

PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC KẾT CẤU MÁY CÔNG CỤ

METHOD OF DYNAMIC ANALYSIS FOR STRUCTURE OF MACHINE TOOLS

Phạm Tuyết Mai¹, TS. Bùi Tuấn Anh²

¹Khoa Kỹ thuật - Công nghệ, Trường Đại học Hùng Vương

²Viện Cơ khí, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội


TÓM TẮT

Đặc trưng của quá trình gia công bao gồm độ chính xác, năng suất, độ nhám bề mặt phụ thuộc vào đặc tính động lực học của kết cấu máy công cụ. Việc phân tích động lực học máy công cụ để đánh giá ảnh hưởng của nó đến chất lượng của quá trình gia công, dự đoán và ngăn chặn được các sự cố bất ngờ. Từ đó nâng cao khả năng làm việc ổn định của máy, đảm bảo năng suất và chất lượng gia công. Bài viết này trình bày nghiên cứu sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) và phần mềm Catia V5-6R2014 để đánh giá và phân tích động lực học kết cấu máy phay CNC Festo trong các điều kiện đặt tải tương ứng với các chế độ gia công khác nhau. Kết quả nghiên cứu chỉ ra ảnh hưởng của động lực học kết cấu máy tới chất lượng gia công, từ đó có thể đưa ra các điều kiện gia công phù hợp tương ứng với các yêu cầu đề ra.

Từ khóa: Phương pháp phần tử hữu hạn (FEM); Động lực học, máy công cụ, phần mềm Catia V5-6R2014.

ABSTRACT

Characteristics of a machining process including the accuracy, the productivity, and the surface roughness depend on the dynamic characteristics of machine tool structures. Dynamics analysis of machine tools helping us to evaluate the effect of machine-tool to the machining quality, predict and prevent the unexpected failure. Thus, it increases the ability of operation stability of machine, and warrants the productivity and machining quality. This paper uses the finite element method (FEM) and the Catia V5-6R2014 software to evaluate and analyze the dynamics structure of CNC Festo milling machine with different load conditions corresponding to different machining modes. Researching results show the influence of dynamics structure of machine on the machining quality to provide appropriate machining conditions corresponding to the requirements.

Keywords: The finite element method (FEM), dynamics, machine-tool, Catia V5-6R2014 software. 

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Máy công cụ là loại máy cơ bản và cần thiết nhất trong các phân xưởng sản xuất của các ngành công nghiệp chính yếu như ngành hàng không vũ trụ, khuôn mẫu, máy tự động và sản xuất linh hoạt... Để sản xuất các sản phẩm có hiệu suất cao chi phí thấp, các nhà thiết kế máy công cụ phải liên tục cải thiện độ chính xác trong gia công và năng suất máy công cụ với mục tiêu cuối cùng là hiệu suất sản phẩm. Hiệu suất sản phẩm của máy công cụ phụ thuộc rất lớn vào độ cứng tĩnh và đặc tính động lực học. Việc phân tích động lực học kết cấu máy công cụ giúp người thiết kế có thể cải tiến và tối ưu hoá kết cấu máy, đảm bảo khả năng làm việc ổn định của máy, từ đó có thể đưa ra các điều kiện gia công phù hợp tương ứng với các yêu cầu đề ra. Để người thiết kế có thể nhanh chóng đánh giá trạng thái kết cấu máy khi thực hiện các nhiệm vụ gia công, đánh giá các yếu tố ảnh hưởng tới chất lượng gia công, dự đoán và ngăn chặn được các sự cố bất ngờ, thì rất cần sử dụng các phương pháp phân tích và các phần mềm chuyên nghiệp. Việc phân tích động lực học kết cấu máy công cụ sẽ giúp đưa ra các thông số công nghệ hợp lý với một kết cấu máy cụ thể, góp phần đảm bảo năng suất và chất lượng gia công trên máy.

