

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 54(2) (2022) 97-100 DOI: 10.22060/mej.2021.20145.7186

Optimization of Carbon Fiber Reinforced Composite Grinding Process by Response Surface Method

S. M. Mousavi¹, A. Sazgar^{2*}, V. Fallahpour¹

¹Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran

²Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran

ABSTRACT: Today, the usage of composite materials in various industries such as aerospace, transportation, construction, etc. has increased. Therefore, an adequate understanding of the production processes and assembly of these materials is inevitable. Machining is one of the common processes in assembling composite parts. This process includes two categories of traditional and non-traditional machining processes and grinding is one of the traditional methods. Grinding is one of the applicable machining processes for the finishing of composite parts. Many parameters such as feed rate, depth of cut, tool geometry, fiber direction, and abrasive particles material and size are effective on the machined surface. In this study, the effect of grinding parameters including feed rate, depth of cut, abrasive particles size, and fiber orientation on the surface quality of Carbon Fiber Reinforced Polymer has been evaluated. The experiments were designed by Response Surface Method in Minitab software V.19. The results showed that abrasive particles' size and depth of cut are the most effective parameters on the machined surface roughness. The feed rate and fiber direction are of secondary importance, respectively. Also, the scanning electron microscopy images confirm these results. Finally, it was suggested to use 50µm of the depth of cut, 200mm/min of feed rate, perpendicular to fiber direction and course abrasive particle to achieve a roughness of less than 5µm.

1-Introduction

Machining of Carbon Fiber Reinforced Composites (CFRPs) is a complex process due to the heterogeneity of the composite material and the abrasiveness of the reinforcement. Therefore, it's important to understand the effect of process parameters. In the grinding process, many parameters such as feed rate, depth of cut, tool material, abrasive particle size, workpiece material, and fiber orientation affect the machined surface quality. Mousavi et al. [1] investigated the effect of parameters affecting the machined surface roughness in CFRP shafts and concluded that the depth of cut and the size of the abrasive particles are the most important parameters affecting the grinding of CFRP shafts. Park and Nakagawa [2] studied the grinding of CFRP with a diamond tool. They concluded that the smoothest machined surface is obtained in 90° of the fiber orientation. Hu and Zhang [3] investigated the grindability of unidirectional CFRPs. They studied the effect of fiber orientation and grinding parameters such as depth of cut, feed rate, and grinding wheel speed. In this research, comprehensive studies have been performed on a unidirectional CFRP. The experiments were designed by the response surface method. The effect of machining parameters including depth of cut, feed rate, fiber orientation, and

Review History:

Received: Jun. 13, 2021 Revised: Jul. 31, 2021 Accepted: Aug. 25, 2021 Available Online: Sep. 07, 2021

Keywords:

Carbon fiber reinforced composite Grinding Surface roughness Depth of cut Feed rate

abrasion particle size on machined surface roughness was investigated.

2- Materials and Methods

In this study, the effect of parameters: the depth of cut (0.5-0.5 mm), feed rate (10-200 mm/min), the angle between fiber orientation and cutting direction (0-90 degrees), and abrasive particle grain size (coarse and fine grain) on the grinding of a unidirectional flat CFRP was investigated. The composite part consisted of 12K carbon fiber and A-bisphenol epoxy thermoset resin. The workpiece was produced by filament winding process. In all experiments, coolant fluid was used due to toxic fumes from burning the polymeric matrix and machining dust. The tools were white aluminum oxide with two coarse and fine grains. Surface roughness was measured and recorded 3 times for each sample in the direction perpendicular to the fibers' orientation. The average measured roughness is also recorded as the final roughness of each sample.

3- Results and Discussion

As mentioned, the surface roughness of each sample was measured at least 3 times and its average roughness

*Corresponding author's email: Asazgar@aeoi.org.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.



Fig. 1. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm



Fig. 2. The surface plot of the effect of depth of cut and of fiber orientation. Test conditions: feed rate 105 mm/ min, fine grind wheel.

was recorded. The machined surface roughness results at the central point indicate that the experimental data are repeatable. Table 1 presents the conditions of tests with their average roughness. According to the obtained surface roughness data, the following results have been obtained. Fig. 1 shows the main effect of the parameters and the trend of surface roughness changes with them.

According to Fig. 1, the steepness of each curve indicates the importance of the parameter. Therefore, the abrasive particles' size is the most effective parameter on machined surface roughness, followed by the depth of cut, feed rate, and fiber orientation, which are the most important parameters affecting surface roughness, respectively. Fig. 2 shows the



Fig. 3. The surface plot effect of depth of cut and feed rate. Test conditions: 45° fiber direction, fine grind wheel.

simultaneous effect of fiber orientation and depth of cut.

