

NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA CÁC THÔNG SỐ CÔNG NGHỆ ĐẾN ĐỘ NHÁM BỀ MẶT CỔ KHUYU CỦA TRỤC KHUYU ĐỘNG CƠ TÀU THỦY TRONG QUÁ TRÌNH MÀI BẰNG MÁY DI ĐỘNG

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON SURFACE ROUGHNESS IN MOBILE GRINDING OF MARINE ENGINE CRANKSHAFT JOURNALS

Tô Trọng Hiền*, Mai Thế Trọng, Hoàng Văn Mười

Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

*Email: hientt.mtb@vimaru.edu.vn

TÓM TẮT

Việc sửa chữa trục khuỷu của các động cơ tàu thủy cỡ lớn bằng thiết bị mài di động được coi là giải pháp tối ưu, vì phương pháp này giảm đáng kể thời gian và chi phí sửa chữa bằng cách mài bề mặt cổ trục khuỷu mà không cần tháo rời trục khuỷu ra khỏi động cơ. Nghiên cứu này tập trung vào ảnh hưởng của các yếu tố công nghệ đến các thông số độ nhám bề mặt khi mài cổ trục khuỷu bằng thiết bị mài di động. Các thực nghiệm đã được tiến hành để thiết lập mô hình hồi quy bậc hai nhằm dự đoán độ nhám bề mặt. Kết quả nghiên cứu cho thấy các yếu tố công nghệ ảnh hưởng đáng kể đến độ nhám bề mặt trong quá trình mài: tăng tốc độ máy mài quay quanh cổ khuỷu, chiều sâu mài hoặc kích thước hạt của đá mài dẫn đến độ nhám bề mặt mài tăng. Trong khi đó, khi tăng tốc độ đá mài từ 25 đến 35 m/s thì độ nhám bề mặt mài giảm, nhưng khi tốc độ vượt quá 35 m/s thì độ nhám bề mặt sẽ tăng. Điều này cho thấy tốc độ quay tối ưu của đá mài trong điều kiện thí nghiệm là 35 m/s cho độ nhám bề mặt mài nhỏ nhất. Kết quả cung cấp hướng dẫn có giá trị cho việc lựa chọn các thông số mài phù hợp trong việc sửa chữa trục khuỷu động cơ tàu thủy.

Từ khóa: Mô hình hồi quy; Mài trục khuỷu; Độ nhám bề mặt.

ABSTRACT

Repairing crankshafts of large marine engines using mobile grinding equipment is considered an optimal solution, as it significantly reduces repair time and costs by enabling the restoration of crankshaft journal surfaces without disassembling the crankshaft. This study focuses on the influence of technological factors on surface roughness parameters when grinding the crankshaft journal using mobile grinding equipment. Experiments were conducted to establish a quadratic regression model to predict surface roughness. The research results show that technological factors significantly affect surface roughness during grinding: increasing the grinding machine's rotation speed around the crankshaft journal, grinding depth, or grinding wheel particle size lead to increased surface roughness. Meanwhile, increasing the grinding wheel speed from 25 to 35 m/s reduces surface roughness, but when the speed exceeds 35 m/s, surface roughness increases. This shows that the optimal grinding wheel rotation speed under experimental conditions is 35 m/s for the smallest surface roughness. The results provide valuable guidance for selecting appropriate grinding parameters in the repair of marine engine crankshafts.

Keywords: Regression model; Crankshaft grinding; Surface roughness.



1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sau một thời gian dài hoạt động, trục khuỷu động cơ thường gặp các vấn đề như mài mòn, trầy xước bề mặt hoặc lệch hình học ở cổ khuỷu, tất cả các vấn đề này đều có thể ảnh hưởng tiêu cực đến độ tin cậy và tuổi thọ của động cơ. Khi những hư hỏng này vượt quá giới hạn cho phép, trục khuỷu phải được phục hồi bằng cách mài để khôi phục kích thước hình học và chất lượng bề mặt làm việc [1].