Mô hình công nghệ thích hợp nhất cho việc phân tích động lực học kết cấu là mô hình phân tích phần tử hữu hạn (FEA). FEA có khả năng mô tả các cấu trúc 3D một cách chi tiết và dự đoán các đặc tính tĩnh, động lực học của mô hình dưới tác dụng của lực [4]. Để đảm bảo được độ chính xác của mô hình và đánh giá được đặc tính làm việc của máy mà không thực nghiệm, ta cần kiểm tra các thử nghiệm cần thiết để có các thông số đáng tin cậy cho một mô phỏng. FEA mô phỏng đặc tính của cả máy công cụ bằng cách sử dụng kết quả của mô hình đã có. Đặc tính của máy được dự đoán từ

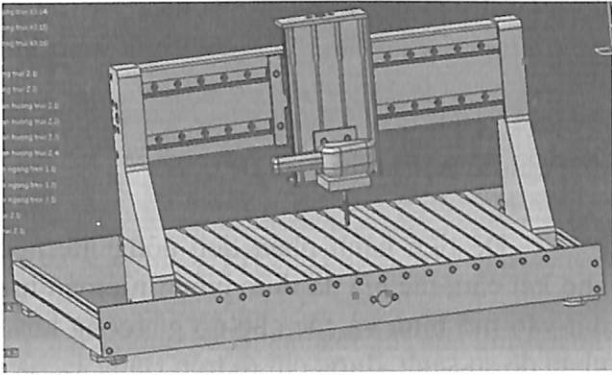
việc mô phỏng sẽ được sử dụng cho quá trình thiết kế, chỉnh sửa hay tối ưu hóa để đáp ứng được yêu cầu thiết kế.

Đã có nhiều công trình nghiên cứu trên thế giới thực hiện việc phân tích động lực học kết cấu máy công cụ. Tác giả B. Malleswara Swami & K. Sunil Ratna Kumar [1] đã sử dụng phần mềm Catia để mô hình hóa và phân tích động lực học cho máy phay CNC dạng nằm, để đánh giá đặc tính động lực học của máy khi chế tạo máy bằng các vật liệu khác nhau. Dehong huo & Kai cheng [2] cũng đã sử dụng FEM để phân tích động lực học và so sánh sự cứng vững khi có tần số riêng và các chế độ rung động tương ứng của hai kết cấu máy có khung khép kín và khung hở. Jingxing Qi et al. [3] sử dụng phương FEM kết hợp phần mềm ProE5.0 và Ansys Workbench để mô hình hóa và phân tích động lực học cho máy Taper DK7725, ông chỉ ra rằng phải tăng độ cứng hoặc thay đổi cấu trúc của máy DK7725 để giảm sự biến dạng dưới tác dụng của ngoại lực. Hareesha [5] tiến hành phân tích động lực học cho trục chính máy phay CNC BT-30, đồng thời sử dụng phần mềm ANSYS để mô phỏng và phân tích mô hình đơn giản hóa của trục chính. Nguyễn N. T. [6] cũng đã xây dựng mô hình toán học FEA để xác định lực cản cắt, dự đoán lực cắt, công suất cắt, mômen xoắn, dao động và chất lượng bề mặt khi gia công cắt gọt kim loại bằng máy phay CNC.

2. KẾT CẤU MÁY TỔNG THỂ VÀ KẾT CẤU TƯƠNG ĐƯƠNG

Máy công cụ đại diện được đưa vào phân tích ở đây là máy phay CNC Festo thuộc dạng máy phay 2.5D, gia công các biên dạng khác nhau trong mặt phẳng XY với chiều sâu gia công được chọn trước. Kích thước bàn máy xấp xỉ 700 x 500 mm theo hai phương X và Y (Hình 1). Các trục chạy dao được dẫn động bởi

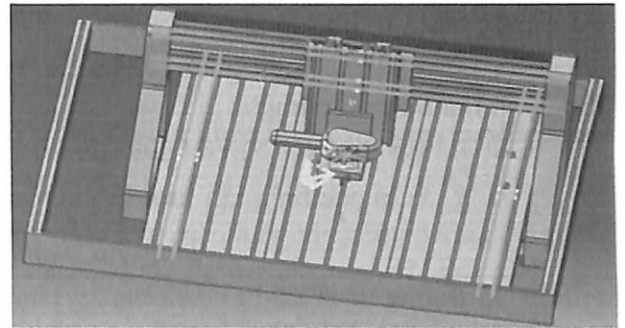
các động cơ bước độc lập. Mô hình máy được xây dựng trên phần mềm Catia V5-6R2014, bao gồm 145 chi tiết lắp ghép: Bàn máy, khung máy, các trục dẫn hướng, giá giá máy và máy khoan, các ổ đỡ, ổ chặn, bulông...



