مجله مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1394، دوره 15، شماره 2، ص‌ص 34-40

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تأثیر استراتژی‌های مختلف فرزکاری روی میکروسختی نوعی سطح انحنادار

حامد حسن‌پور[1]، شقایق شجری[2]، امیر راستی[1]، محمدحسین صادقی[3*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 143-14115 sadeghim@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 مهر 1393
پذیرش: 09 آذر 1393
ارائه در سایت: 29 آذر 1393

کلید واژگان:
استراتژی‌های فرزکاری
میکروسختی سطح
طرح آزمایش تاگوچی
بافت سطح

چکیده

استفاده از سطوح پیچیده در صنایع گوناگون از جمله هوافضا و قالب‌سازی، رو به گسترش است. برای فرزکاری چنین سطوحی، توجه به فاکتورهایی از قبیل نوع استراتژی و پارامترهای ماشین‌کاری که همگی روی قابلیت ماشین‌کاری تأثیرگذار هستند، امری ضروری است. از اهداف این تحقیق، بررسی تأثیر استراتژی‌های مختلف و نیز پارامترهای مختلف ماشین‌کاری روی میکروسختی سطح نوعی سطح انحنادار (محدب) از جنس فولاد ضد زنگ 1/4903 است. ابزار بکار رفته، فرز انگشتی سرکروی با روکش TiN و استراتژی‌های استفاده شده، چهار روش خطوط موازی، آفست سه‌بعدی، مارپیچ و شعاعی می‌باشند. طراحی و تحلیل آزمایش‌ها با استفاده از روش تاگوچی انجام گردید. پارامترهای ورودی شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و فاصله بین مسیرهای ابزار بودند. پس از انجام آزمایش‌ها، سختی لایه سطحی نمونه‌های فرزکاری شده اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که مسیرهای مختلف ابزار تأثیر متفاوتی روی میکروسختی سطح فرزکاری دارند. فارغ از شرایط برش، سختی بعد از فرآیند، در تمامی استراتژی‌ها از سختی اولیه قطعه‌کار بیشتر بود. استراتژی مارپیچ دارای بیشترین و استراتژی شعاعی دارای کمترین مقدار سختی بودند. علاوه بر این، افزایش نرخ پیشروی، سرعت برشی و فاصله بین مسیرهای ابزار، سختی را افزایش داد و فاصله بین مسیرهای ابزار کمترین اثر را روی سختی داشت. بیشترین مقدار سختی نیز در شرایط سرعت برشی 180 متربردقیقه، نرخ پیشروی 0/18 میلیمتربردندانه و فاصله بین مسیر ابزار 0/7 میلیمتر گزارش شد که افزایش 56% را نشان می‌داد.

Investigation of milling strategies effect on microhardness of a typical curved surface

Hamed Hassanpour, Shaghayegh Shajari, Amir Rasti, Mohamad Hossein Sadeghi*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O. B. 14115-143, Tehran, Iran. sadeghim@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 October 2014
Accepted 30 November 2014
Available Online 20 December 2014

Keywords:
Milling Strategies
Surface Microhardness
Taguchi Method
Surface Topography

ABSTRACT

Employing complex surfaces in different industries such as aerospace and die and mold is increasing. For milling of such surfaces, taking factors such as strategies and machining parameters which affect the machinability into consideration is necessary. The objective of this study is to investigate the effect of different strategies and machining parameters on microhardness of a typical curved surface (convex) of stainless steel 1.4903. The cutting tool used in this study was ball nose end mill coated TiN and the strategies employed were Raster, 3D-offset, Spiral and radial. Design of experiments was done using Taguchi method. The input parameters were cutting speed, feed rate and step over. After conducting experiments, surface layers hardness of milled samples were measured. The results showed that various tool paths have different influence on microhardness of milled surfaces. Regardless of cutting condition, surface hardness after machining in all strategies was more than the primary hardness of the workpiece material. Spiral strategy provided the maximum hardness and radial strategy the minimum hardness. In addition, increasing the feed rate, cutting speed and step over, increased surface hardness and step over had the least influence on hardness. The maximum hardness magnitude was reported in cutting speed of 180 m/min, feed rate of 0.18 mm/tooth and step over of 0.7 mm which shows 56 % increase.

1- مقدمه

با توجه به پیشرفت‌های صورت‌گرفته در صنایع قالب‌سازی، هوافضا و اتومبیل‌سازی، به‌کارگیری قطعات با هندسه پیچیده رو به افزایش است. در نتیجه تولیدکنندگان به دنبال روش‌های مؤثرتری برای تولید این‌گونه قطعات، با کیفیت و راندمان بالاتری می‌باشند. یک روش، استفاده از فرزکاری پنج‌محوره است که می‌تواند راندمان فرایند را تا 20 برابر افزایش دهد. این روش نیازمند تجهیزات خاص و گران‌قیمت بوده و دسترسی به آن نیز محدود است [1,2]. روش دیگر، بهره‌گیری از استراتژی‌های فرزکاری مناسب و بهینه‌سازی شرایط ماشین‌کاری برای این سطوح می‌باشد. انتخاب مسیر ابزار مناسب می‌تواند تا حد بالایی موجب افزایش کیفیت قطعات، کاهش زمان ماشین‌کاری، بالارفتن عمر ابزار و کمترشدن ارتعاشات ماشین‌ابزار شود [3]. استراتژی‌های مسیر ابزار، موقعیت و جهت ابزار برشی را در هر نقطه روی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
H. Hassanpour, Sh. Shajari, A. Rasti, M. H. Sadeghi, Investigation of milling strategies effect on microhardness of a typical curved surface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 34-40, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.26.4]

سطح قطعه‌کار تعیین می‌کنند.

هدف اصلی این استراتژی‌ها، کمینه‌کردن مواد باقی‌مانده[1] بین مسیرهای حرکت ابزار در هنگام فرزکاری است [4].

درصد زیادی از قطعات مهندسی بر اثر پدیده‌های سطحی نظیر سایش، خوردگی و خستگی در ضمن کار منهدم می شوند. ماهیت لایه سطحی، تأثیر بسیار زیادی بر خواص مکانیکی و عملکردی قطعه‌کار دارد که تعامل این دو، تحت عنوان سلامت سطح بررسی می‌شود [5]. از مهم‌ترین مشخصه‌های سلامت سطح، سختی سطح ماشین‌کاری‌شده می‌باشد که تأثیر مهمی روی رفتار سایشی و عمر خستگی قطعه دارد.

