy thuộc vào vật liệu. Nghiên cứu nhấn mạnh tầm quan trọng của độ nhám bề mặt, vì một số tính chất cơ học, chẳng hạn như độ bền mỏi, bị ảnh hưởng trực tiếp bởi độ nhám. Các nhà nghiên cứu cho rằng độ bền mỏi của các mẫu chịu dòng khí không ổn định có thể bị suy giảm và tạo ra kết quả không mong đợi. Ngược lại, bề mặt đồng đều và giá trị Ra (độ nhám bề mặt) tốt hơn của các mẫu có dòng khí ổn định sẽ mang lại độ bền mỏi vượt trội. Nghiên cứu của Jilin Xu và cộng sự [5] so sánh về khả năng bảo vệ của khí trong quá trình đánh bóng bằng laser qua hai phương pháp: bảo vệ trong buồng kín và phun trực tiếp từ vòi phun. Kết quả cho thấy, độ nhám bề mặt giảm rõ rệt khi tăng lưu lượng khí bảo vệ và mức độ giảm nhám trong cả hai phương pháp dùng khí bảo vệ là tương tự nhau. Tuy nhiên nếu lưu lượng khí bảo vệ quá cao sẽ dẫn đến sự xuất hiện các gợn sóng bề mặt chi tiết được đánh bóng, từ đó làm tăng độ nhám. Nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, với phương pháp sử dụng khí từ vòi phun nhạy cảm hơn với lưu lượng khí so với phương pháp sử dụng buồng kín khi lưu lượng khí lớn.

### 2. THỰC NGHIỆM

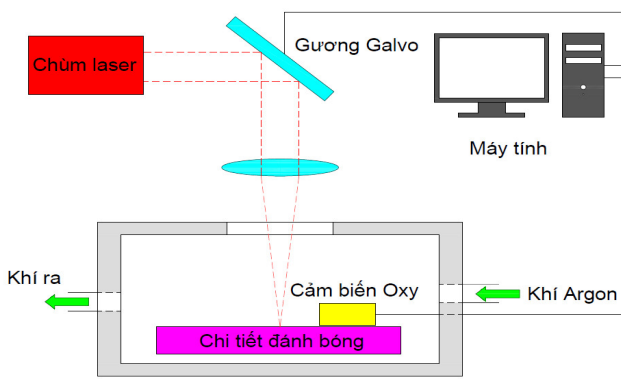
#### 2.1. Mô hình thí nghiệm

Chùm laser đánh bóng (fiber, Yb-doped, MOPA,  $\lambda = 1064\text{nm}$ ) được tạo ra từ nguồn laser có công suất 35W, được điều khiển bởi hệ thống gương galvo, cho phép tốc độ quét tối đa lên đến 2000mm/s. Các thông số của chùm laser được điều chỉnh thông qua phần mềm cài đặt trên máy tính. Vật liệu thí nghiệm là thép không gỉ 316L có thành phần hóa học được thể hiện trong bảng 1. Mẫu thí nghiệm được chế tạo bằng phương pháp phay, có kích thước bề mặt 100x100mm. Sau khi phay xong, bề mặt

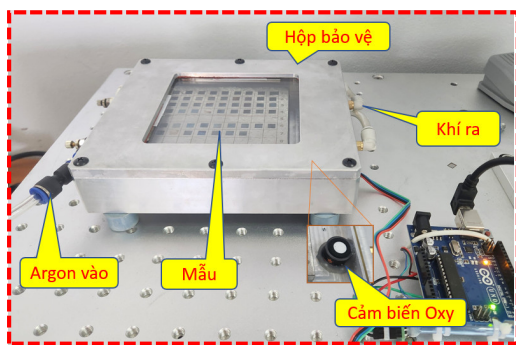
mẫu được làm sạch bằng aceton sau đó tiến hành đo độ nhám ban đầu bằng máy đo ZeGage™ Pro HR 3D (Mỹ). Trong quá trình đánh bóng, mẫu được đặt trong một buồng kín sử dụng khí bảo vệ là Argon có độ tinh khiết 99,99%, được cấp từ một bình khí nén thông qua van tiết lưu để kiểm soát lưu lượng khí bơm vào buồng gia công. Một cảm biến đo nồng độ Oxy được đặt trong buồng và kết nối với máy tính để hiển thị kết quả đo. Sơ đồ bố trí thí nghiệm được thể hiện trên hình 2.