In Fig. 2, as the depth of cut increases, the surface roughness increases. In this way, with increasing depth of cut, the engagement of the tool with the workpiece will increase, and eventually, the frictional forces will rise. Increasing the frictional force also increases the cutting heat, which can lead to thermal damage. Also, the slight effect of fiber orientation is ignored [3]. Fig. 3 shows the simultaneous effect of depth of cut and feed rate on machined surface roughness.

As shown in Fig. 3, the feed rate has an inverse effect on surface roughness. Due to the high rotation speed of the grinding wheel, the linear speed of the abrasive particles passing through the surface is very high. At low feed rates, a particle passes through certain regions several times, which is much higher than high feed rates. This will increase the temperature of the cutting zone, which will lead to heat damage. Fig. 4 also shows the optimal values of parameters in order to achieve the minimum machined surface roughness.

According to Fig. 4, by selecting the proposed values, the minimum surface roughness of 0.3 μ m can be achieved. Of course, it should be noted that the desirability factor in these conditions is equal to 1, which indicates that it can be easily achieved a smooth and uniform surface. In order to confirm the quantitative results presented in this report, Fig. 5 is machined surface Scanning Electron Microscope (SEM) pictures that have the lowest surface roughness.

As shown in Fig. 5, by selecting the coarse grind wheel, the minimum depth of cut can be achieved to the desired machined surface roughness.

4- Conclusions

In this study, the effect of depth of cut, feed rate, abrasive particle size, and cutting direction on surface roughness



Fig. 1. Phase velocity dispersion curves for a steel pipe with outer diameter of 220 mm and wall thickness of 4.8 mm



Fig. 3. The surface plot effect of depth of cut and feed rate. Test conditions: 45° fiber direction, fine grind wheel.

in the grinding process of unidirectional CFRP has been investigated. The following results can be inferred:

- Abrasive particle grain size, depth of cut, feed rate were the most influential parameters on surface roughness, respectively.

- Due to the adhesion of the polymer matrix, the coarse grind wheel has given better results than the fine grind wheel due to the better repulsion of the chips and flow of coolant fluid.

- By increasing the depth of cut due to the increase in

the engagement of the grinding wheel and the workpiece, the machining forces and especially the friction increase. As a result, the heat of the cutting area rises. Rising temperatures will also cause thermal damage.

- Increasing the feed rate despite the depth of cut will reduce the surface roughness. Due to the high speed of rotation of the grinding wheel, at a low feed rate, each particle passes through a cutting zone several times and increases the temperature of that region, which will cause thermal damage.

- By selecting rougher grain, minimum depth of cut, higher feed rate, and 90° between the fibers direction and the cutting direction, as well as the use of coolant with a surface roughness of less than 1 micrometer was achieved in the grinding process of unidirectional CFRPs.

References

- S.M. Mousavi, A. Sazgar, M.H. Beheshti, Investigation of the Effect of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness in Grinding of Carbon-Epoxy Composites, in: 28th annual international conference of Iranian of mechanical engineers (ISME), Amirkabir university of technology, Tehran, I.R. of Iran, 2020, (in persian).
- [2] K.Y. Park, T. Nakagawa, Mirror surface grinding characteristics and mechanism of carbon fiber reinforced plastics, Journal of materials processing technology, 52(2-4) (1995) 386-398.
- [3] N. Hu, L. Zhang, Grindability of unidirectional carbon fibre reinforced plastics, in: Proceedings of the 13th International Conference on Composite Materials, Beijing, 2001.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

S. M. Mousavi, A. Sazgar, V. Fallahpour, Optimization of Carbon Fiber Reinforced Composite Grinding Process by Response Surface Method, Amirkabir J. Mech Eng., 54(2) (2022) 97-100.

DOI: 10.22060/mej.2021.20145.7186



This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۲، سال ۱۴۰۱، صفحات ۴۸۱ تا ۴۹۰ DOI: 10.22060/mej.2021.20145.7186

بهینهسازی فرآیند سنگزنی کامپوزیت تک جهته تقویت شده با الیاف کربن به روش سطح پاسخ

سيدمحمود موسوى'، امجد سازگار "*، وحيد فلاح پور'

۱- سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

۲- پژوهشکده چرخه سوخت هستهای، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، تهران، ایران