فرآیند فرزکاری سبب تغییرشکل پلاستیک لایه‌های سطحی قطعه‌کار شده و این امر منجر به بالا رفتن سختی در مقیاس میکرو در لایه سطحی و زیرسطحی قطعه ماشین‌کاری شده می‌شود و با پیشروی در عمق کاهش می‌یابد. زمانی که درجه حرارت قطعه در طول عملیات ماشین‌کاری از دمای آستنیته فراتر رود (به علت اصطکاک، لبه انباشته و کرنش پلاستیک)، فاز آستنیت تغییر کرده و ضمن کوئنچ شدن، لایه تغییریافته‌ی شکننده‌ای روی سطح بوجود می‌آید که می‌تواند روی استحکام خستگی ماده تأثیر منفی بگذارد [6]. خواص این لایه را می‌توان توسط اندازه‌گیری میکروسختی سطح قطعه، مورد بررسی قرارداد. گفتنی است که بیشترین مقادیر میکروسختی، در لایه‌ی سطحی قطعه‌ی ماشین‌کاری‌شده به‌وجود می‌آید که مقدار آن از سطح به مغز قطعه به سرعت کاهش می‌یابد.

برخی از محققین در زمینه بررسی تغییرات میکروسختی روی سطح ماشین‌کاری شده مطالعاتی را انجام داده‌اند. بارباکی و همکارانش [7] حداکثر ضخامت لایه سخت شده را در ماشین‌کاری فولاد سخت بر اساس تابعی از سرعت برشی، عمق برش و سایش ابزار تقریب زدند. همچنین نشان داده‌شد که در ماشین‌کاری سخت، خنک‌کاری در ضخامت لایه سخت‌شده تأثیری نداشته اما باعث باریک‌شدن لایه سیاه می‌شود.

لیو و همکارانش، [8] به بررسی مشخصه‌های سلامت سطح نوعی فولاد یاتاقانی با سختی 60 راکول‌سی پرداختند. نتایج نشان داد که عمق لایه سخت‌شده سطحی تحت ماشین‌کاری، با افزایش سختی اولیه ماده قطعه‌کار افزایش می‌یابد.

مطالعات زیادی نیز در زمینه بهینه‌سازی پارامترها و استراتژی‌های ماشین‌کاری روی سطوح مختلف صورت گرفته است که در ادامه به برخی از آن‌ها نیز اشاره می‌شود. راموس و همکارانش [9] تأثیر استراتژی‌های خطوط موازی[2]، شعاعی[3] و آفست سه‌بعدی[4] را در پرداخت پروانه موتور کشتی بررسی کردند. نتایج نشان داد که استراتژی خطوط موازی در جهت پیشروی و استراتژی آفست سه‌بعدی در جهت عمود بر پیشروی دارای کمترین زبری هستند.

توه [10] اثر زوایای مختلف مسیر ابزار را در استراتژی خطوط موازی تک جهته و دو جهته و آفست سه بعدی از نظر سایش ابزار بررسی کرد و زاویه 60 درجه را به‌عنوان بهترین زاویه معرفی نمود. همچنین در استراتژی آفست سه بعدی، انتخاب نقطه شروع حرکت ابزار اثر قابل توجهی روی طول برش نداشت. اما در استراتژی موازی، یک‌طرفه یا دو طرفه بودن حرکت ابزار تأثیر زیادی روی طول برش داشت. همچنین طول مسیر تولید شده در استراتژی موازی کمتر از آفست بود. از طرف دیگر در روش موازی، باقی‌مانده‌های روی سطح ماشینکاری شده به طور کامل از بین نرفت. حال آنکه در روش آفست با حذف این باقی‌مانده‌ها، سطح همواری به وجود آمد. او [11] همچنین استراتژی‌های مختلف خطوط موازی یک‌طرفه، خطوط موازی دوطرفه و آفست سه‌بعدی را در خشن‌کاری فولاد سخت‌کاری‌شده H13، بررسی کرده و نشان داد که روش خطوط موازی دوطرفه دارای کمترین زمان ماشین‌کاری و بیشترین نرخ براده‌برداری است.

گولوگلو و ساکاریا [12] سه استراتژی مختلف را برای حفره‌تراشی یک قطعه استفاده نمودند. نتایج نشان داد که در روش خطوط موازی یک‌طرفه و آفست سه‌بعدی، نرخ پیشروی و در استراتژی خطوط موازی دوطرفه، عمق برش محوری تأثیر بیشتری بر زبری سطح داشتند.

کرمپنس و همکارانش [13] پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد استراتژی-های خطوط موازی، شعاعی، مارپیچ[5]، پله‌ای[6] و آفست سه‌بعدی را ارزیابی کردند. آن‌ها دریافتند که فاصله بین مسیرهای ابزار، موثرترین پارامتر بر زبری‌سطح بوده و زاویه ورود و خروج ابزار دارای اثر چندانی نیست.

مصطفی‌پور و ابوالقاسمی [14] به بررسی اثر دو استراتژی خطوط موازی و پله‌ای بر کیفیت و زمان ماشین‌کاری، در پرداخت‌کاری نوعی قطعه مقعر پرداختند و نشان دادند که روش خطوط موازی در زوایای کمتر از 45 درجه، و روش پله‌ای در زوایای بیشتر از آن، صافی‌سطح مناسب‌تری دارند.

شجری و همکارانش [15] اثر استراتژی‌های مختلف ماشین‌کاری را در فرزکاری سرکروی قطعه‌ای انحنادار مورد بررسی قراردادند. در این تحقیق نیروی ماشین‌کاری، زمان ماشین‌کاری بررسی شدند و از تحلیل واریانس[7] برای تحلیل نتایج استفاده گردید.

فرای و همکارانش [16] در ماشین‌کاری سطوح چندضلعی نتیجه گرفتند که استراتژی خطوط موازی زمانی بهینه است که حرکت‌های رفت‌وبرگشتی ابزار به موازات بلندترین طول وجه قطعه‌کار باشد. همچنین با افزایش زاویه مسیر، طول برش و سایش ابزار افزایش می‌یابد.