Bảng 1. Thành phần hóa học của thép không gỉ 316L [1]

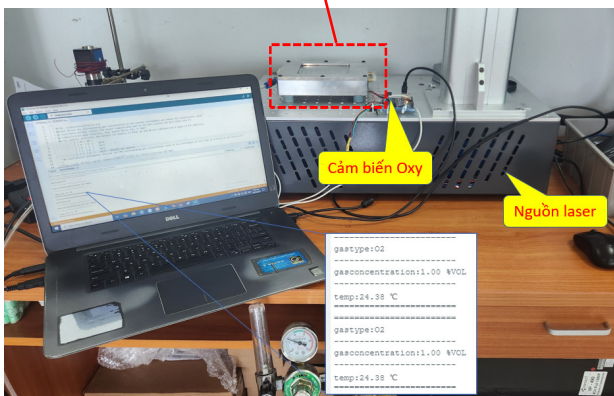
Crom (Cr)	Đồng (Cu)	Sắt (Fe)	Mangan (Mn)	Molybden (Mo)	Nikel (Ni)	Phốt pho (P)
17,42%	0,02%	66,52%	0,60%	2,36%	12,53%	0,01%



a)



b)



Hình 2. Bố trí thí nghiệm: a) Sơ đồ thí nghiệm; b) Thiết bị thí nghiệm

## 2.2. Quy trình thí nghiệm

Các thí nghiệm đánh bóng bằng laser được thực hiện trong buồng kín chứa hỗn hợp khí argon. Khí argon được chứa trong bình khí nén được bơm vào buồng thông qua cửa vào, có thể điều chỉnh lưu lượng bằng van tiết lưu. Cửa xả khí được mở đồng thời với quá trình bơm khí để đuổi ôxy ra ngoài. Màn hình hiển thị cho phép theo dõi và kiểm soát nồng độ ôxy trong buồng. Khi nồng độ ôxy đạt đến giá trị mong muốn, điều chỉnh cả van bơm và van xả để duy trì ôxy ở mức ổn định. Mỗi khu vực đánh bóng tương ứng với một bộ thông số công nghệ có kích thước 5x5mm.

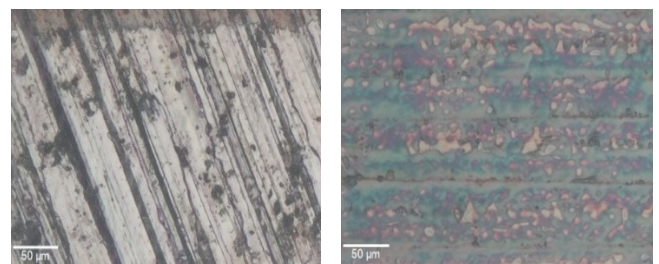
Các thiết lập thông số cơ bản của quy trình đánh bóng bằng laser là công suất laser  $P = 26,25W$ , tốc độ quét  $v_{scan} = 590mm/giây$ , tần số lặp  $f = 30kHz$ , độ rộng xung  $P_w = 225ns$ . Nồng độ ôxy được duy trì ở 5 mức 1%, 5%, 10%, 15% và 20%. Các thiết lập thông số quy trình để đánh bóng bằng laser được hiển thị trong bảng 2. Việc lựa chọn các giá trị này dựa trên nghiên cứu trước đó của nhóm tác giả về tối ưu hóa các thông số công nghệ trong quá trình đánh bóng thép không gỉ 316L. Kết quả của nghiên cứu cho thấy, bộ thông số công suất laser  $P = 26,25W$ , tốc độ quét  $v_{scan} = 590mm/s$ , tần số lặp  $f = 30kHz$ , độ rộng xung  $P_w = 225ns$  cho hiệu quả đánh bóng tối ưu. Với thông số nồng độ Oxy, được chia theo phương pháp tuyến tính và làm tròn thông số với mức lớn nhất là 20% tương ứng với nồng độ Oxy trong khí quyển và 1% là mức nhỏ nhất mà hệ thí nghiệm có thể tạo ra được. Với mỗi bộ thông số thí nghiệm sẽ được áp dụng đánh bóng trên 3 mẫu để đảm bảo tính tin cậy của kết quả.