Trong phương pháp sửa chữa truyền thống, trục khuỷu của động cơ cần được tháo ra khỏi động cơ và vận chuyển đến các xưởng nơi trục khuỷu được gia công bằng máy mài chuyên dụng. Tuy nhiên, việc tháo trục khuỷu của một động cơ tàu thủy cỡ lớn và vận chuyển đến xưởng đòi hỏi chi phí cao và mất nhiều thời gian [2]. Do đó, thiết bị mài di động đã được phát triển và ứng dụng rộng rãi để sửa chữa trục khuỷu của các động cơ công suất lớn tại tàu mà không đòi hỏi tháo rời toàn bộ hệ thống. Phương pháp mài này giúp giảm đáng kể thời gian và chi phí bảo trì, đồng thời nâng cao hiệu quả hoạt động của tàu.

Chất lượng bề mặt sau khi mài trục khuỷu thường được đánh giá bằng các chỉ số kỹ thuật như độ chính xác kích thước, độ tròn, độ trụ và độ nhám bề mặt [3]. Trong số đó, độ nhám bề mặt là một trong những thông số quan trọng nhất vì nó ảnh hưởng trực tiếp đến sự hình thành màng dầu bôi trơn trên bề mặt làm việc [4, 5]. Do đó, độ nhám bề mặt cần được kiểm soát cẩn thận trong quá trình mài.

Trong quá trình mài, độ nhám bề mặt bị ảnh hưởng bởi nhiều thông số công nghệ khác nhau như kích thước hạt mài của đá mài, tốc độ đá mài, tốc độ quay của phôi và chiều sâu mài [6]. Các nghiên cứu về công nghệ mài đã chỉ ra rằng việc tăng tốc độ đá mài và giảm chiều

sâu cắt sẽ cải thiện được chất lượng bề mặt sau khi gia công [7]. Ngoài ra, kích thước hạt mài của đá mài cũng ảnh hưởng đáng kể đến cơ chế cắt và hình thành bề mặt. Đá mài có hạt mịn thường tạo ra bề mặt ít nhám hơn so với đá mài có hạt thô [8]. Một số nghiên cứu liên quan đến việc mài trục khuỷu động cơ diesel trên máy mài cố định đã phân tích mối quan hệ giữa các thông số công nghệ và độ nhám bề mặt để xác định chế độ mài tối ưu [9]. Tuy nhiên, hầu hết các nghiên cứu trước đây được thực hiện trong điều kiện gia công trên máy mài cố định với độ cứng hệ thống cao và điều kiện làm việc ổn định. Trong khi đó, thiết bị mài trục khuỷu di động có cấu trúc khác biệt đáng kể so với máy mài truyền thống, bao gồm độ cứng thấp hơn, hệ thống truyền động đơn giản hơn và điều kiện làm việc phức tạp hơn. Do đó, các nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ nhám bề mặt được xác định trong các nghiên cứu trước đây không thể áp dụng trực tiếp cho việc mài bằng thiết bị di động [10].

Vì vậy, việc nghiên cứu ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ nhám bề mặt khi mài trục khuỷu động cơ diesel bằng thiết bị mài di động là cần thiết và có ý nghĩa thực tiễn cao. Kết quả của nghiên cứu này sẽ góp phần làm rõ mô hình hình thành bề mặt trong quá trình mài trục khuỷu bằng thiết bị di động, đồng thời cung cấp cơ sở khoa học để lựa chọn các phương thức công nghệ phù hợp nhằm cải thiện chất lượng bề mặt và độ tin cậy làm việc của trục khuỷu sau khi phục hồi.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Nghiên cứu này sử dụng phương pháp thực nghiệm kết hợp với phân tích hồi quy để xác định mối quan hệ giữa các thông số công nghệ của quá trình mài và độ nhám bề mặt của cổ trục khuỷu khi gia công bằng thiết bị mài di động. Phương pháp thực nghiệm cho phép

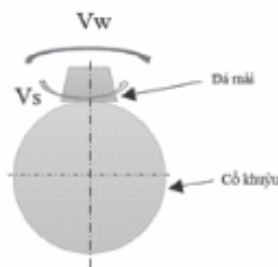
thu thập dữ liệu thực tế trong các điều kiện gia công khác nhau, trong khi phương pháp hồi quy được sử dụng để xây dựng mô hình toán học mô tả ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ nhám bề mặt.

2.1. Quy trình thực nghiệm

Thiết bị mài di động được thể hiện trong Hình 1. Máy mài là một mô tơ khí nén có công suất 1,2 kW, với tốc độ tối đa 1500 vòng/phút.