مارشال و گریفیث [17] از ترکیب استراتژی‌های پله‌ای و خطوط موازی در ماشین‌کاری سطوح انحنادار استفاده کردند. آن‌ها مشاهده کردند که در استراتژی پله‌ای هرچه شیب قطعه بیشتر باشد، تراکم مسیر ابزار افزایش‌یافته و ارتفاع برآمدگی‌ها کاهش می‌یابد. درحالی‌که این پدیده برای استراتژی خطوط موازی، در انحنای کمتری رخ می‌دهد. درنتیجه پیشنهاد شد که بر اساس شیب قطعه‌کار، ناحیه ماشین‌کاری به دو بخش تقسیم گردد و دو استراتژی به‌صورت همزمان بخش مورد نظر را ماشین‌کاری کنند.

بررسی نتایج تحقیقات اخیر در زمینه مطالعه میکروسختی سطح در فرزکاری و نیز عملکرد استراتژی‌های مختلف ماشین‌کاری روی کیفیت سطح نشان می‌دهد که تاکنون گزارش تحقیقی در زمینه اثر استراتژی‌های فرزکاری روی میکروسختی سطح قطعه‌کار با هندسه انحنادار ارائه نشده است. لذا در این مقاله اثر پارامترهای اصلی فرزکاری شامل سرعت برشی، نرخ پیشروی و فاصله بین مسیرهای ابزار روی میکروسختی سطحی محدب از جنس فولاد ضدزنگ 1/4903 مورد بررسی قرار گرفت. آزمایش‌ها در چهار استراتژی خطوط موازی، آفست سه‌بعدی، مارپیچ و شعاعی بررسی شدند و نتایج حاصل از این استراتژی‌ها با یکدیگر مقایسه گردید. در پایان نیز تصاویر بافت سطح برای چهار استراتژی مورد مطالعه در این تحقیق ارائه شد.

1- Scallop
2- Raster
3- Radial
4- 3D-Offset

5- Spiral
6- Z-Constant
7- ANOVA

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.26.4]

2- استراتژی‌های فرزکاری

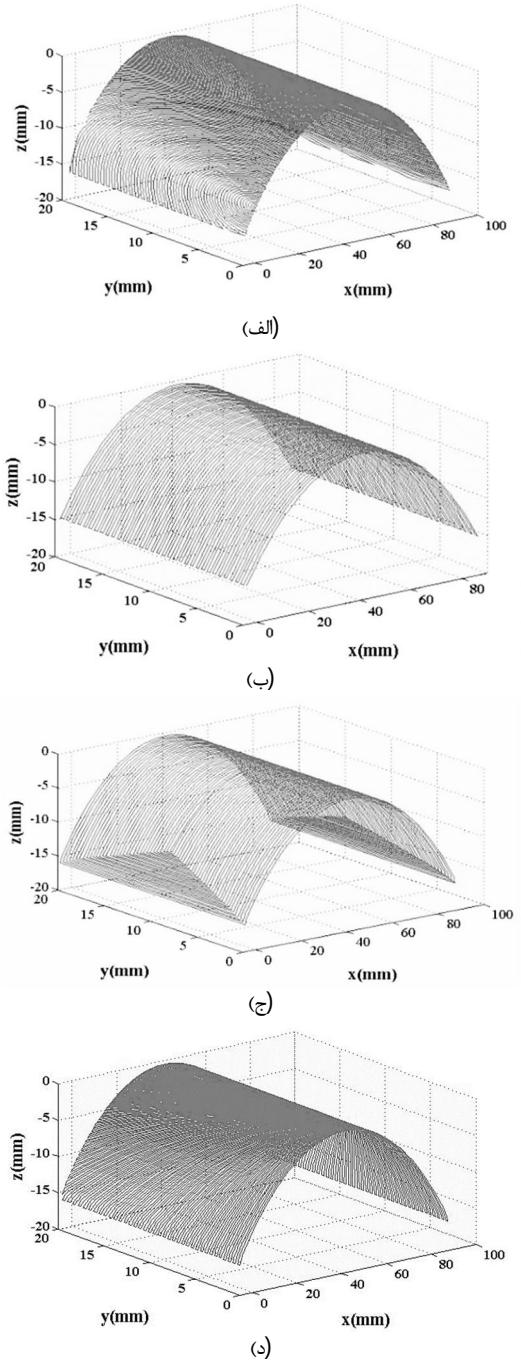
فرزکاری سطوح منحنی با به‌کارگیری استراتژی‌های مختلفی تسهیل می‌شود. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به روش‌های مارپیچ، خطوط موازی، آفست سه‌بعدی و شعاعی اشاره کرد که در ادامه به‌صورت خلاصه به آن‌ها اشاره شده است.

در استراتژی مارپیچ، ابزار از یک نقطه کانونی شروع به حرکت کرده و در تمام مسیر، تماس ابزار با قطعه‌کار به‌صورت پیوسته حفظ می‌شود (شکل 1 (الف)). در این نوع ماشین‌کاری به‌دلیل حرکت مارپیچ و تماس پیوسته ابزار، زمان ماشین‌کاری کاهش‌یافته و عمر ابزار نیز افزایش می‌یابد [18].

در استراتژی خطوط موازی، ابزار حرکت‌های رفت و برگشتی مطابق با پروفیل سطح قطعه و موازی با یکدیگر انجام داده و تنها ارتفاع آن تغییر می‌کند (شکل 1 (ب)). یکی از مزایای این روش قابلیت تغییر زاویه مسیر حرکت ابزار روی قطعه است. این روش برای نیمه‌پرداخت‌کاری و از بین بردن ردهای باقی‌مانده ابزار روی سطح قطعه از مرحله خشن‌کاری و همچنین پرداخت‌کاری مناطق با انحنای کم مناسب است [18].