Bảng 2. Thông số công nghệ đánh bóng hợp kim 316L

Công suất (W)	Tốc độ quét (mm/s)	Tần số lặp (kHz)	Độ rộng xung (ns)	Nồng độ ôxy (%)
26,25	590	30	225	1; 5; 10; 15; 20

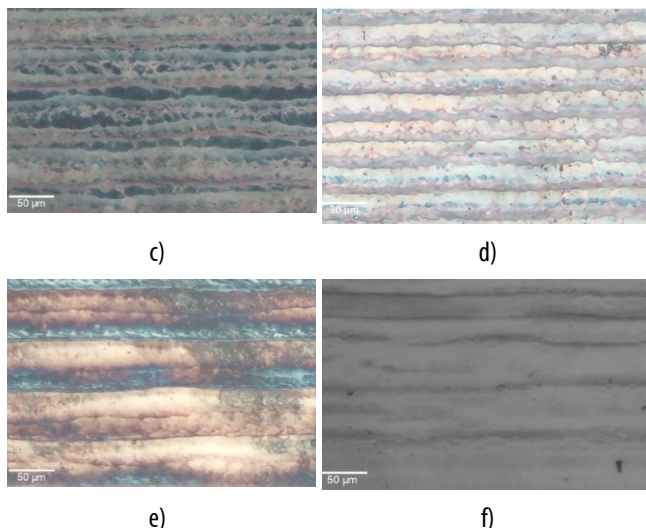
## 3. KẾT QUẢ THÍ NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

Các mẫu sau khi đánh bóng được quan sát trên kính hiển vi kỹ thuật số Axioskop 2 (Nhật Bản) để kiểm tra đặc tính lớp bề mặt đồng thời xác định độ nhám bằng máy đo ZeGage™ Pro HR 3D (Hoa Kỳ). Kết quả đo độ nhám trên các mẫu được thể hiện trong bảng 3.



a)

b)



Hình 3. Bề mặt các mẫu: a) Trước khi đánh bóng; b) Nồng độ oxy 20%; c) Nồng độ oxy 15%; d) Nồng độ oxy 10%; e) Nồng độ oxy 5%; f) Nồng độ oxy 1%

Bảng 3. Kết quả độ nhám sau đánh bóng của các mẫu

Mẫu	Lần 1 (μm)	Lần 2 (μm)	Lần 3 (μm)	Trung bình (μm)
R0	1,288	1,291	1,302	1,294
R1	1,016	1,025	1,008	1,016
R5	0,845	0,840	0,853	0,846
R10	0,717	0,723	0,728	0,723
R15	0,592	0,582	0,599	0,591
R20	0,425	0,428	0,421	0,425

Trong đó, R0, R1, R5, R10, R15, R20 tương ứng với các mẫu chưa đánh bóng, mẫu được đánh bóng với nồng độ Oxy 1%, 5%, 10%, 15% và 20%.

Bảng 4. Phân tích độ tin cậy của dữ liệu

Mẫu	Trung bình (μm)	Độ lệch chuẩn (SD)	Sai số chuẩn (SE)	Khoảng tin cậy 95% (±)	Hệ số biến thiên (CV%)
R0	1,294	0,0074	0,0043	±0,0185	0,57%
R1	1,016	0,0086	0,0050	±0,0215	0,85%
R5	0,846	0,0065	0,0038	±0,0164	0,77%
R10	0,722	0,0057	0,0033	±0,0142	0,79%
R15	0,591	0,0086	0,0050	±0,0215	1,46%
R20	0,424	0,0035	0,0020	±0,0086	0,82%

Trong đó [6]:

- Độ lệch chuẩn:  $SD = \frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2}{n-1}$

- Sai số chuẩn:  $SE = \frac{SD}{\sqrt{n}}$

- Khoảng tin cậy 95%:  $CI = \bar{x} \pm t \times \frac{SD}{\sqrt{n}}$

- Hệ số biến thiên:  $CV = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\%$