Hình 1. Thiết bị mài di động



Hình 2. Sơ đồ thiết lập thí nghiệm

Bảng 1. Thông số đầu vào

Thông số	Giá trị	Đơn vị
Tốc độ quay của đá mài (V_s)	25; 30; 35; 40; 45; 50	m/s
Chiều sâu mài (cắt) (a_p)	5; 10; 15; 20	μm
Tốc độ quay của máy mài quanh cổ khuỷu (V_w)	15; 20; 25	rpm
Số grit của đá mài	60; 80; 120; 200	

phút. Đá mài có đường kính 75 mm và được làm bằng oxit nhôm (Aluminum Oxide).

Sơ đồ thiết lập thực nghiệm được thể hiện trong Hình 2. Trong thiết lập này, tốc độ quay của đá mài là V_s . Toàn bộ đá mài và máy mài quay quanh trục khuỷu với tốc độ V_w trong khi trục khuỷu vẫn đứng yên. Đường kính cổ khuỷu 180 mm. Độ nhám bề mặt được đo bằng máy Surtronic S128. Các thông số đầu vào cho quá trình mài được thể hiện trong Bảng 1.

2.2. Phân tích hồi quy

Trong quá trình mài, độ nhám bề mặt (R_a) phụ thuộc vào nhiều thông số công nghệ như tốc độ quay của đá mài, tốc độ quay của đá mài quanh trục khuỷu, chiều sâu cắt và đặc tính của đá mài như thể hiện trong phương trình tổng quát 1.

$$R_a = f(V_s, V_w, a_p, A_G) \quad (1)$$

Trong đó:

- R_a : Độ nhám bề mặt (μm);
- V_s : Tốc độ quay của đá mài (m/s);
- V_w : Tốc độ quay của máy mài quanh cổ trục khuỷu (vòng/phút);
- a_p : Chiều sâu cắt (μm);
- A_G : Kích thước trung bình của hạt mài (μm).

Do mối quan hệ phi tuyến tính giữa các thông số công nghệ và độ nhám bề mặt, mô hình hồi quy bậc hai dựa trên phương pháp bề mặt đáp ứng đã được sử dụng để xây dựng mô hình dự đoán độ nhám bề mặt, như thể hiện trong phương trình 2.

$$\begin{aligned} R_a = & b_0 + b_1 V_s + b_2 V_w + b_3 a_p + b_4 A_G \\ & + b_5 V_s^2 + b_6 V_w^2 + b_7 a_p^2 + b_8 A_G^2 \\ & + b_9 V_s V_w + b_{10} V_s a_p + b_{11} V_s A_G \\ & + b_{12} V_w a_p + b_{13} V_w A_G + b_{14} a_p A_G \end{aligned} \quad (2)$$

☞

Trong đó:

- b_0 : Hằng số của mô hình;
- b_1, b_2, b_3, b_4 : Hệ số tuyến tính;
- b_5, b_6, b_7, b_8 : Hệ số bậc hai;
- b_9 đến b_{15} : Các hệ số tương tác giữa các biến;
- A_G : Kích thước hạt mài trung bình.

Kích thước hạt mài trung bình A_G được xác định dựa trên độ nhám của đá mài theo Tiêu chuẩn FEPA, như thể hiện trong Bảng 2.

Bảng 2. Quy đổi Grit của đá mài sang kích thước hạt mài

Grit	Kích thước trung bình của hạt mài	Đơn vị
60	250	μm
80	180	μm
120	125	μm
200	75	μm

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Từ các kết quả thực nghiệm thu được, phương pháp hồi quy đã được sử dụng để xác định các hệ số từ b_0 đến b_{14} của phương trình (2). Giá trị của các hệ số và độ tin cậy của các biến được phản ánh bởi các giá trị p được trình bày trong Bảng 3.