در استراتژی آفست سه‌بعدی مطابق شکل 1 (ج)، ابزار معمولاً از محیط قطعه شروع به حرکت کرده و به سمت داخل هدایت می‌شود. ابزار در هر سیکل به نقطه شروع حرکت خود بازمی‌گردد و سپس سیکل داخلی بعدی را طی می‌کند. این حرکت آنقدر ادامه می‌یابد تا کل سطح ماشین‌کاری شود. در این استراتژی، از پل‌های ارتباطی بین مسیرهای بیرونی و درونی استفاده گردیده که باعث پیوستگی حرکت ابزار می‌شود. به‌دلیل ثابت بودن فاصله بین مسیر ابزار در این روش، صافی‌سطح خوبی قابل‌دستیابی است [18].

بر اساس شکل 1 (د) نیز، ابزار در استراتژی شعاعی از یک نقطه مرکزی شروع به حرکت می‌کند و در این حالت مسیرهای ابزار به یک نقطه مرکزی همگرا می‌شوند. این روش برای ماشین‌کاری مناطقی از قطعه با انحنای کم (زاویه تماس بین 0 درجه تا 40 درجه) و یا مناطقی که حالت دایره‌ای دارند مناسب است [18].



شکل 1 مسیر حرکت ابزار در روش‌های الف) مارپیچ ب) خطوط موازی ج) آفست سه‌بعدی د) شعاعی

3- تجهیزات و مواد آزمایش

جنس ماده قطعه‌کار در این تحقیق، فولاد ضدزنگ مارتنزیتی 1/4903 با سختی 300 ویکرز بود که ترکیب شیمیایی آن در جدول 1 آمده است. آزمایش‌های طرح‌ریزی‌شده روی نمونه‌های محدب با زاویه 32± درجه و با طول 82 میلیمتر، عرض 60 میلیمتر و ارتفاع 16 میلیمتر مطابق شکل 2 آماده سازی شدند. روی هر نمونه سه آزمایش صورت گرفت. در شکل 3 (الف) منطقه مربوط به هر آزمایش به صورت شماتیک روی مدل قطعه نمایش داده شده است. بدین ترتیب 36 آزمایش طراحی شده روی 12 قطعه انجام گرفت که در شکل 3 (ب) نیز نمونه‌ای از قطعه‌کارهای فرزکاری شده، نشان داده شده است.

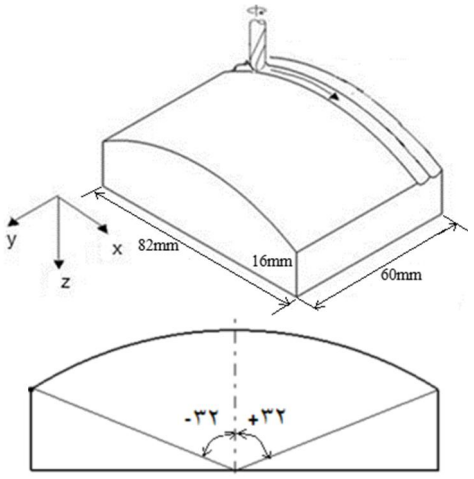
از دستگاه فرز کنترل عددی سه محوره هارتفورد[1]، با کنترلر فانوک[2] با حداکثر سرعت دورانی 6000 دور بر دقیقه و نرخ پیشروی 10000 میلیمتر بر دقیقه استفاده گردید. از ابزار فرز انگشتی سرکروی دو لبه والتر[3] با پوشش TiN و قطر 12 میلیمتر نیز برای فرزکاری نمونه‌ها بهره گرفته شد. شکل 4 تصویری از نحوه ماشین‌کاری قطعات را نشان می‌دهد. روش روانکاری بکاررفته در این تحقیق سیستم سنتی غرق آبی بود.

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد 1,4903

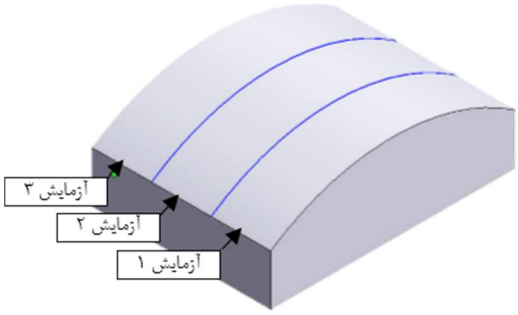
عنصر شیمیایی	درصد وزنی (%)
C	0/1
Si	0/35
Mn	0/45
Cr	8/5
Mo	0/95
V	0/22
Nb	0/53
Ni	0/4
عناصر دیگر	0/04Al، 0/015 S، 0/025 P

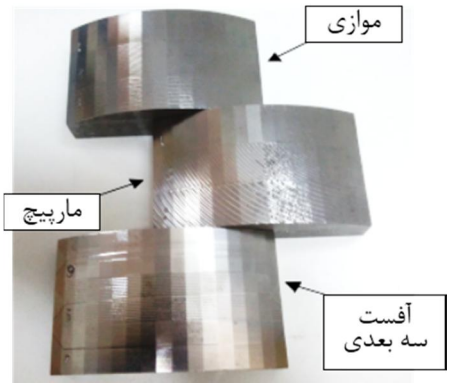
1- HARTFORD
2- FANUC
3- WALTER

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.26.4]



شکل 2 نمای ایزومتریک و کناری قطعه‌کار مورد استفاده جهت انجام آزمایش‌ها



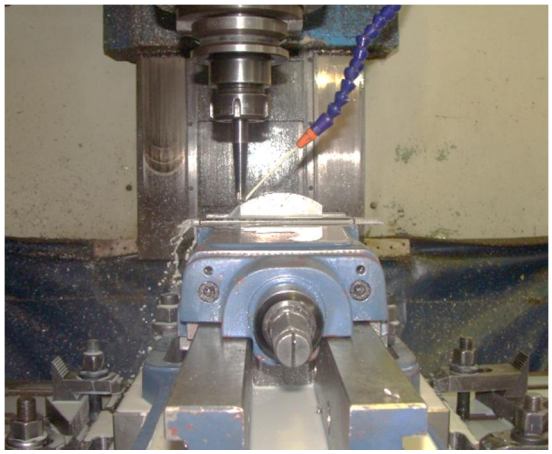


شکل 3 الف) شماتیک مناطق مربوط به هر آزمایش روی نمونه‌های محدب
ب) نمونه‌های ماشینکاری شده توسط استراتژی مختلف

بمنظور اندازه‌گیری میکروسختی سطح، از دستگاه سختی‌سنج شرکت باریس[1] مدل وی- تست[2] با دقت 1 ویکرز استفاده گردید.

