

TỐI ƯU HÓA THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ CỦA QUÁ TRÌNH LĂN ÉP XEM XÉT ĐẾN CHẤT LƯỢNG BỀ MẶT

OPTIMIZATION OF ROLLER BURNISHING PARAMETERS IN TERMS OF PRODUCT QUALITY

Cao Việt Đức¹, Lê Văn Luận¹, Ngô Văn Tuấn¹, Nguyễn Trung Thành¹, Lục Vân Thương²

¹Khoa Cơ khí, Học viện Kỹ thuật Quân sự

²Phòng Thí nghiệm Trọng điểm Hàn và Xử lý Bề mặt, Viện Nghiên cứu Cơ khí

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, các thông số công nghệ của quá trình phay-lăn ép được tối ưu hóa để nâng cao độ cứng tế vi (MH) và giảm giá trị độ nhám (R_z). Các thông số công nghệ bao gồm tốc độ trục chính khi phay (S_p), tốc độ tiến dao khi phay (F_p), tốc độ trục chính khi lăn ép (S_r), tốc độ tiến dao khi lăn ép (F_r) và chiều sâu lăn ép (D_l). Quy hoạch Taguchi L16 được sử dụng để thực hiện các thí nghiệm. Phương pháp phân tích thành phần chính (PCA) được áp dụng để tính toán trọng số, trong khi phương pháp phân tích quan hệ xám (GRA) được sử dụng để xác định giá trị tối ưu tốt nhất. Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng giá trị tối ưu lần lượt của S_p , F_p , S_r , F_r và D_l là 400 vòng/phút, 200 mm/phút, 950 vòng/phút, 110 mm/phút và 0,035 mm. Tại giải pháp tối ưu được chọn, độ cứng tế vi tăng 6,0% và độ nhám giảm 118,3% so với giải pháp kém nhất. Độ cứng tế vi chủ yếu bị ảnh hưởng bởi D_r , F_p , F_r , S_p và S_r trong khi độ nhám bị ảnh hưởng bởi F_p , F_r , D_r , S_p và S_r . Kết quả tối ưu có thể được sử dụng hiệu quả để nâng cao chất lượng gia công.

Từ khóa: Tích hợp phay-lăn ép; Độ cứng tế vi; Độ nhám; Phân tích quan hệ xám; Tối ưu hóa.

ABSTRACT

In this study, the process parameters of the hybrid milling-burnishing process are optimized to maximize the micro-hardness (MH) and minimize the mean roughness (R_z). The optimizing inputs are the milling spindle speed (S_p), milling feed rate (F_p), burnishing spindle speed (S_r), burnishing feed rate (F_r), and depth of penetration (D_l). The Taguchi L16 is used to perform a set of experiments. The principal component analysis (PCA) is applied to compute the weights, while the grey relation analysis (GRA) is utilized to select the best optimality. As a result, the optimal S_p , F_p , S_r , F_r and D_l were 400 rpm, 200 mm/min, 950 rpm, 110 mm/min, and 0.035 mm, respectively. The MH was improved by 6.0% and the R_z was decreased by 118.3%, as compared to the worst solution. The MH was primarily affected by D_r , F_p , F_r , S_p , and S_r respectively, while R_z was influenced by the F_p , F_r , D_r , S_p , and S_r respectively. The optimal results could be effectively used to enhance the machined quality. The proposed optimizing technique could be used to determine the optimality for other machining operations in terms of saving costs, time, and human efforts.

Keywords: Milling-Burnishing Process; Micro-hardness; Mean roughness; Grey relation analysis; Optimization.

1. TỔNG QUAN

Lăn ép sử dụng con lăn là một kỹ thuật gia công nguội hiệu quả để xử lý bề mặt đã được gia công trước, giúp cải thiện các tính chất bề mặt, cơ học và luyện kim. Lợi ích của phương pháp này là chi phí thấp, đơn giản và đáng tin cậy trong việc đạt được chất lượng bề mặt tối ưu. Lăn ép sử dụng con lăn được ứng dụng rộng rãi trong các ngành công nghiệp như ô tô, hàng không, y tế và sản xuất.