خلاصه: امروزه استفاده از مواد کامپوزیتی در صنایع مختلفی همچون هوافضا، حمل و نقل، ساختمان و ... رو به افزایش است. بنابراین درک صحیح از فرایندهای تولید و مونتاژ قطعات تولیدشده با این مواد امری اجتناب ناپذیر است. یکی از فرآیندهای مهم و پرکاربرد در مونتاژ قطعات کامپوزیتی، ماشینکاری است. این فرآیند شامل دو دسته فرآیندهای سنتی و نوین ماشینکاری بوده که سنگزنی از رایج ترین روش های سنتی میباشد. پارامترهای ماشینکاری محت پرشی، در مونتاژ قطعات کامپوزیتی، ماشینکاری است. این فرآیند شامل دو دسته فرآیندهای سنتی و نوین ماشینکاری بوده که سنگزنی از رایج ترین روش های سنتی میباشد. پارامترهای ماشینکاری معق برشی، از رایج ترین روش های سنتی میباشد. پارامترهای ماشینکاری مختلفی همچون سرعت چرخش سنگ، سرعت پیشروی، عمق برشی، رایج ترین روش های است. در این مطالعه تأثیر پارامترهای مشخصات قطعه کار، اندازه و جنس ذرات ساینده و هندسه سنگ بر کیفیت ماشینکاری تاثیر گذار است. در این مطالعه تأثیر پارامترهای مندی سنگزنی از منگزنی شامل نرخ پیشروی، عمق برشی، رایس مورد منخونی شامل نرخ پیشروی، عمق برشی، رایس مورد منتی میباشد. پارامترهای کربن اپوکسی بودهاند. آزمایشات با نرم افزار مینی تب نسخه ۹ و به روش سطح پاسخ طرح ریزی شامل نرخ پیشروی، عمق برشی، راستای الیاف و اندازه ذرات ساینده بر زبری سطح کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن مورد مراحی یورای قرار گرفته است. این مامل نرخ پیشروی و می مورد مامل میزین شامل نرخ پیشروی، عمق برشی، راستای الیاف و اندازه ذرات و عمق برش مؤثر ترین پارامترها بر زبری سطح میباشند. پساز آن نرخ پیشروی و نر مامل رای این دادند که اندازه ذرات و عمق برش ۵۰ میکرونی روبشی نیز تأیید کننده نتایج میباشند. در پایان پیشنهاد مار راستای الیاف در مراتب بعدی اهمیت قرار دارند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز تأیید کننده نتایج میباشند. در پایان پیشنهاد مار در مورش می زیری و مین می می میباند. در پایان پیشنهاد مار مرد راتای میوزیت از ساز ۵۰ میکرومتر دست یا موره می در مراتب میلی می و ماند می در مراتب بعدی اهمیت قرار دارند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی نیز تأیید کنده نتایج میباشند. در پایان پیشنهاد مار میری و ۲۰۰ میلیمتر بر دقیقه و عمود بر الیان مار می مور بر مام می و می مار و مران و مران مین و مرا مار و مر مار مولی و مرای مار می و مان و می مار می مولی م

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۴۰۰/۰۳/۲۲ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۰۹ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۱۳ ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶

کلمات کلیدی: کامپوزیت تقویتشده الیاف کربن سنگزنی زبری سطح عمق برشی نرخ پیشروی

۱ – مقدمه

ماشینکاری کامپوزیتهای پلیمری تقویتشده با الیاف کربن ٔ بهدلیل ویژگی ناهمگنی کامپوزیت و سایندگی فاز تقویت کننده آن، فرآیندی پیچیده است. طی ماشینکاری، سایش سریع ابزار اتفاق افتاده که سبب ایجاد برشی ناقص و ایجاد سطحی معیوب و زبر میشود. بنابراین درک درست تأثیر پارامترهای مختلف بهمنظور انجام صحیح فرآیند امری مهم است. در فرآیند سنگزنی پارامترهای بسیاری ازجمله نرخ پیشروی^۲، عمق برشی^۳، جنس ابزار، اندازه ذرات ساینده^۴ سنگ، جنس قطعه و راستای الیاف^۵ بر کیفیت سطح مؤثرند. همچنین یکی از مهمترین توابع ارزیابی سطوح ماشینکاریشده اندازه گیری زبری سطح و مشاهدات میکروسکوپی میباشند. پژوهشهای کمی در زمینه فرآیند سنگزنی و برشکاری کامپوزیتها با ابزار ساینده

- 1 ¹ Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRPs)
- ² Feed Rate (mm/min)
- ³ Depth of Cut (mm)
- ⁴ Grit Size
- 5 ⁵ Fiber Direction (degree)

* نویسنده عهدهدار مکاتبات: Asazgar@aeoi.org.ir

انجامشده است.