میانگین میکروسختی 3 ناحیه مختلف از یک سطح ماشین‌کاری‌شده به عنوان معیار میکروسختی آن آزمایش مد نظر قرار گرفت (شکل 5). میکروسختی سطح بر حسب سختی ویکرز گزارش گردید و اندازه‌گیری تحت نیروی 1 کیلوگرمی و در مدت زمان 4 ثانیه انجام شد. تصاویر بافت سطح ماشین‌کاری‌شده نیز توسط میکروسکوپ نوری الیمپوس[3] با حداکثر بزرگنمایی 1000 برابر گرفته شد.

1- Bareiss
2- V-test
3- Olympus

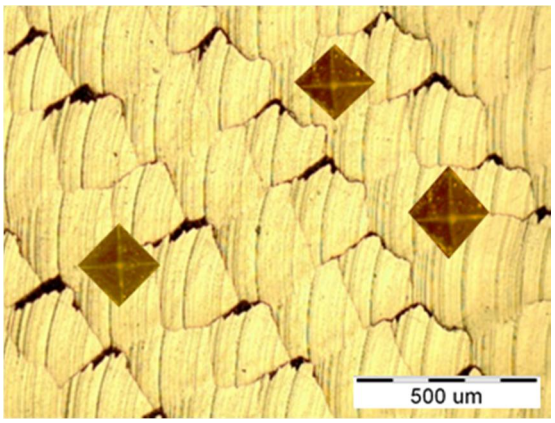


شکل 4 چیدمان انجام آزمایش به‌همراه قطعه‌کار در فرزکاری

4- روش انجام آزمایش

به‌منظور بررسی تأثیر شرایط و استراتژی‌های مختلف ماشین‌کاری روی میکروسختی در فرزکاری فولاد ضدزنگ مارتنزیتی 1/4903، سه فاکتور نرخ پیشروی (*fz*)، سرعت برشی (*Vc*) و فاصله میان مسیرهای ابزار[4] (*S*) در 3 سطح تغییر داده شدند. ابتدا قبل از طرح‌ریزی تست‌ها، با در نظر گرفتن شرایط برش پیشنهادی در کاتالوگ شرکت ابزارسازی و کارهای قبلی موجود در فرزکاری فولاد مارتنزیتی، یک سری تست‌های غربال‌گری انجام گرفت. مقدار عمق برش محوری نیز به علت تأثیر بسیار کم روی سختی سطح، در تمامی آزمایش‌ها ثابت و برابر با 0/5 میلیمتر فرض شد. پارامترها به‌همراه سطوح و مقادیر آن‌ها در جدول 2 آمده است. برای طراحی آزمایش، از طرح آزمایش تاگوچی[5] طبق آرایه ارتوگونال L9 استفاده شد که تعداد آزمایش‌ها را از $3^3=27$ به 9 آزمایش کاهش داد.

این تعداد آزمایش، بمنظور مقایسه میکروسختی برای استراتژی‌های مارپیچ، آفست سه‌بعدی، خطوط موازی و شعاعی به‌صورت جداگانه تکرار گردید و در مجموع 36 آزمایش انجام شد. در ادامه، تصاویر بافت سطح تشکیل شده در اثر استراتژی‌های مختلف ماشین‌کاری، در یک آزمایش به عنوان نمونه بررسی گردید. آزمایش‌ها به‌منظور جلوگیری از بروز خطا، به‌صورت تصادفی انجام گرفتند. برای انجام هر آزمایش، مدل هندسی قطعه‌کار در نرم‌افزار سالیدورکس[6] رسم شد و کد فرزکاری آن با استفاده از



شکل 5 نقاط اندازه‌گیری میکروسختی سطح برای هر نمونه

4- Step Over
5- Taguchi Method
6- SolidWorks

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.26.4]

نرم‌افزار پاورمیل[1] استخراج گردید. بمنظور کاهش حرکت‌های اضافی ابزار و کمینه‌کردن زمان ماشین‌کاری در استراتژی‌های مختلف، از ترکیب ماشین‌کاری موافق[2] و مخالف[3] استفاده شده است.

5- نتایج و بحث

پس از انجام هر آزمایش، مقادیر میکروسختی (H) ناحیه ماشین‌کاری‌شده اندازه‌گیری شد. جدول 3 مقادیر پارامترهای برشی در هر آزمایش را به‌همراه مقادیر میکروسختی برای تمامی استراتژی‌ها نشان می‌دهد.

بمنظور بررسی معنی‌داربودن اثر پارامترها بر این خروجی، از تحلیل واریانس استفاده گردید. ابتدا یک مدل درجه دو، شامل تمامی متغیرهای اصلی و تداخل دوتایی آن‌ها بسط داده‌شد. در ادامه فاکتورهای دارای اثر بی‌معنی حذف و به‌عنوان خطا درنظرگرفته شدند. جدول 4 تا جدول 7 تحلیل واریانس میکروسختی در هر استراتژی فرزکاری را نشان می‌دهد. نتایج، حکایت از معنی‌داری پارامترهای پیشروی و سرعت برشی داشته و فاصله بین مسیرهای ابزار دارای اثر معنی‌داری روی میکروسختی نبود. همچنین سهم تأثیر پارامترها نشان می‌دهد که در حالت‌های مارپیچ و شعاعی، سهم تأثیر پیشروی بیشتر بوده، درحالی‌که در حالت‌های خطوط موازی و آفست سه‌بعدی، سرعت برشی دارای تأثیر بالاتری می‌باشد. این تفاوت در سهم تأثیرگذاری پارامترهای برش، وابسته به نوع مکانیزم افزایش سختی (کار سختی یا حرارت) است که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

جدول 2 پارامترهای ماشین‌کاری و سطوح انتخابی برای آن‌ها

پارامترهای ماشین‌کاری	سطوح پارامترها		
	1	2	3
سرعت برشی (Vc) (m/min)	60	120	180
نرخ پیشروی (fz) (mm/tooth)	0/06	0/12	0/18
فاصله بین مسیرهای ابزار (S) (mm)	0/3	0/7	1/1