Hình 1. Kết cấu máy phay CNC Festo

Tổng thể máy CNC Festo có số lượng chi tiết lớn, khi lắp ghép số lượng liên kết rất nhiều bao gồm liên kết các mặt phẳng hay các mặt cầu; liên kết cố định hoặc liên kết trượt, quay; trong đó có một lượng lớn các mối ghép bu lông; gây khó khăn cho việc phân tích động lực học toàn bộ máy trên phần mềm. Việc mô hình được sự trượt hay chuyển động tương đối giữa các bộ phận máy với nhau là rất khó, yêu cầu cấu hình máy tính cao. Khi thực hiện phân tích động lực học kết cấu toàn bộ máy phay CNC Festo, phần mềm sẽ thực hiện phân tích cho tất cả các bộ phận máy thông qua các nút lưới, phân tích cho các liên kết và phân tích cho tất cả các mối lắp bulông. Điều này làm thời gian tính toán kéo dài, yêu cầu cấu hình máy tính cao và không cần thiết vì nếu triệt tiêu tần số rung thì các mối ghép bulông luôn đảm bảo bền. Nếu lực và mômen đặt vào dao phay lớn gây ra ứng suất vượt quá giới hạn đàn hồi của vật liệu chế tạo dao thì dao sẽ bị phá hủy trước khi lực và mômen có tác động lên kết cấu tổng thể của máy. Vì vậy, để việc phân tích động lực học kết cấu máy CNC Festo có kết quả rõ ràng hơn, tác giả đã thực hiện đơn giản hóa mô hình máy phay CNC Festo thành

mô hình tương đương trên phần mềm Catia V5-6R2014 để đảm bảo thể hiện được đầy đủ các liên kết cần thiết, hạn chế tối đa sự phức tạp do số lượng chi tiết gây ra. Trên kết cấu máy tương đương tác giả có thể thay thế việc chia lưới tự động thành chia lưới thủ công cho từng part, lưới được chia sẽ mịn hơn hỗ trợ việc phân tích kết cấu được dễ dàng, thời gian tính toán của phần mềm được rút ngắn (hình 2).



Hình 2. Kết cấu máy phay CNC Festo tương đương

Như vậy, với máy tương đương này ta chỉ còn các bộ phận kết cấu là: Cụm đế máy được cố định vị trí; cụm khung (thân) máy di chuyển theo trục Y so với bàn máy; cụm trục thẳng đứng di chuyển theo trục X so với khung máy thông qua liên kết ma sát lăn và cụm giá giá máy và dao phay di chuyển theo trục Z so với cụm thẳng đứng. Tác giả thực hiện liên kết các bề mặt chuyển động với nhau (chuyển động của dao, cụm trục Z và bàn máy) bằng các General Analysis Connection. Vật liệu của máy phay CNC Festo là nhôm, vật liệu của dao phay là thép gió.

3. PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH ĐỘNG LỰC HỌC KẾT CẤU MÁY

3.1. Mô hình động lực học tổng quát

Việc phân tích động lực học kết cấu máy dựa trên mô hình động lực học của một hệ

thống rung, một mô hình toán học có thể phát triển để hoàn thành phương thức phân tích. Quyết định cho phương thức phân tích chính là mô hình toán học. Độ chính xác của mô hình bị tác động trực tiếp bởi kết quả phân tích. Mô hình động lực học tổng quát là một mô hình nhiều bậc tự do như sau [5]:

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (3.1)$$

Trong đó:

[M]: Ma trận tổng khối lượng;

[C], [K]: Ma trận giảm chấn tương đương và ma trận độ cứng;

X(t), F(t): Chuyển vị và ngoại lực;

\ddot{x} , \dot{x} , x: là các biến lần lượt là gia tốc,

vận tốc và chuyển vị.

Mô hình này được giải gần đúng bằng phương pháp phần tử hữu hạn được tích hợp trong môi trường Analysis & Simulation, Generative Structural Analysis của phần mềm Catia nhờ các điều kiện biên được đặt kèm khi liên kết các bộ phận máy với nhau.