سازگار² و همکارانش در تحقیقی به بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر زبری سطح در لولههای کامپوزیتی تقویتشده با الیاف کربن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که عمق برش و اندازه ذرات ساینده مهم ترین پارامترهای مؤثر بر سنگزنی لولههای کامپوزیتی تقویتشده با الیاف کربن میباشند [۱]. پارک^۷ و ناکاگاوا [۲] سنگزنی کامپوزیت کربن–اپوکسی را بهوسیله سنگ الماس مورد بررسی و مطالعه قرار داده و مکانیسمهای مختلف سنگزنی را برای آن پیشنهاد نمودند و در پایان به این نتیجه رسیدند که بهترین صافی سطح در راستای ۹۰ درجه بهدست میآید. یوان^۸ و همکاران [۳] به مطالعه سنگزنی کامپوزیت کربن–اپوکسی توسط سنگ بروم نیترید مکعبی^۴ با طرحی جدید پرداخته و تأثیر سرعت سنگ را بر نیروهای سنگزنی و نیز زبری سطح موردبررسی قرار دادند. هو و ژانگ^{۱۰} [۴] قابلیت سنگزنی

- 7 ⁷ Park
- 8 ⁸ Yuan
- ⁹ ⁹ Cubic Boron Nitrite
- 10 ¹⁰ Zhang



^{6 &}lt;sup>6</sup> Sazgar

پلاستیکهای تقویتشده با الیاف کربن تک جهته را با تحقیق در مورد تأثیر راستای الیاف و پارامترهای سنگزنی از قبیل عمق برش، نرخ پیشروی و سرعت سنگ با اندازه گیری نیروی سنگزنی و کیفیت سطح انجام دادند. آنها دریافتند که زبری سطح و نیروی سنگزنی بهطور مستقیم به عمق برش وابسته است. هوچنگ [۵] نیز در کتاب خود با عنوان «تکنولوژی ماشینکاری مواد کامپوزیتی» به بررسی روشهای مختلف ماشینکاری کامپوزیتها، سایش ابزار، کیفیت سطح، خنک کنندههای مختلف و قابلیت ماشینکاری زمینههای مختلف پرداخته است. ساساهارا^۲ و همکاران [۶] بهمنظور دستیابی به نتایج بهینه در سنگزنی کامپوزیتهای تقویتشده با الیاف کربن، استفاده از خنککننده را در اطراف سنگ پیشنهاد نمود. در این کار پژوهشی سنگ اکسید آلومینیوم برای سنگزنی تخت مورداستفاده قرار گرفت. سه سیستم خنککاری شامل: سنگزنی خشک، سنگزنی با نازل بیرونی و سنگزنی با سیال داخلی اطراف سنگ تحت بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که بارگذاریها بر روی ماتریس موجود در سنگ با سیستم خنککاری داخلی بهشدت کاهش پیدا میکند. ذرات در این حالت قادرند تا الیاف را بهطور کامل بدون هیچگونه لایه لایه شدگی و ریش ریش شدن، ببُرند. بنابراین، زبری سطح ماشینکاریشده تا حدود زیادی کاهش پیدا نمود. خنک کننده نیز قادر است تا دمای سنگزنی را تا حدود زیادی کاهش داده و زیر دمای شیشهای شدن زمینه اپوکسی نگه دارد. همچنین برادهها بهطور مناسبی از منطقه برشی دفع شدند. ژاوو^۳ و همکاران [۷] دمای سنگزنی كامپوزيت تقويتشده با الياف را با روش تفاضل محدود سهبعدى موردبررسى قراردادند. تأثیر راستای الیاف بر توزیع حرارت سنگزنی در مقادیر مختلف پیشروی قطعه کار به صورت عددی شبیه سازی و تحلیل شد. مشخص شده است که تأثیر جهت الیاف در پیشروی کم قابل توجه بوده و در پیشرویهای بالاتر کمی ناشناخته است. در سنگزنی خشک دمای سنگزنی به ۲۳۰ درجه سانتی گراد می رسد که می تواند به شدت به قطعه آسیب وارد کند. ژاوو و همکاران [۸] به ارزیابی مورفولوژی سطح در سنگزنی کامپوزیت تقویتشده با الیاف کربن در حضور نانو سیال به عنوان روان کننده پرداختند. وانگ و همکاران [۹] سنگزنی سطح کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن را با کمک التراسونيک انجام داده و تأثير ابزار را بر روی آن مورد ارزيابی قراردادند. آنها اثر متغیرهای ابزار همچون اندازه ذرات، غلظت ذرات، تعداد شکافها

و هندسه انتهای ابزار را بر زبری سطح موردبررسی قرار داده و نتیجه گرفتند که با انتخاب ابزاری با اندازه ذرات مناسب، غلظت ذرات کمتر و لبه محدبتر زبری سطح کمتری حاصل خواهد شد.