جدول 3 آرایه طرح آزمایش استفاده شده به‌همراه نتایج

شماره آزمایش	S	fz	Vc	میکروسختی (H)			
				مارپیچ	موازی	آفست سه‌بعدی	شعاعی
1	0/3	0/06	60	352	347	325	310
2	0/7	0/12	60	371	360	344	327
3	1/1	0/18	60	435	395	369	357
4	0/7	0/06	120	401	388	370	317
5	1/1	0/12	120	420	399	384	334
6	0/3	0/18	120	439	405	393	350
7	1/1	0/06	180	387	389	400	325
8	0/3	0/12	180	435	401	411	357
9	0/7	0/18	180	469	409	405	365

جدول 4 تحلیل واریانس میکروسختی در حالت مارپیچ

عامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
fz	2	6921/6	14/17	0/015	62/2
Vc	2	3228/2	6/61	0/054	29
باقی‌مانده	4	977/1			8/8
کل	8	11126/9			100
R_{sq} =%91/2					

جدول 5 تحلیل واریانس میکروسختی در حالت خطوط موازی

عامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
fz	2	1213/6	6/55	0/055	34/3
Vc	2	1950/9	10/53	0/025	55/2
باقی‌مانده	4	370/4			10/5
کل	8	3534/9			100
R_{sq} =%89/5					

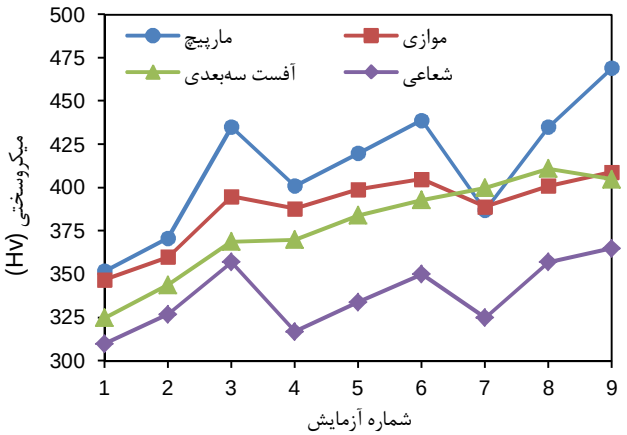
جدول 6 تحلیل واریانس میکروسختی در حالت آفست سه‌بعدی

عامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
fz	2	878/2	4/13	0/106	13/2
Vc	2	5369/6	25/26	0/005	80/5
باقی‌مانده	4	425/1			6/4
کل	8	6672/9			100
R_{sq} =%93/6					

جدول 7 تحلیل واریانس میکروسختی در حالت شعاعی

عامل	درجه آزادی	مجموع مربعات	مقدار F	مقدار P	سهم تأثیر (%)
fz	2	2408	29/13	0/004	77
Vc	2	552/7	6/69	0/053	17/7
باقی‌مانده	4	165/3			5/3
کل	8	3126			100
R_{sq} =%94/7					

شکل 6 دسته‌بندی مقادیر میکروسختی را در تمامی آزمایش‌ها و بر اساس استراتژی‌های مختلف نشان می‌دهد. در تمامی آزمایش‌ها فارغ از شرایط برشی، سختی سطح ماشین‌کاری‌شده بالاتر از سختی اولیه‌ی ماده بود. کمترین مقدار این تغییرات 3% و بیشترین میزان آن 56% گزارش شد. مشاهده می‌شود که روش مارپیچ بیشترین مقدار و روش شعاعی دارای کمترین مقادیر میکروسختی هستند. این شکل همچنین نشان می‌دهد که در آزمایش شماره 7، سه استراتژی ماشینکاری سختی برابری را بوجود می‌آورند که به نوعی بی تأثیر شدن اثر نوع استراتژی را در شرایط ایده آل ماشینکاری (نرخ پیشروی حداقل و سرعت برشی حداکثر) بیان می‌کند.



شکل 6 نتایج میکروسختی بر اساس شماره آزمایش و در استراتژی‌های مختلف

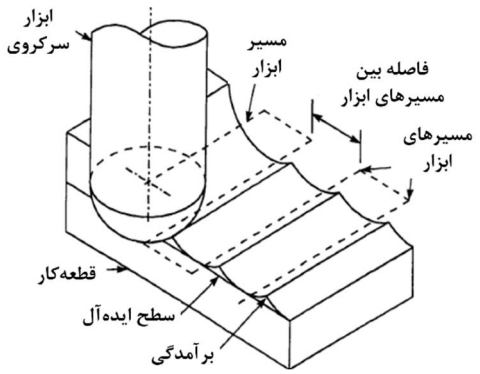
1- PowerMill
2- Down Milling
3- Up Milling

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.26.4]

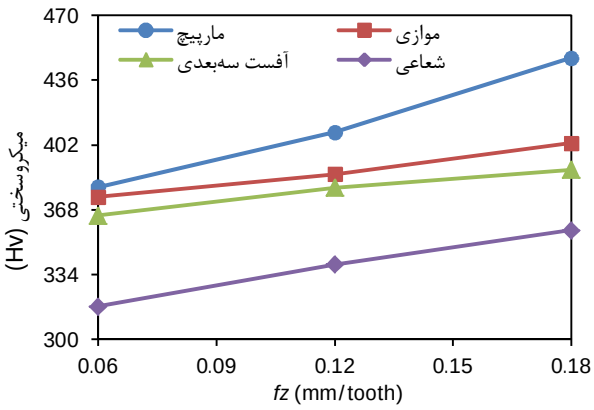
عمدتاً تغییرات سختی سطح پس از عملیات ماشین‌کاری را می‌توان در سه مرحله‌ی مورد بررسی قرار داد. در ابتدا، حرارت موضع، منجر به تغییر فاز می‌شود. سپس به علت تغییر شکل پلاستیک شدید، تبلورمجدد و تغییرشکل و اندازه دانه رخ می‌دهد. در نهایت، در اثر واکنش‌های محیطی سطح با روانکار و هوا، نیتریده‌شدن و یا اکسیداسیون سطحی اتفاق می‌افتد [19]. علاوه بر این، تفاوت در مقادیر میکروسختی را می‌توان با بررسی ماهیت حرکت ابزار در استراتژی‌های مختلف نیز توجیه کرد. یک پارامتر مهم در تمامی استراتژی‌های ماشین‌کاری، برآمدگی سطحی بین مسیرهای ابزار است. مطابق شکل 7، وقتی ابزار سرکروی در مسیرهای مختلف حرکت می‌کند، بین دو مسیر موازی و مجاور هم، ماده اضافی باقی می‌ماند که با نام برآمدگی شناخته می‌شود.