3.2. Các thông số tính toán

Để tiến hành phân tích động lực học cho kết cấu, tác giả đã thực hiện tính toán lực đặt vào mô hình và các chế độ gia công khác nhau để so sánh, được chỉ ra trên Bảng 1:

Bảng 1. Các thông số lực và chế độ cắt

Chiều rộng phay B (mm)	Đường kính dao phay D (mm)	Chiều sâu phay t (mm)	Số vòng quay của dao n (vg/ph)	Lượng chạy dao răng Sz (mm/răng)	Lực cắt theo trục z, Pz (N)	Số răng dao Z (răng)	Lực cắt theo trục x, Px (N)	Lực cắt theo trục y, Py (N)	Mômen xoắn Mz (N.m)
8	8	3	15000	0,08	888,43	2	444,22	310,95	35,537
8	8	3,5	15000	0,07	921,39	2	460,7	322,49	36,856
8	8	4	15000	0,065	979,82	2	489,91	342,94	39,193
8	8	4,5	15000	0,06	1023,55	2	511,77	358,24	40,942
8	8	5	15000	0,055	1052,57	2	526,28	368,4	42,103
8	8	5,5	15000	0,05	1066,71	2	533,35	373,35	42,668

3.3. Phân tích

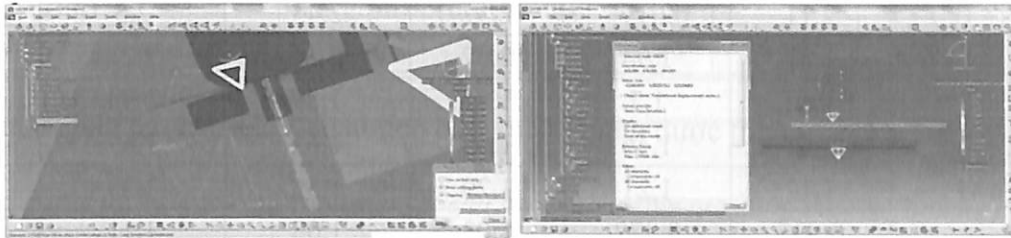
Để thực hiện phân tích bằng phương pháp phần tử hữu hạn, tác giả thực hiện chia lưới cho tất cả các bộ phận kết cấu của máy phay CNC Festo, được thể hiện như Hình 3.



Hình 3. Chia lưới cho toàn bộ kết cấu máy

4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Đặt các thông số trong Bảng 1 lên mô hình kết cấu máy phay CNC Festo trong môi trường phân tích, thiết lập điều kiện biên tương ứng, tiến hành phân tích ta thu được các kết quả được chỉ ra trên Hình 4.



Hình 4. Kết quả ứng suất và chuyển vị của kết cấu máy tại chế độ cắt ứng với $t = 5\text{mm}$

Thông kê lại các kết quả sau khi phân tích theo 6 chế độ cắt khác nhau, tác giả thu được như kết quả trong các Bảng 2 và 3 và trên các Hình 5 và 6.

Bảng 2. Giá trị ứng suất tương ứng trong từng trường hợp của chiều sâu phay, MPa

Chiều sâu phay, mm	$t = 3$	$t = 3,5$	$t = 4$	$t = 4,5$	$t = 5$	$t = 5,5$
Ứng suất Max	0	974	1040	1080	1110	1130
Giá trị ứng suất	845	877	932	974	1000	1020
	752	779	829	866	890	902
	658	682	725	758	779	790
	564	585	622	649	668	677
	470	487	518	541	556	564
	376	390	414	433	445	451
	282	292	311	325	334	338
	188	195	207	216	223	226
93,9	9,74	104	108	111	113	
Ứng suất Min	4,74E-16	7,88E-16	4,11E-16	1,09E-15	1,13E-15	7,73E-16