Để cải thiện hiệu quả kỹ thuật, các quá trình lăn ép sử dụng con lăn khác nhau đã được xem xét và tối ưu hóa. Phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM) được sử dụng để phát triển các mô hình dự đoán (độ nhám bề mặt và độ cứng bề mặt) và tối ưu hóa các thông số quá trình (lực ép bi lăn, bước tiến dao, chiều rộng tiếp xúc của bi lăn và số lượt gia công) cho thép EN-9 đã gia công trước [1]. RSM cũng được sử dụng để chọn các yếu tố tối ưu (tốc độ, bước tiến dao, và độ ăn dao) nhằm cải thiện chất lượng lỗ khoan của gang đã gia công [2]. Kết quả cho thấy kích thước lỗ tối ưu, độ nhám bề mặt, và độ tròn lần lượt là 31,74 mm, 0,3757 μm , và 0,012 mm. Các mô hình RSM về độ nhám bề mặt, độ cứng bề mặt, và độ sâu cứng của thép carbon được phát triển dựa trên tốc độ, bước tiến dao, và độ ăn dao [3]. Kết quả chỉ ra rằng bước tiến dao ảnh hưởng chính đến các đáp ứng gia công, tiếp theo là tốc độ và độ ăn dao. Mô hình Kriging

được sử dụng để đề xuất mối quan hệ giữa các thông số quá trình (tốc độ, bước tiến dao, và độ ăn dao) với các đầu ra (độ nhám trung bình, độ nhám chiều cao tối đa, và độ cứng bề mặt) [4]. Các tác giả cho biết độ nhám trung bình và độ nhám chiều cao tối đa giảm lần lượt 95,80% và 91,98%, trong khi độ cứng bề mặt tăng 45,44% so với bề mặt chưa gia công. Nguyễn và cộng sự đề xuất một hệ thống minimum quantity lubrication (MQL) hiệu quả để cải thiện hiệu quả làm mát và bôi trơn trong quá trình gia công bi lăn bên trong [5]. Kết quả cho thấy độ nhám và độ tròn của lỗ khoan gia công giảm lần lượt 48,2% và 46,2% với hệ thống MQL so với điều kiện khô. Có thể nhận thấy, đa số các nghiên cứu hiện tại tập trung vào tối ưu hóa quy trình gia công bi lăn đơn lẻ, trong khi quy trình kết hợp giữa phay và bi lăn chưa được xem xét. Các yếu tố tối ưu của quy trình phay-bi lăn đối với thép cứng vẫn chưa được xác định để cải thiện các chỉ số chất lượng.

2. TỔ CHỨC THỰC NGHIỆM

Các thông số công nghệ được xem xét được thể hiện trong Bảng 1. Các đặc tính của máy công cụ được sử dụng để xác định tốc độ trục chính khi phay và mức bước tiến dao. Hướng dẫn của nhà sản xuất dụng cụ lăn ép được tuân theo khi lựa chọn tốc độ trục chính lăn ép, tốc độ bước tiến khi lăn ép và chiều sâu lăn ép.

Bảng 1. Các thông số quy trình cho hoạt động phay-lăn ép

Ký hiệu	Các tham số	Mức 1	Mức 2	Mức 3	Mức 4
S_p	Tốc độ trục chính khi phay (rpm)	3000	4000	5000	6000
F_p	Bước tiến dao khi phay (mm/min)	200	300	400	500
S_l	Tốc độ trục chính khi lăn ép (rpm)	800	950	1100	1250
F_l	Bước tiến dao lăn ép (mm/min)	50	80	110	140
D_l	Chiều sâu lăn ép (mm)	0.01	0.02	0.025	0.035