با فرض یکسان بودن پارامترهای برش، میانگین ارتفاع برآمدگی‌های سطحی در استراتژی مارپیچ بیشترین و در استراتژی شعاعی کمترین مقدار را دارا می‌باشد [20]. با افزایش ارتفاع این برآمدگی، تماس ابزار با سطح ماشین‌کاری بیشتر می‌شود که خود باعث زیادشدن نرخ براده‌برداری گردیده و به دنبال آن، نیروهای ماشین‌کاری افزایش می‌یابند.

این بالارفتن نیرو باعث بیشترشدن فشار ابزار روی سطح شده و با افزایش کارسختی حاصل از این فشار، سختی سطح بالاتر می‌رود. در استراتژی آفست سه‌بعدی، برآمدگی دارای اندازه‌ای بین دو استراتژی قبلی بوده و کمی کوچک‌تر از روش خطوط موازی است. در نتیجه نیروی ماشین‌کاری در این حالت کمتر شده و همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، مقادیر میکروسختی آن نیز پایین‌تر از حالت خطوط موازی است. شکل 8 تغییرات میکروسختی برحسب نرخ پیشروی را در استراتژی‌های مختلف فرزکاری نشان می‌دهد.



شکل 7 مسیر حرکت ابزار برای یک ابزار نوک کروی

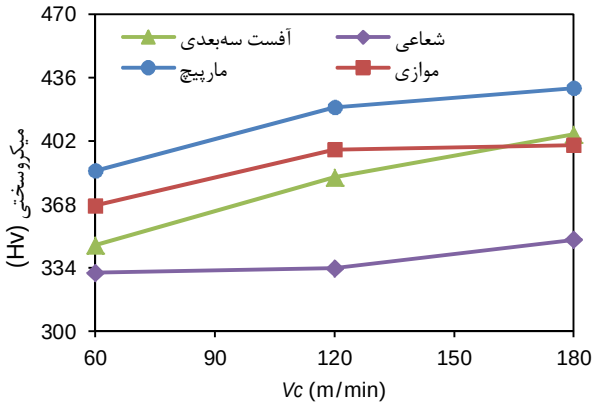


شکل 8 تأثیر نرخ پیشروی بر میکروسختی در استراتژی‌های مختلف

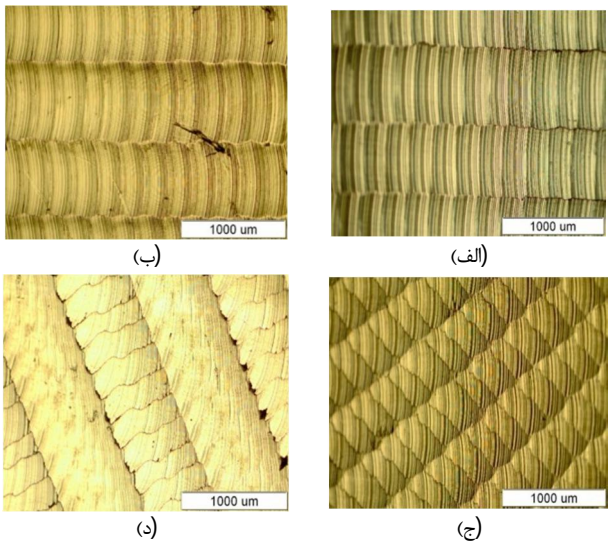
مشاهده می‌شود که با افزایش نرخ پیشروی، سختی سطح افزایش می‌یابد. علت این پدیده را نیز می‌توان در افزایش فشار ابزار برشی روی سطح، به علت افزایش سطح تماس بین ابزار و قطعه‌کار دانست. با افزایش نرخ پیشروی، نیروهای ماشین‌کاری و کرنش پلاستیک افزایش یافته و این امر موجب شدیدتر شدن کارسختی در سطح قطعه‌کار می‌شود. شکل 9 نیز اثر سرعت برشی بر میکروسختی را نشان می‌دهد. می‌توان دید که افزایش سرعت برشی نیز باعث بالارفتن میکروسختی سطح می‌شود. در واقع با افزایش درجه حرارت در موضع برش، نوعی عملیات حرارتی روی سطح ماشین‌کاری صورت می‌گیرد که در پی آن، سختی سطحی و عمق لایه سخت‌شده افزایش می‌یابد [21]. همچنین این دو شکل بیان می‌کنند که دو استراتژی شعاعی و آفست سه بعدی عملکردی نزدیک به هم دارند. این مقوله نیز متناسب با مقادیر برآمدگی‌های باقیمانده سطحی ناشی از این دو استراتژی است.

بمنظور مطالعه بهتر تغییرات سطحی، بافت سطح ماشین‌کاری شده نیز برای یک آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. شکل 10 بافت سطحی را برای استراتژی‌های مختلف ماشین‌کاری در آزمایش شماره 2 نشان می‌دهد.

در این شکل مناطق تاریک، برآمدگی‌ها و مناطق روشن، محل‌های ماشین‌کاری‌شده (دره‌ها) را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در استراتژی شعاعی، بافت سطحی نسبت به سایر استراتژی‌ها یکنواخت‌تر و هموارتر بوده و حتی جهت حرکت ابزار در این روش روی سطح واضح نیست. این درحالی



شکل 9 تأثیر سرعت برشی بر میکروسختی در استراتژی‌های مختلف



شکل 10 مقایسه بافت سطحی استراتژی‌ها در آزمایش دوم الف) خطوط موازی ب) آفست سه‌بعدی ج) مارپیچ د) شعاعی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.26.4]

است که در استراتژی مارپیچ مسیر حرکت ابزار غیریکنواخت بوده و پهنای برآمدگی‌ها در این روش نسبت به سایر روش‌ها بیشتر است. بافت سطحی در استراتژی‌های خطوط موازی و آفست سه‌بعدی نیز تقریباً مشابه هم بوده و حالتی مابین دو حالت قبلی را دارا می‌باشد. تنها محدودیت استراتژی شعاعی را می‌توان در زمان ماشین‌کاری بالای آن نسبت به سه استراتژی دیگر دانست. درحالی‌که زمان ماشین‌کاری در سه استراتژی دیگر در این آزمایش اختلاف چندانی باهم نداشتند.