Bảng 3. Hệ số hồi quy ước tính và giá trị p tương ứng

Các hệ số	Giá trị của hệ số	P-value
b_0	-0,4156	0,024569
b_1	-0,0134	0,007695
b_2	0,025	0,05775

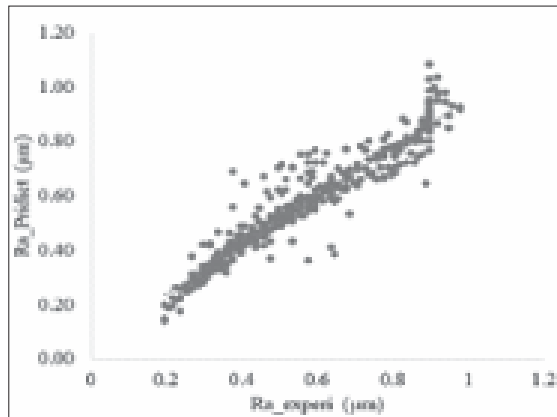
b_3	$402 \cdot 10^{-4}$	$2,05 \cdot 10^{-11}$
b_4	$45 \cdot 10^{-4}$	$1,19 \cdot 10^{-14}$
b_5	$3 \cdot 10^{-4}$	$7,97 \cdot 10^{-08}$
b_6	$-4 \cdot 10^{-4}$	0,196676
b_7	$-8 \cdot 10^{-4}$	$5,93 \cdot 10^{-09}$
b_8	$-8,037 \cdot 10^{-6}$	$2,32 \cdot 10^{-12}$
b_9	$-9,43 \cdot 10^{-5}$	0,359658
b_{10}	$-2 \cdot 10^{-4}$	0,007025
b_{11}	$-31 \cdot 10^{-6}$	1,76E-05
b_{12}	0,000264	0,093604
b_{13}	$4,57 \cdot 10^{-6}$	0,756459
b_{14}	$7,26 \cdot 10^{-5}$	$6,07 \cdot 10^{-11}$

Để xây dựng mô hình phương trình hồi quy rút gọn cần loại bỏ các biến tương ứng với các hệ số (b_6, b_9, b_{12}, b_{13}) không có ý nghĩa thống kê. Việc loại bỏ này không làm giảm đáng kể độ phù hợp của mô hình, đồng thời góp phần cải thiện tính đơn giản, khả năng giải thích và độ tin cậy của phương trình hồi quy. Do đó, phương trình hồi quy thu được được thể hiện trong Phương trình 3.

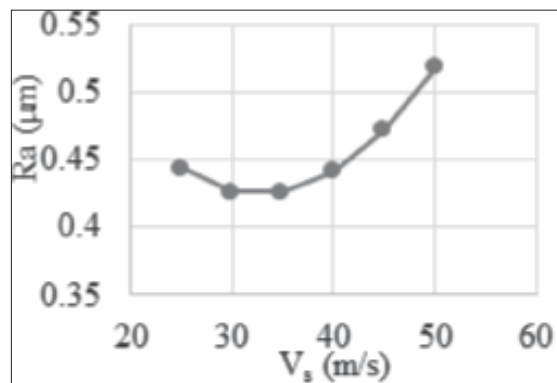
$$R_a = -0,4156 - 0,0134V_s + 0,025V_w + 402 \cdot 10^{-4}a_p + 45 \cdot 10^{-4}A_G + 3 \cdot 10^{-4}V_s^2 - 8 \cdot 10^{-4}a_p^2 - 8,037 \cdot 10^{-6}A_G^2 - 2 \cdot 10^{-4}V_s a_p + 31 \cdot 10^{-6}V_s A_G + 7,26 \cdot 10^{-5}a_p A_G \quad (3)$$

Để đánh giá độ chính xác của phương trình 3, biểu đồ phân tán (Hình 3) được sử dụng để so sánh các giá trị thực nghiệm và dự đoán từ mô hình. Kết quả cho thấy hầu hết các điểm được phân bố xung quanh đường thẳng $y = x$. Điều này cho thấy phương trình 3 có thể được

sử dụng để dự đoán chính xác độ nhám bề mặt sau khi mài với các thông số đầu vào khác nhau.



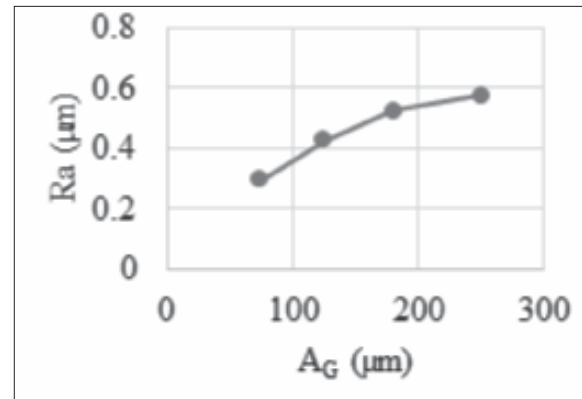
Hình 3. So sánh giữa độ nhám bề mặt dự đoán và thực nghiệm.