Thép 40KH, một loại thép cứng được sử dụng rộng rãi trong các ngành hàng hải và ô tô, được chọn làm mẫu gia công. Mỗi phôi gia công có chiều dài 50,0 mm, đường kính trong 12,0 mm và đường kính ngoài 25,0 mm. Độ cứng tế vi và độ nhám trung bình của bề mặt gia công trước lần lượt là 317 HV và 12,6 μm . Quá trình khoan, phay và lăn ép được thực hiện tuần tự trong một lần gá đặt (Hình 1 a, b và c), trong đó các yếu tố của phay-lăn ép được xem xét. Tất cả các thí nghiệm đều sử dụng máy phay CNC. Máy đo độ nhám Mitutoyo Surftest-SJ 500 được sử dụng để đo độ nhám của bề mặt gia công tại ba vị trí khác nhau, tuân theo tiêu chuẩn ISO 4287. Máy kiểm tra độ cứng FM-800 được sử dụng để đo độ cứng tế vi tại ba vị trí khác nhau trên bề mặt đã qua lăn ép.



(a) Quá trình khoan (b) Quá trình phay (c) Quá trình lăn ép
Hình 1. Quá trình phay-lăn ép kết hợp.

Bảng 2. Dữ liệu thí nghiệm cho quá trình phay-lăn ép.

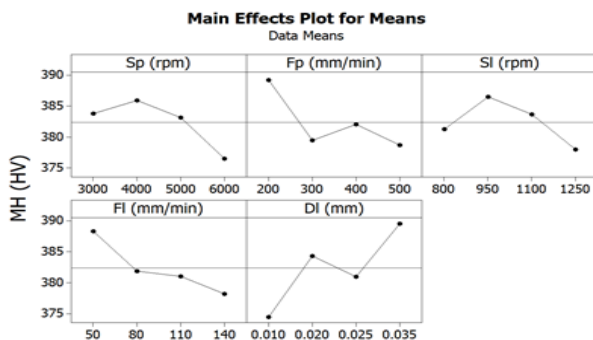
No.	S_p (rpm)	F_p (mm/min)	S_l (rpm)	F_l (mm/min)	D_l (mm)	MH (HV)	Rz (μm)
1	3000	200	800	50	0.01	387.7	2.79
2	3000	300	950	80	0.02	386.6	2.61
3	3000	400	1100	110	0.025	382.1	2.96
4	3000	500	1250	140	0.035	378.8	3.32
5	4000	200	950	110	0.035	402.9	1.53
6	4000	300	800	140	0.025	376.5	2.72
7	4000	400	1250	50	0.02	389.2	1.65
8	4000	500	1100	80	0.01	375.2	2.91
9	5000	200	1100	140	0.02	389.2	2.39
10	5000	300	1250	110	0.01	366.7	3.27
11	5000	400	800	80	0.035	388.5	2.92
12	5000	500	950	50	0.025	388.2	2.13
13	6000	200	1250	80	0.025	377.2	1.67
14	6000	300	1100	50	0.035	388.1	0.76
15	6000	400	950	140	0.01	368.3	2.96
16	6000	500	800	110	0.02	375.6	3.53

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Kết quả thí nghiệm của quá trình phay-lăn ép được trình bày trong Bảng 2.

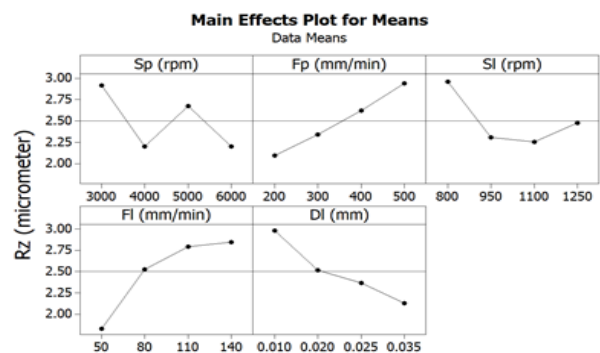
3.1. Ảnh hưởng của các thông số quá trình đến các chỉ số