6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش فرزکاری سطح محدب از جنس فولاد زنگ‌نزن مارتنزیتی 1/4903 با استفاده از چهار استراتژی خطوط موازی، آفست سه‌بعدی، مارپیچ و شعاعی انجام گرفت. به‌کمک روش طراحی آزمایش تاگوچی، اثر پارامترهای اصلی فرآیند شامل نرخ پیشروی، سرعت برشی و فاصله میان مسیرهای ابزار روی میکروسختی سطحی مورد بررسی واقع شد. نتایج بدست آمده از این پژوهش به‌صورت خلاصه در ادامه آمده است:

1- از بین پارامترهای برشی تنها پیشروی و سرعت برشی دارای اثر معنی‌داری روی میکروسختی بودند.

2- سهم تأثیر پارامترها نشان داد که در حالت‌های مارپیچ و شعاعی، سهم پیشروی بیشتر بوده، درحالی‌که در حالت‌های خطوط موازی و آفست سه‌بعدی، سرعت برشی دارای تأثیر بالاتری می‌باشد.

3- استراتژی مارپیچ بیشترین مقدار و استراتژی شعاعی کمترین مقدار میکروسختی را دارند. کمترین مقدار این تغییرات 3% و بیشترین میزان آن نیز 56% گزارش شد.

4- نتایج بافت سطحی نشان از یکنواختی بافت سطحی در استراتژی شعاعی داشت، درحالی‌که در استراتژی مارپیچ، مسیر حرکت ابزار غیریکنواخت بوده و دارای بزرگ‌ترین پهنای برآمدگی بود.

7- مراجع

[1] B. Kim, C. Chu, Effect of cutter mark on surface roughness and scallop height in sculptured surface machining, *Computer-Aided Design,* Vol. 26, No. 3, pp. 179-188, 1994.

[2] G. Vickers, K. Quan, Ball-mills versus end-mills for curved surface machining, *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* Vol. 111, No. 1, pp. 22-26, 1989.

[3] C. Toh, Cutter path orientations when high-speed finish milling inclined hardened steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 27, No. 5-6, pp. 473-480, 2006.

[4] A. Warkentin, F. Ismail, S. Bedi, Intersection approach to multi-point machining of sculptured surfaces, *Computer Aided Geometric Design,* Vol. 15, No. 6, pp. 567-584, 1998.

[5] A. M. Abrão, J. L. S. Ribeiro, J. P. Davim, *Surface integrity,* in: *Machining of Hard Materials,* Eds., pp. 115-141: Springer, 2011.

[6] S. Akcan, W. S. Shah, S. Moylan, S. Chandrasekar, P. Chhabra, H. Yang, Formation of white layers in steels by machining and their characteristics, *Metallurgical and Materials Transactions A,* Vol. 33, No. 4, pp. 1245-1254, 2002.

[7] A. Barbacki, M. Kawalec, A. Hamrol, Turning and grinding as a source of microstructural changes in the surface layer of hardened steel, *Journal of materials processing technology,* Vol. 133, No. 1, pp. 21-25, 2003.

[8] X. Liu, D. Wen, Z. J. Li, L. Xiao, F. Yan, Experimental study on hard turning hardened GCr15 steel with PCBN tool, *Journal of Materials processing technology,* Vol. 129, No. 1, pp. 217-221, 2002.

[9] A. Ramos, C. Relvas, J. Simoes, The influence of finishing milling strategies on texture, roughness and dimensional deviations on the machining of complex surfaces, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 136, No. 1, pp. 209-216, 2003.

[10] C. Toh, A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 152, No. 3, pp. 346-356, 2004.

[11] C. Toh, Cutter path strategies in high speed rough milling of hardened steel, *Materials & design,* Vol. 27, No. 2, pp. 107-114, 2006.

[12] C. Gologlu, N. Sakarya, The effects of cutter path strategies on surface roughness of pocket milling of 1.2738 steel based on Taguchi method, *Journal of materials processing technology,* Vol. 206, No. 1, pp. 7-15, 2008.

[13] A. Krimpenis, A. Fousekis, G. Vosniakos, Assessment of sculptured surface milling strategies using design of experiments, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 25, No. 5-6, pp. 444-453, 2005.

[14] A. Mostafapour, M. Abolghasemi, Investigation the effect of milling strategies on milling of curved surfaces, *2nd international conference of prouction and manufacturing eng.,* Tehran, Iran, 2007. (In Persian)

[15] S. Shajari, M. H. Sadeghi, H. Hassanpour, The Influence of Tool Path Strategies on Cutting Force and Surface Texture during Ball End Milling of Low Curvature Convex Surfaces, *The Scientific World Journal,* Vol. 2014, 2014.

[16] C. Fry, T. Fry, S. Raman, Experimental verification of tool wear effects in alternate path traversal in milling, in *Proceeding of the ASME Energy Sources Technology Conference,* Houston, TX, USA. 1999.

[17] S. Marshall, J. G. Griffiths, A new cutter-path topology for milling machines, *Computer-Aided Design,* Vol. 26, No. 3, pp. 204-214, 1994.

[18] *Solidcam Software manual*: India Pvt Ltd 2009.

[19] C. Duan, W. Kong, Q. Hao, F. Zhou, Modeling of white layer thickness in high speed machining of hardened steel based on phase transformation mechanism, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 69, No. 1-4, pp. 59-70, 2013.

[20] S. Shajari, M. Sadeghi, H. Hassanpour, B. Jabbaripour, Influence of machining strategies on Surface roughness in ball end milling of inclined surfaces, *Advanced Materials Research,* Vol. 488, pp. 836-840, 2012.

[21] Y. K. Chou, C. J. Evans, White layers and thermal modeling of hard turned surfaces, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 39, No. 12, pp. 1863-1881, 1999.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.2.26.4]