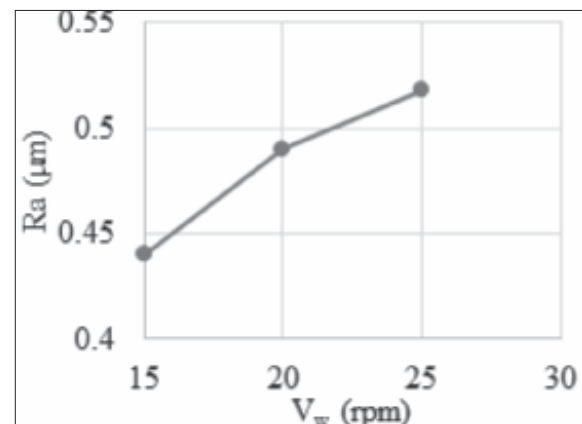
Hình 4. Ảnh hưởng của V_s đến R_a

Hình 4 thể hiện ảnh hưởng của tốc độ quay đá mài (V_s) đến độ nhám bề mặt R_a trong khi giữ các thông số khác không đổi. Kết quả cho thấy tốc độ đá mài (V_s) có tác động phi tuyến tính đến độ nhám bề mặt. Khi tốc độ V_s tăng từ 25 m/s lên khoảng 35 m/s, độ nhám bề mặt có xu hướng giảm. Điều này được giải thích bởi thực tế là việc tăng tốc độ đá mài làm tăng số lượng hạt mài tham gia vào quá trình cắt trong một đơn vị thời gian. Điều này dẫn đến giảm độ dày phôi và quá trình cắt ổn định hơn, do đó cải thiện chất lượng bề mặt [6]. Tuy nhiên, khi V_s tiếp tục tăng vượt quá 35 m/s, R_a có xu hướng tăng mạnh. Điều này có thể là

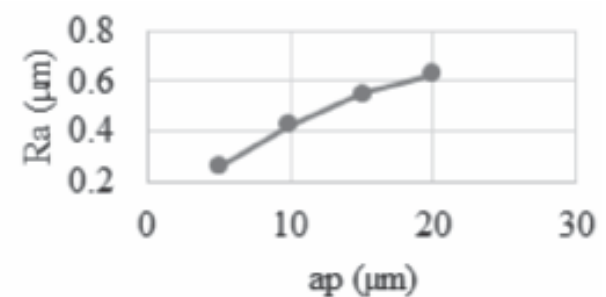
do sự gia tăng nhiệt cắt làm mềm vật liệu, mài mòn hạt mài, làm giảm hiệu quả cắt. Đồng thời, ở tốc độ cao, độ rung của hệ thống gia công, đặc biệt là trong điều kiện sử dụng thiết bị mài di động, có xu hướng tăng lên, làm mất ổn định quá trình cắt và tạo ra các sai lệch vi hình học trên bề mặt gia công [6].