مطالعات متعددی بر روی ماشینکاری کامپوزیتهای تقویتشده با الیاف شیشه انجامشده است. اما در این کار پژوهشی سعی بر آن شده است تا این بررسیها به صورت جامع تری بر روی قطعه کامپوزیتی تک جهته تقویتشده با الیاف کربن و زمینه اپوکسی صورت پذیرد. بههمین منظور در ابتدا آزمایشها با نرمافزار مینی تب نسخه ۱۹ طرح ریزی شدند. طرح سطح پاسخ^ه به روش باکس–بنکن² بهدلیل بررسی کامل تأثیر پارامترها و برهمکنش آنها مورداستفاده قرار گرفته است. بررسی سطح ماشینکاری شده از مهم ترین پارامترهای ارزیابی قابلیت ماشینکاری قطعات کامپوزیتی تقویتشده با الیاف پارامترهای ارزیابی قابلیت ماشینکاری قطعات کامپوزیتی تقویتشده با الیاف زیری سطح پرداخته و علاوه بر بررسی پارامترها به کمک طراحی آزمایش، نمامل عمق برشی، نرخ پیشروی، راستای الیاف و دانهبندی ذرات ساینده بر زبری سطح پرداخته و علاوه بر بررسی پارامترها به کمک طراحی آزمایش، بهمنظور تأیید نتایج بهدست آمده، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۷ نیز ارائه شده است. در پایان نیز مقادیر بهینه هر پارامتر برای دستیابی به حداقل میزان زبری سطح ارائه شدهاند.

۲- مواد و روشها

در این مقاله تأثیر پارامترهای عمق برش (در بازه ۵/۰– ۵/۰ میلی متر)، نرخ پیشروی (در بازه ۱۰–۲۰۰ میلی متر بر دقیقه)، زاویه راستای برش و الیاف (در بازه ۹۰–۰ درجه) و دانهبندی ذرات ساینده (به صورت دانهبندی زبر و نرم) بر سنگزنی قطعه تخت کامپوزیتی تکجهته کربن– اپوکسی موردبررسی قرار گرفت. قطعه کامپوزیتی متشکل از الیاف کربن ۱۲۰۰۰ و رزین اپوکسی گرماسخت بیسفنول–آ بوده است. قطعه کار به روش رشته پیچی^۸ تولید شد. به دلیل دود سمی ناشی از سوختن زمینه پلیمری و گردوغبار حاصل از ماشینکاری، در تمامی آزمایشها از سیال خنک کننده استفاده شده است. ابزار ماشینکاری سنگ اکسید آلومینیوم سفید با دو دانهبندی زبر و نرم بوده است که در دستگاه چهار محور به کاربرده شد. هر آزمون با یک مسیر رفت سنگ بر روی قطعه انجام شد. بنابر مطالعات و نیز اندازه گیری های تجربی قبل، تغییرات در جهت عمود بر الیاف بسیار ملموس تر بوده و به نظر می رسد

^{5 &}lt;sup>2</sup> Response Surface Method (RSM)

^{6 &}lt;sup>3</sup> Box-Benhken

^{7 &}lt;sup>4</sup> Scanning Electron Microscopy (SEM)

^{8 5} Filament winding

^{1 &}lt;sup>11</sup> Hocheng

^{2 &}lt;sup>12</sup> Sasahara

^{3 &}lt;sup>13</sup> Gao

^{4 &}lt;sup>1</sup> Wang

که احتمال خطای کمتری وجود دارد. همچنین بنابر تجارب موجود، احتمال قرارگیری پراب زبریسنج در شیارهای ناشی از کندهشدن الیاف وجود دارد که میتواند اطلاعات غلط در خصوص وضعیت سطح ماشینکاری شده در اختیار قرار دهد. درنهایت زبری سطح برای هر نمونه ۳ بار در جهت عمود بر الیاف اندازهگیری و ثبت گردید. میانگین زبریهای اندازهگیری شده نیز بهعنوان زبری نهایی هر نمونه ثبتشده است.

طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ:

در بسیاری از کارهای پژوهشی روش سطح پاسخ بهمنظور بهبود فرآیند و توصیف پارامترهای خروجی (پاسخها) با توجه به متغیرهای ورودی استفادهشده است [۱۳–۱۰]. این روش ترکیبی از روشهای آماری و ریاضی بوده که برای مدلسازی مسائل مربوط به فرآیندهای مختلف مناسب است. در این روش، توابع هدف اصلی که تحت تأثیر پارامترهای ورودی فرآیند میباشند، بهینه خواهند شد. این روش طراحی روابط میان سطح پاسخ بهدستآمده و پارامترهای ورودی قابل کنترل، کمیسازی خواهند شد. همچنین، امکان برآورد برهمکنشها را نیز امکانپذیر میسازی خواهند شد. طراحی به دو روش طرح باکس– بنکن و طرح مرکب مرکزی انجام خواهد شد. در این کار پژوهشی به دلیل استفاده از روش باکس– بنکن توصیفی مختصر از آن ارائه خواهد شد. روش باکس– بنکن طرح عاملی سه سطحی و ناکامل است. این طرح برای حل مشکل تعداد زیاد آزمایشها در مواقعی که تعداد فاکتورها زیاد باشد، مناسب است. شکل ۱ طراحی باکس– بنکن

با توجه به شکل ۱ این طرح هیچ نقطهای از رئوس مکعب را که توسط سطوح بالا و پایین هر متغیر ایجادشده است را شامل نمی شود. این موضوع بهویژه در شرایط که رئوس مکعب دارای شرایط فرآیندی محدود، غیرقابل دستیابی و یا گران قیمت باشند، بسیار مفید است [۱۴ و ۱۵].