Hình 2 trình bày ảnh hưởng của các thông số quá trình đến độ cứng tế vi (MH). Kết quả cho thấy xu hướng tương tự đối với tốc độ phay và tốc độ lăn ép. Tốc độ phay và lăn ép cao hơn dẫn đến mức độ tương tác gia công cao hơn, tạo ra nhiệt độ cao hơn tại vùng gia công. Điều này gây ra mức độ biến dạng dẻo lớn hơn, làm vật liệu dễ nén hơn; do đó, độ cứng tế vi tăng lên. Tuy nhiên, tốc độ phay và lăn ép tăng thêm sẽ làm nhiệt độ gia công tăng quá mức, dẫn đến giảm ứng suất dư; vì vậy, độ cứng tế vi giảm. Xu hướng tương tự cũng được tìm thấy với bước tiến dao phay và lăn ép. Tăng bước tiến dao làm tăng khoảng cách giữa các đường gia công liên tiếp, dẫn đến mức độ nén vật liệu thấp hơn; vì vậy, độ cứng tế vi giảm. Ngoài ra, bước tiến cao hơn làm giảm thời gian phay và/hoặc lăn ép trên mẫu, dẫn đến giảm độ cứng tế vi. Độ cứng tế vi cao hơn được tìm thấy khi tăng chiều sâu lăn ép. Tăng chiều sâu lăn ép gây áp lực bi lăn cao hơn lên bề mặt phôi, dẫn đến nén vật liệu tốt hơn. Mức độ biến dạng dẻo cao hơn đạt được; do đó, độ cứng tế vi tăng.



Hình 2. Tác động chính của các thông số quy trình lên MH

Ảnh hưởng của các thông số quá trình đến độ nhám trung bình (Rz) được trình bày trong Hình 3. Độ cứng và độ bền của phôi giảm khi nhiệt độ tại khu vực bi lăn tăng lên cùng với tốc độ phay và lăn ép tăng. Độ nhám giảm đáng kể và vật liệu dễ dàng bị nén. Tuy nhiên, bề mặt đã qua lăn ép có thể biểu hiện hiện tượng hóa cứng do tác động của nhiệt độ gia công cao khi tăng tốc độ phay và lăn ép. Độ nhám cao hơn có thể được nhận thấy khi bước tiến dao phay và lăn ép tăng. Bước tiến cao hơn làm tăng lượng vật liệu dư giữa hai đường gia công liên tiếp; do đó, độ nhám tăng. Ngoài ra, bề mặt gia công hiếm khi được bi lăn khi bước tiến tăng, dẫn đến độ nhám cao hơn. Độ sâu lăn ép lớn hơn dẫn đến độ nhám trung bình thấp hơn. Áp suất gia công cao hơn từ việc bi lăn sâu hơn làm tăng mức độ biến dạng dẻo. Nhiều vật liệu được lăn ép hơn, dẫn đến độ nhám trung bình thấp hơn.



Hình 3. Tác động chính của các thông số quy trình lên Rz

3.2. Kết quả tối ưu

Bảng 3 trình bày các giá trị của $\Delta i(k)$, GRC và GRG. Có thể nói rằng các giá trị GRG cao nhất và thấp nhất có thể thu được ở lần lượt số thử nghiệm 5 và 10. Kết quả là, S_p , F_p , S_l , F_l và D_l tối ưu lần lượt là 400 vòng/phút, 200 mm/phút, 950 vòng/phút, 110 mm/phút và 0,035 mm. MH được cải thiện 9,0% và Rz giảm 113,7% so với giải pháp tệ nhất (Bảng 4). 

Bảng 3. Các giá trị $\Delta_i(k)$, GRC và GRG

No.	Δ_i (MH)	Δ_i (Rz)	GRC (MH)	GRC (Rz)	GRG	Rank
1	0.41989	0.76316	0.54354	0.39583	0.46969	8
2	0.45028	0.69549	0.52616	0.41824	0.47220	7
3	0.57459	0.82707	0.46530	0.37677	0.42103	10
4	0.66575	0.96241	0.42891	0.34190	0.38541	13
5	0.00000	0.28947	1.00000	0.63333	0.81667	1
6	0.72928	0.73684	0.40674	0.40426	0.40550	11
7	0.37845	0.33459	0.56918	0.59910	0.58414	3
8	0.76519	0.80827	0.39520	0.38218	0.38869	12
9	0.37845	0.61278	0.56918	0.44932	0.50925	5
10	1.00000	0.94361	0.33333	0.34635	0.33984	16
11	0.39779	0.81203	0.55692	0.38109	0.46901	9
12	0.40608	0.51504	0.55183	0.49259	0.52221	4
13	0.70994	0.34211	0.41324	0.59375	0.50350	6
14	0.40884	0.00000	0.55015	1.00000	0.77508	2
15	0.95580	0.82707	0.34345	0.37677	0.36011	15
16	0.75414	1.04135	0.39868	0.32439	0.36153	14