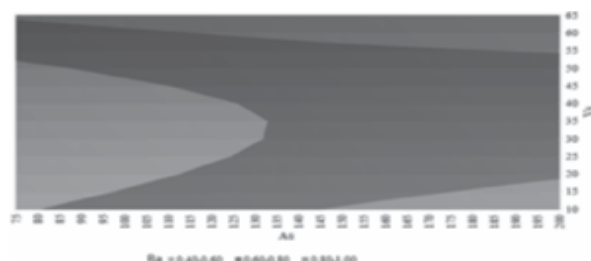
Hình 5. Ảnh hưởng của A_G đến R_a



Hình 6. Ảnh hưởng của V_w đến R_a



Hình 7. Ảnh hưởng của a_p đến R_a



Hình 8. Ảnh hưởng của A_G và V_s đến R_a

Ảnh hưởng của các thông số công nghệ A_G , V_w và a_p được thể hiện lần lượt trong Hình 5, 6 và 7. Kết quả cho thấy khi các thông số này tăng lên, độ nhám bề mặt R_a có xu hướng tăng lên. Hiện tượng này có thể được giải thích bởi thực tế là khi kích thước hạt mài của đá mài tăng lên (hạt mài thô hơn), các vết cắt trên bề mặt trở nên sâu hơn và thô hơn; đồng thời, việc tăng tốc độ quay của máy mài quanh cổ khuỷu và độ sâu cắt làm tăng lực cắt và mức độ biến dạng dẻo trên bề mặt gia công, dẫn đến giảm chất lượng bề mặt sau khi gia công. Kết quả này phù hợp với các nghiên cứu trước đây [11].

Hình 8 thể hiện ảnh hưởng tổng hợp của hai thông số (A_G và V_s) lên R_a (trong điều kiện tốc độ gia công V_w không đổi). Kết quả cho thấy tồn tại một dải tốc độ mà tại đó R_a đạt giá trị nhỏ nhất, và dải tốc độ này thay đổi theo kích thước hạt mài. Cụ thể, trong khu vực nghiên cứu, tốc độ quay tối ưu của đá mài được xác định là khoảng $V_s \approx 35$ m/s, tại đó độ nhám bề mặt đạt giá trị nhỏ nhất.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đã khảo sát ảnh hưởng của các thông số mài chính như tốc độ quay của đá mài (V_s), tốc độ quay của máy mài quanh cổ khuỷu (V_w), chiều sâu cắt (a_p), và kích thước hạt mài (A_G) đến độ nhám bề mặt (R_a). Một mô hình hồi quy bậc hai đã được thiết lập dựa trên dữ liệu thực nghiệm để dự đoán độ nhám bề mặt trong các điều kiện mài khác nhau.

Kết quả cho thấy V_s và A_G ảnh hưởng đáng kể đến R_a , trong khi V_w có tác động tương đối nhỏ trong phạm vi nghiên cứu. Mô hình được thiết lập cho thấy mối tương quan mạnh mẽ với dữ liệu thực nghiệm, khẳng định độ tin cậy của dự đoán.

Phân tích bề mặt đáp ứng và đường đồng mức cho thấy tốc độ mài tối ưu đạt được ở khoảng $V_s = 35$ m/s, kết hợp với kích thước hạt mài phù hợp, dẫn đến giá trị độ nhám bề mặt thấp nhất. Các kết quả thu được cung cấp cơ sở thực tiễn để lựa chọn các thông số mài nhằm nâng cao chất lượng bề mặt.

Lời cảm ơn:

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: DT25-26.23.❖

Ngày nhận bài: 30/3/2026

Ngày phản biện: 09/4/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Rastislav Bernát, Jozef Žarnovský, Ivan Kováč, et al (2022), "Microanalysis of Worn Surfaces of Selected Rotating Parts of an Internal Combustion Engine". Materials, 15, 158.
- [2]. Oihane C. Basurko, Zigor Uriondo (2015), "Condition-Based Maintenance for medium speed diesel engines used in vessels in operation". Applied Thermal Engineering, Volume 80, 5 April, Pages 404-412.
- [3]. W. Brian Rowe (2014), "Principles of Modern Grinding Technology". ISBN: 978-0-323-24271-4, Elsevier.
- [4]. B. Bhushan (2013), "Introduction to Tribology". Wiley.
- [5]. H. Czichos, T. Saito, L. Smith (2006), "Handbook of Materials Measurement Methods". Springer.
- [6]. S. Malkin, C. Guo (2008), "Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives". Industrial Press.
- [7]. I. Marinescu, W. Rowe, B. Dimitrov (2004), "Tribology of Abrasive Machining Processes". William Andrew Publishing.
- [8]. M. C. Shaw (2005), "Metal Cutting Principles". Oxford University Press, 2005.
- [9]. A. K. Chattopadhyay (2011), "Machining and Machine Tools". Wiley India.
- [10]. W. B. Rowe (2013), "Grinding and Finishing of Cylindrical Components". CIRP Annals.
- [11]. T. Tom, V. Janis, Z. Marcis et al (2012), "A Study on How Grinding Technology Parameters Affect the Surface Texture Formation of Marine Diesel Engine Crankshafts". Advanced Materials Research Vols 538-541. pp 1413-1421.