Với n = 3 (số lần thí nghiệm)

x<sub>i</sub>: giá trị độ nhám

$\bar{x}$ : độ nhám trung bình

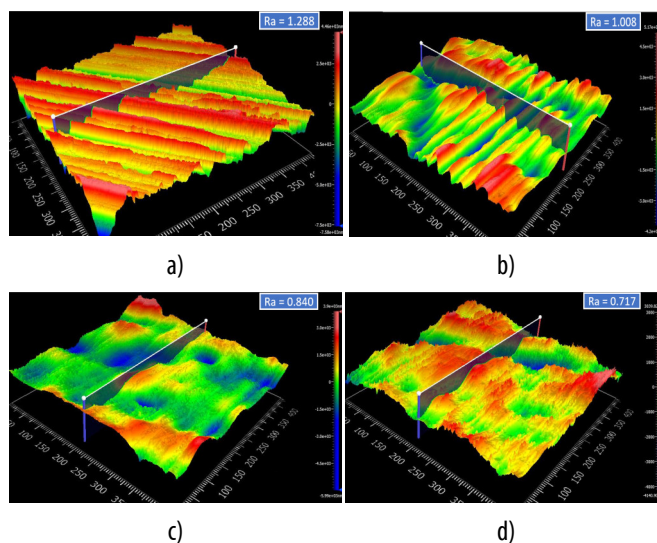
t: chỉ số Student, với n = 3, t ≈ 4,3

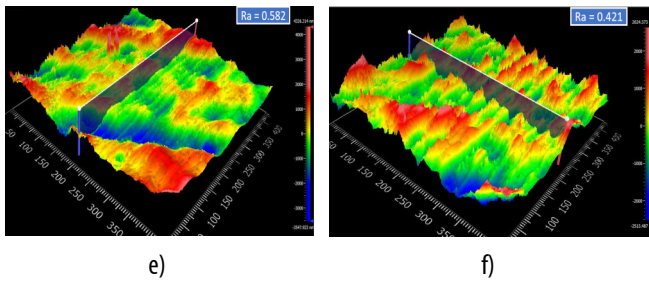
Từ kết quả phân tích độ tin cậy của dữ liệu ở bảng 4, có thể đánh giá như sau:

- Kết quả thí nghiệm có độ tin cậy ở mức 95% về mặt thống kê.

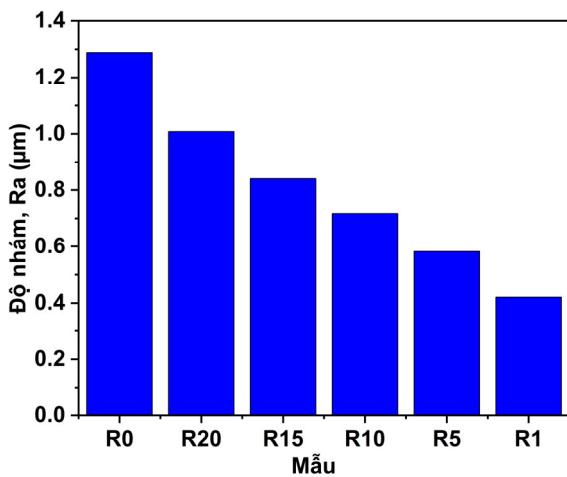
- Tất cả các mẫu đều có hệ số biến thiên < 5%, ngoài ra hệ số biến thiên trung bình chỉ 0,88%, cho thấy kết quả có tính ổn định và đáng tin cậy về mặt thực nghiệm.

Với kết quả đánh bóng khi không có khí bảo vệ, có thể thấy rõ các vùng bị ô xy hóa (các vùng màu nâu) và các giọt nóng chảy cục bộ, một số vị trí vùng nóng chảy tạo thành dải. Điều này có thể giải thích là do ở nhiệt độ cao, lớp kim loại trên bề mặt phản ứng với ô xy trong không khí tạo ra các ô xít kim loại có màu nâu, đồng thời, vùng nóng chảy sẽ đông đặc lâu hơn cho đến khi chùm laser quét tới lần hai, nó làm cho phần kim loại cũ bị cày lên, điều này làm cho độ nhám bề mặt chi tiết tăng. Khi tăng dần tỷ lệ khí bảo vệ trong buồng gia công (giảm tỷ lệ ôxy), lớp khí này bao phủ vùng kim loại nóng chảy làm hạn chế quá trình phản ứng ôxy hóa, đồng thời dòng khí lưu thông trong buồng cũng làm cho tốc độ nguội của vùng kim loại nóng chảy nhanh hơn, hạn chế khả năng tái nóng chảy. Có thể thấy độ mịn của bề mặt chi tiết tỷ lệ thuận với độ giảm nồng độ khí ôxy trong buồng, đồng nghĩa với độ nhám bề mặt chi tiết giảm đi. Hình 5 cho thấy mức độ giảm nhám của các mẫu tương ứng với nồng độ ôxy trong buồng gia công.