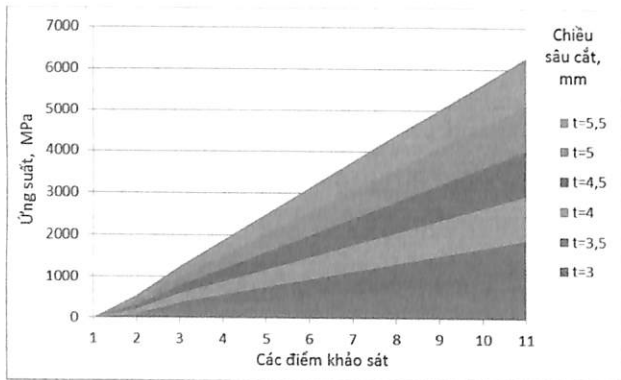
Các kết quả trên cho thấy, khi gia công, toàn bộ kết cấu máy sẽ chịu một giá trị ứng suất khác nhau tại mỗi điểm. Giá trị này tăng dần lên khi lực và mômen gia công tăng lên. Tuy nhiên, giá trị ứng suất này chỉ lớn ở mũi dao phay và các vùng lân cận, còn trên trục Z, khung máy và bàn máy có xuất hiện ứng suất nhưng giá trị rất nhỏ (chỉ từ 1,09E-15 MPa - Bảng 2). Chứng tỏ máy phay CNC Festo được

thiết kế với độ bền cần thiết để gia công các chi tiết bằng thép với dao phay ngón bằng thép gió. Nếu lực tăng lên nhiều hoặc trong quá trình làm việc xuất hiện sự cộng hưởng do rung động, gây ra ứng suất lớn quá giới hạn cho phép thì dao phay sẽ bị phá hủy trước khi gây ảnh hưởng xấu tới kết cấu máy. Bảng 3 dưới đây đưa ra các giá trị chuyển vị tương ứng trong từng trường hợp của chiều sâu phay.

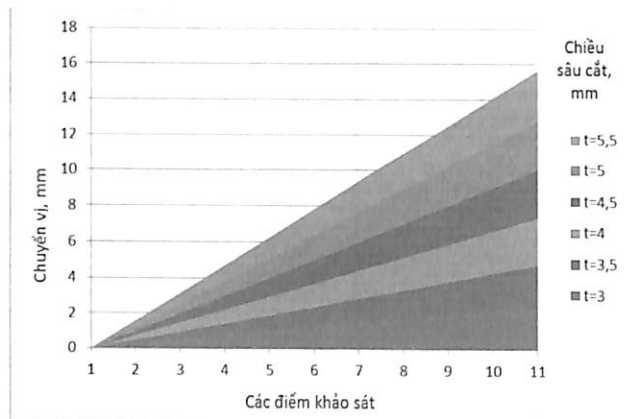
Bảng 3. Giá trị chuyển vị tương ứng trong từng trường hợp của chiều sâu phay, mm

Chiều sâu phay, mm	t = 3	t = 3,5	t = 4	t = 4,5	t = 5	t = 5,5
Chuyển vị Max	2,34	2,43	2,58	2,7	2,78	2,81
Chuyển vị	2,11	2,19	2,32	2,43	2,5	2,53
	1,87	1,94	2,07	2,16	2,22	2,25
	1,64	1,7	1,81	1,89	1,94	1,97
	1,41	1,46	1,55	1,62	1,67	1,69
	1,17	1,21	1,29	1,35	1,39	1,41
	0,937	0,972	1,03	1,08	1,11	1,12
	0,703	0,729	0,775	0,81	0,833	0,844
	0,468	0,486	0,517	0,54	0,555	0,562
	0,234	0,243	0,258	0,27	0,278	0,281
Chuyển vị Min	0	0	0	0	0	0

Do nhận được các giá trị ứng suất như trên mà tương ứng tại các vị trí kết cấu sẽ bị biến dạng sai lệch vị trí so với vị trí ban đầu. Ở mũi dao phay và các vùng lân cận ứng suất lớn nên chuyển vị cũng lớn hơn, còn trên trục Z, khung máy và bàn máy có xuất hiện ứng suất nhưng giá trị rất nhỏ, khó có thể quan sát được trong thực tế hay đo lường nếu không sử dụng phần mềm mô phỏng.



Hình 5. Các giá trị ứng suất



Hình 6. Các giá trị chuyển vị

Các kết quả thu được ở trên là các kết quả được tác giả tính trong các trường hợp chiều sâu cắt cực đại (hay lực và mômen cực đại) để phân tích về độ bền và khả năng gia công lớn nhất của máy. Vì vậy, các giá trị ứng suất và chuyển vị lớn, không phù hợp với chế độ và trạng thái gia công thực tế. Để kiểm tra lại trạng thái động lực học của máy trong điều kiện gia công thông thường, tác giả tiến hành phân tích động lực học kết cấu máy phay CNC Festo với điều kiện đặt lực, mômen và chế độ cắt như trong Bảng 4.