۳- نتایج و بحث

پس از طراحی آزمایش و انجام هر تست زبری سطح هر نمونه حداقل ۳ مرتبه اندازه گیری شده و زبری متوسط آن ثبت شده است. لازم به ذکر است که آزمایش ها در نقاط مرکزی برای هر دانه بندی نرم و زبر سه بار تکرار شدهاند. نتایج زبری در این نقاط بیانگر تکرارپذیر بودن آزمایش ها می با شند. در جدول ۱ شرایط هر آزمون به همراه اطلاعات زبری متوسط مربوط به آن ارائه شده است.



Fig. 1. Box-Benhken three-factor design

بر اساس اطلاعات بهدست آمده از دادههای زبری سطح، نتایج ذیل حاصل شده است. شکل ۲ منحنیهای تأثیرات اصلی هر پارامتر را بر زبری سطح و روند تغییرات آن نشان می دهد.

بر اساس شکل ۲، شیب هر منحنی نمایانگر اهمیت پارامتر مربوطه است. به این صورت که هرچه شیب منحنی بیشتر باشد، پارامتر مربوط به آن از اهمیت بالاتری برخوردار است. همچنین شیب مثبت و یا منفی منحنی نیز بیان کننده روند تغییرات تابع هدف با متغیر بهصورت مستقیم و یا معکوس است. بر این اساس، دانهبندی ذرات ساینده مؤثرترین پارامتر بر زبری سطح است و پسازآن عمق برشی، نرخ پیشروی و راستای الیاف به ترتیب مهمترین پارامترهای تأثیرگذار بر زبری سطح میباشند. نمودار پارتو نیز میزان تأثیرگذاری هر پارامتر و اهمیت آن را نسبت به دیگر پارامترها در شکل ۳ نشان میدهد.

با توجه به شکل ۳ اندازه ذرات ساینده، عمق برش و نرخ برشی بهترتیب از مهمترین پارامترهای اصلی مؤثر بر زبری سطح میباشند. همچنین میتوان از اثر راستای الیاف نیز چشمپوشی نمود. تأثیر متقابل عمق برش– اندازه ذرات، راستا–اندازه ذرات و نرخ پیشروی–عمق برش نیز بر زبری سطح اثر دارند. بهمنظور بررسی بیشتر، نمودارهای تأثیرات همزمان مربوط به پارامترهای مختلف در بخشهای بعدی ارائهشده است. شکل ۳ تأثیر همزمان راستای الیاف و عمق برش را نشان میدهد.

جدول ۱. شرایط هر آزمون و زبری متوسط مربوط به آن

Table 1. Conditions of each test and its average roughness

زبری سطح متوسط (میکرومتر)	دانه بندی	نرخ پیشروی (میلیمتر بر دقیقه)	عمق برش	زاويه راستاي الياف	شماره أزمون
	ذرات		(ميليمتر)	(درجه)	
1/97	نرم	۱.	۰/۲۷۵	•	١
١/٨٧۵	نرم	١.	•/YV۵	٩٠	٢
۱/۲۵	نرم	۲۰۰	۰/۲۷۵	•	٣
۱/۱	نرم	۲۰۰	۰/۲۷۵	٩٠	۴
١/٩٠	نرم	۱۰۵	•/•&•	•	۵
١/٢٩	نرم	۱۰۵	• / • ۵ •	٩٠	۶
١/٧٩	نرم	۱۰۵	•/۵	•	۷
۲/۱۳۵	نرم	۱۰۵	• /۵	٩٠	٨
١/۶۶۵	نرم	۱.	•/•&•	۴۵	٩
۱/۴۰	نرم	۲۰۰	•/•&•	۴۵	۱.
١/٧۴	نرم	۱.	• /۵	۴۵	11
١/٩٩۵	نرم	۲۰۰	• /۵	۴۵	١٢
١/١۶١	نرم	۱۰۵	۰/۲۷۵	۴۵	١٣
۱/۴۶	نرم	۱۰۵	•/YV۵	۴۵	14
1/892	نرم	۱۰۵	۰/۲۷۵	۴۵	۱۵
١/١٩۵	زبر	۱.	۰/۲۷۵	•	18
•/97	زبر	۱.	۰/۲۷۵	٩٠	١٧
۱/•۳۵	زبر	۲۰۰	۰/۲۷۵	•	۱۸
1/94	زبر	۲۰۰	۰/۲۷۵	٩٠	١٩
١/•٧	زبر	۱۰۵	•/•&•	•	۲.
• /YY	زبر	۱۰۵	•/•&•	٩٠	٢١
١/•٧	زبر	۱۰۵	• /۵	•	22
• /٧٢	زبر	۱۰۵	• /۵	٩٠	۲۳
۱/۰۱	زبر	۱.	•/•&•	40	74
۰/٨٠	زبر	۲۰۰	•/•&•	40	۲۵
•/97	زبر	١.	• /۵	۴۵	78
۱/• ۱۵	زبر	۲۰۰	• /۵	۴۵	۲۷
•/944	زبر	۱.۵	۰/۲۷۵	۴۵	۲۸
• /9٣٣	زبر	۱.۵	۰/۲۷۵	۴۵	۲۹
۰/۹۵۱	زبر	١٠۵	۰/۲۷۵	۴۵	٣٠