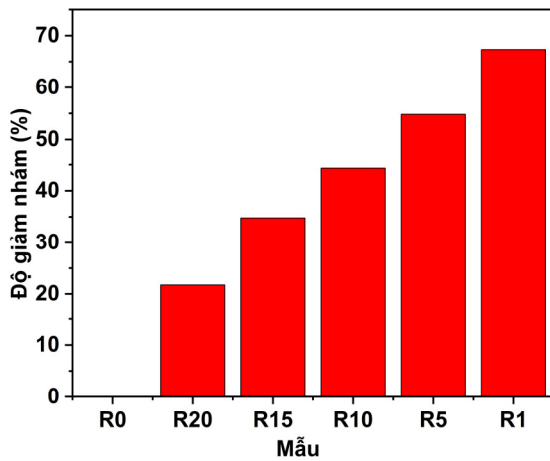




Hình 4. Độ nhám bề mặt các mẫu: a) Trước khi đánh bóng; b) Nồng độ oxy 20%; c) Nồng độ oxy 15%; d) Nồng độ oxy 10%; e) Nồng độ oxy 5%; f) Nồng độ oxy 1%



a)



b)

Hình 5. Biểu đồ độ nhám (a) và giảm nhám (b) các bề mặt sau đánh bóng tương ứng với nồng độ oxy trong buồng gia công

#### 4. KẾT LUẬN

Bài báo này trình bày kết quả nghiên cứu về sự ảnh hưởng của nồng độ khí bảo vệ tới độ nhám bề mặt hợp kim 316L được đánh bóng bằng laser fiber ở chế độ phát xung. Độ nhám bề mặt trước và sau đánh bóng đã được so sánh và đánh giá. Kết quả cho thấy có sự ảnh hưởng rõ rệt của khí bảo vệ tới độ nhám bề mặt với những nồng độ

khí khác nhau. Với nồng độ khí bảo vệ càng lớn, độ nhám bề mặt càng giảm. Điều này được giải thích là do quá trình đánh bóng, lớp kim loại bề mặt ở nhiệt độ cao phản ứng với ô xy trong không khí tạo ra lớp ô xít ngăn cản các lượt đánh bóng tiếp theo, khi nồng độ khí bảo vệ càng lớn, quá trình oxy hóa giảm đi và làm tăng hiệu quả đánh bóng. Nghiên cứu này mang đến giải pháp hữu ích cho việc sử dụng khí bảo vệ trong quá trình đánh bóng kim loại bằng laser để tăng hiệu quả của quá trình.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Parr G., Hanson A., *An Introduction to Stainless Steel* [MI]. Materials Park: ASM, 1965.

[2]. Gisario Annamaria, Barletta Massimiliano, Veniali Francesco, "Laser polishing: a review of a constantly growing technology in the surface finishing of components made by additive manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120:1433–1472, 2022.

[3]. L. Giorleoa, E. Cerettia, C. Giardinib, "Ti surface laser polishing: effect of laser path and assist gas," in *9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '14. Procedia CIRP* 33: 446 - 451, 2015.

[4]. Tolgahan Ermergen, Fatih Taylan, İsmail Serkan Üncü and Ersin Kayahan, "Investigating the influence of shielding gas stability of laser polished Ti-6Al-4V alloy using image processing," *International Advanced Researches and Engineering Journal* 07(02): 072-078, 2023.

[5]. Jilin Xu, Ping Zou, Xue Wang, Anqi Wang, Lu Liu, "Investigation into the laser polishing of an austenitic stainless steel," *Optics & Laser Technology* 163, 109378, 2023.

[6]. NIST/SEMATECH, *e-Handbook of Statistical Methods*, Section 3.3. NIST, 2012. [Online]. Available: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/pmc/section3/pmc33.htm>

#### AUTHORS INFORMATION

**Le Van Van<sup>1</sup>, Tran Van Chau<sup>2</sup>,  
Nguyen Thai Tat Hoan<sup>1</sup>, Vu Thanh Tung<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Hanoi University of Science and Technology, Vietnam

<sup>2</sup>Advanced Technology Center, Military Technical Academy, Vietnam