Bảng 4. Giá trị lực và mômen trong điều kiện gia công thực tế

Chiều rộng phay B (mm)	Đường kính dao phay D (mm)	Chiều sâu phay t (mm)	Số vòng quay của dao n (vg/ph)	Lượng chạy dao răng, Sz (mm/răng)	Lực cắt theo trục z, Pz (N)	Lực cắt theo trục x, Px (N)	Lực cắt theo trục y, Py (N)	Mômen xoắn Mz (N.m)
8	8	0,3	15000	0,06	99,69	49,847	34,893	3,9878

Kết quả nhận được sau khi phân tích bằng phần mềm được thống kê trên Bảng 5:

Bảng 5. Giá trị ứng suất và chuyển vị của kết cấu trong điều kiện gia công thực tế (từ max đến min)

Ứng suất, MPa	105	84,3	73,8	63,3	52,7	42,2	21,1	10,5	1,81E-14
Chuyển vị, mm	0,263	0,21	0,184	0,158	0,131	0,105	0,0526	0,0263	0

Nhận thấy, ứng suất lớn nhất xuất hiện trên kết cấu là 105 MPa, trong khi ứng suất bền của vật liệu chế tạo là 750 MPa. Điều này có nghĩa là, điểm nguy hiểm nhất trên kết cấu khi làm việc ở điều kiện thông thường (thực tế) vẫn luôn đảm bảo thừa bền. Với những giá trị này, ta có thể điều chỉnh vị trí gia công để hạn chế cho sai số gia công là nhỏ nhất. Trong quá trình gia công, lực và chế độ gia công không gây ra tác động xấu cho kết cấu máy phay CNC Festo.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đưa ra phương pháp phân tích động lực học cho kết cấu máy công cụ, cụ thể là đã phân tích động lực học kết cấu tổng thể cũng như kết cấu đơn giản hóa của máy phay CNC Festo bằng việc sử dụng phương pháp phần tử hữu hạn và phần mềm chuyên dụng Catia. Tác giả đã phân tích, đánh giá động lực học của kết cấu máy phay CNC Festo dưới tác dụng của lực, mômen và các chế độ cắt khác nhau; đánh giá về ứng suất và chuyển vị trên các thành phần kết cấu máy trong những điều kiện gia công cụ thể. Kết quả bài báo cũng đã chỉ ra rằng, kết cấu máy phay CNC Festo dạng cầu trục là một kết cấu được thiết kế đảm bảo độ bền gia công tương ứng với nhiều trường hợp theo yêu cầu công nghệ. ❖

Ngày nhận bài: 08/3/2017

Ngày phản biện: 10/4/2017

Tài liệu tham khảo:

- [1]. B. Malleswara Swami & K.Sunil Ratna Kumar (2012), Design and structural analysis of CNC vertical milling machine bed, International Journal of Advanced Engineering Technology, IJAET/Vol.III/ Issue IV/, 97 - 100.
- [2]. Dehong Huo, Kai Cheng, Integrated Dynamic Modelling, Design Optimization and Analysis, Design of a 5-Axis Ultraprecision Micro Milling Machine – Ultramill, UK.
- [3]. Jingxing Qi, Changtao Cai, Zhixing Mao, Dongdong Luo (2014) , Dynamic Analysis and Optimization of WEDM Based on AWE and LMS, Journal of Electrical Engineering, Vol.12, No.7, 5037 - 5043.
- [4]. Hao Yang, Wu Yang, Daming Wang (2011), Dynamic Characteristic Analysis On Machine Tool By Ansys, 223-226.
- [5]. Hareesha (2015), Static and dynamic analysis of a CNC milling spindle, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Volume: 02 Issue: 07, 222 - 228.
- [6]. Nguyen, N. T., Kao, Y. C., Huang, S. C., and Chen, M. S.(2015). A prediction method of dynamic cutting force in the milling process of S45C by flat-end mill cutter, CRC Press/Balkema (Taylor & Francis Group).