Bảng 4. Kết quả tối ưu hóa được tạo ra bởi Taguchi-GRA

Phương pháp	S_p (rpm)	F_p (mm/min)	S_l (rpm)	F_l (mm/min)	D_l (mm)	MH (HV)	Rz (μ m)
Giải pháp tệ nhất	5000	300	1250	110	0.01	366.7	3.27
Giải pháp tốt nhất	4000	200	950	110	0.035	402.9	1.53
Cải thiện (%)						9.0	-113.7

4. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, các thông số quy trình của hoạt động phay-lăn ép kết hợp đã được tối ưu hóa để cải thiện độ cứng tế vi và giảm độ nhám trung bình. Các yếu tố được xem xét là tốc độ trục chính phay, bước tiến dao phay, tốc độ trục chính lăn ép, bước tiến dao lăn ép và chiều sâu lăn ép. Phương pháp PCA được áp dụng để tính trọng số, trong khi GRA được sử dụng để tạo ra mức tối ưu tốt nhất. Dựa trên các kết quả thu được, các kết luận sau đây đã được rút ra:

1) Có thể sử dụng S_p , S_l , F_p và F_l thấp hơn để cải thiện MH. Có thể áp dụng D_l cao hơn để tăng cường MH. Khuyến nghị sử dụng S_p , S_l và D_l cao hơn để tăng Rz. Có thể sử dụng F_p và F_l thấp hơn để đạt được Rz cao hơn.

2) Đối với MH, chiều sâu lăn ép được phát hiện là yếu tố hiệu quả nhất, tiếp theo là bước tiến dao phay, bước tiến dao lăn ép, tốc độ trục chính khi phay và tốc độ trục chính khi lăn ép.

3) Đối với Rz, tốc độ cấp liệu đánh bóng được phát hiện là yếu tố hiệu quả nhất, tiếp theo là bước tiến dao khi phay, chiều sâu lăn ép, tốc độ trục chính khi phay và tốc độ trục chính khi lăn ép.

4) S_p , F_p , S_l , F_l và D_l tối ưu lần lượt là 400 vòng/phút, 200 mm/phút, 950 vòng/phút, 110 mm/phút và 0,035 mm. MH được cải thiện 9,0% và Rz giảm 113,7% so với giải pháp tệ nhất.

5) Phương pháp tối ưu hóa bao gồm Taguchi, PCA và GRA có thể được áp dụng hiệu quả để giải quyết các vấn đề phức tạp nhằm tiết kiệm chi phí và công sức của con người.

6) Tác động của các thông số quy trình đối với lượng khí thải carbon, hiệu quả năng lượng và năng suất sẽ được khám phá trong các công trình trong tương lai. ❖

Ngày nhận bài: 20/3/2025

Ngày phản biện: 10/4/2025

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Stalin John M.R., Banerjee N., Shrivastava K. et al. (2017), "Optimization of roller burnishing process on EN-9 grade alloy steel using response surface methodology". J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 39: 3089-3101.
- [2]. Stalin John M.R., Balaji B. & Vinayagam B.K. (2017), "Optimisation of internal roller burnishing process in CNC machining center using response surface methodology". J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 39, 4045-4057.
- [3]. Nguyen T.T., & Le X. B. (2018), "Optimization of interior roller burnishing process for improving surface quality". Mater. Manuf. Process. 33(11): 1233-1241.
- [4]. Nguyen T.T., Le X. B. (2019), "Optimization of roller burnishing process using Kriging model to improve surface properties". Proc. Inst. Mech. Eng., Part B. 233(12):2264-2282.
- [5]. Nguyen T.T. et al. (2022), "Multi-performance optimization of multi-roller burnishing process in sustainable lubrication condition". Mater. Manuf. Process. 37: 407-427.