Fig. 2. The main effects of the parameters on the surface roughness



شکل ۳. نمودار پارتو و تأثیر گذاری پارامترهای مختلف بر زبری سطح

Fig. 3. Pareto diagram and the effect of parameters on surface roughness



شکل ۴. نمودار تأثیر همزمان عمق برش و راستای الیاف. شرایط آزمون: نرخ پیشروی ۱۰۵ میلیمتربردقیقه، سنگ نرم.

Fig. 4. The surface plot of effect of depth of cut and fiber orientation. Test conditions: feed rate of 105 mm/min, fine grind wheel.



شکل ۵. طرحوارهای از رابطه عمق برش و طول سطح تماس ابزار با قطعه کار.

Fig. 5. Schematic of the relationship between depth of cut and engagement of tool and workpiece.

بر اساس شکل ۴ افزایش عمق برش باعث افزایش زبری سطح شده است. با افزایش عمق برشی، سطح درگیری سنگ با قطعه افزایشیافته و درنهایت نیروهای اصطکاکی افزایش خواهند یافت (شکل ۵). افزایش نیروی اصطکاک نیز باعث افزایش حرارت میشود که احتمال ایجاد آسیب دمایی را در پی خواهد داشت. همچنین میتوان از تأثیر ناچیز راستای برشکاری نیز چشمپوشی نمود [۴].

شکل ۶ تأثیر همزمان عمق برش و نرخ پیشروی را بر زبری سطح نشان میدهد.

همان طور که از شکل ۶ مشاهده می شود، نرخ پیشروی بر خلاف عمق برش تأثیر معکوس بر زبری سطح دارد. به دلیل سرعت بالای چرخش سنگ در فرآیند سنگزنی، سرعت خطی عبور ذرات ساینده از سطح بسیار زیاد است. در نرخ پیشروی کم، دفعات عبور یک ذره از منطقه ای خاص بسیار بیشتر از



شکل ۶. نمودار تأثیر همزمان عمق برش و نرخ پیشروی. شرایط آزمون: راستای الیاف ۴۵ درجه، سنگ نرم.





شکل ۷. نمودار اثر متقابل پارامترها بر زبری سطح



بر اساس شکل ۷، برای دستیابی به حداقل زبری سطح بایستی

نرخ پیشروی بالا است. این امر موجب افزایش دمای منطقه برشی خواهد پارامترها را بر زبری سطح نشان میدهد. شد که آسیبهای دمایی را در پی خواهد داشت. شکل ۷ نمودار اثرات متقابل

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۴، شماره ۲، سال ۱۴۰۱، صفحه ۴۸۱ تا ۴۹۰



شکل ۸. بهینهسازی پارامترها برای دستیابی به حداقل میزان زبری سطح



Fig. 8. Optimization of parameters to achieve the minimum surface roughness

شکل ۹. تصویر SEM از سطح نمونه شماره ۲۱، شرایط ماشینکاری: عمق برش ۰۵/۰۵ میلیمتر، نرخ پیشروی ۱۰۵ میلیمتر بر دقیقه، راستای برش ۹۰ درجه و سنگ با دانهبندی زبر.

Fig. 9. SEM picture of machined surface with minimum surface roughness, machining conditions: depth of cut 0.05 mm, feed rate 105 mm/min, cutting direction 90° and coarse grain size.

موضوع میباشد که میتوان بهراحتی با تنظیم پارامترهای مختلف در مقادیر معرفی شده، به سطحی بسیار یکدست و صاف دستیافت. به منظور تائید نتایج کمی ارائه شده در این گزارش، شکلهای ۹ و ۱۰ تصاویر سطح ماشینکاری شده در نمونه های ۲۱ و ۸ میباشند که به ترتیب دارای کمترین و بیشترین زبری سطح میباشند. ماشینکاری را در نرخهای برشی بالا، عمق برش کم و در راستای الیاف انجام داد. همچنین شکل ۸ مقادیر بهینه هر پارامتر را بهمنظور دستیابی به حداقل میزان زبری سطح نشان میدهد.

با توجه به شکل ۸ می توان با انتخاب مقادیر پیشنهادی توسط نرمافزار به حداقل زبری سطح ۰/۳ میکرومتر دستیافت. البته لازم به ذکر است که فاکتور مطلوبیت نیز در این شرایط برابر یک است که نشان دهنده این



شکل ۱۰. تصویر SEM از سطح نمونه شماره ۸، شرایط ماشینکاری: عمق برش ۵/۰ میلیمتر، نرخ پیشروی ۱۰۵ میلیمتر بر دقیقه، راستای برش ۹۰ درجه و سنگ با دانهبندی نرم.

Fig. 10. SEM picture of machined surface with maximum surface roughness, machining conditions: depth of cut 0. 5 mm, feed rate 105 mm/min, cutting direction 90° and fine grain size.

همان طور که در شکل ۹ مشاهده می شود، با انتخاب سنگ با دانهبندی زبر، حداقل عمق برش می توان به سطحی مطلوب دست یافت. هم چنین با سنگ نرم و حداکثر عمق برش در شکل ۱۰، سطحی مملو از ذوب شدگی زمینه و الیاف آسیب دیده مشاهده می شود. هم چنین با مقایسه این دو تصویر می توان به تأثیر بسیار زیاد عمق برش و دانهبندی سنگ بر زبری سطح پی برد.

۴- نتیجه گیری

در این گزارش تأثیر پارامترهای عمق برشی، نرخ پیشروی، دانهبندی ذرات و راستای برش بر زبری سطح در فرآیند سنگزنی کامپوزیت تک جهته تقویتشده با الیاف کربن موردبررسی قرارگرفته است. آزمایشها با روش سطح پاسخ و با کمک نرمافزار مینی تب نسخه ۱۹ طرحریزیشدهاند. از نمودارها و شکلها می توان نتایج زیر را استنباط نمود:

دانهبندی ذرات، عمق برشی، نرخ پیشروی به ترتیب تأثیر گذارترین
پارامترها بر زبری سطح بوده و همچنین میتوان از تأثیر راستای برش بر
زبری سطح چشمپوشی نمود.

بەدلىل خصوصىت چسبندگى زمىنە پلىمرى در كامپوزىت، سنگ

با ذرات ساینده بزرگتر بهدلیل خروج راحتتر برادههای چسبنده و همچنین عبور سیال خنککننده از فضای میان ذرات نتایج بهتری را نسبت به سنگ نرم در اختیار قرار داده است.

 با افزایش عمق برش بهدلیل افزایش سطح درگیری سنگ و قطعه، نیروهای ماشینکاری و به خصوص نیروی اصطکاک افزایش یافته و دمای منطقه ماشینکاری افزایش مییابد. افزایش دما نیز سبب افزایش آسیبهای حرارتی خواهد شد.

 افزایش نرخ پیشروی برخلاف عمق برش سبب کاهش زبری سطح خواهد شد. با توجه به سرعت زیاد چرخش سنگ، نرخ کم پیشروی باعث عبور بیش از حد ذرات ساینده از یک منطقه برشی و افزایش دمای آن منطقه می شود که این موضوع آسیب های دمایی را در پی خواهد داشت.

- می توان با انتخاب دانه بندی زبرتر، حداقل عمق برشی، نرخ پیشروی بالاتر و راستای نود درجه میان الیاف و بردار سرعت و هم چنین استفاده صحیح از سیال خنک کننده و کنترل دمای سطح به زبری سطح کم تر از ۱ میکرومتر در سنگزنی قطعات تخت کامپوزیتی تک جهته تقویت شده با الیاف کربن دستیافت.

- [9] H. Wang, F. Ning, Y. Hu, P. Fernando, Z.J. Pei, W. Cong, Surface grinding of carbon fiber–reinforced plastic composites using rotary ultrasonic machining: effects of tool variables, Advances in Mechanical Engineering, 8(9) (2016) 1-14.
- [10] V.S. Babu, S.S. Kumar, R. Murali, M.M. Rao, Investigation and validation of optimal cutting parameters for least surface roughness in EN24 with response surface method, International Journal of Engineering, Science and Technology, 3(6) (2011) 146-160.
- [11] B. Nikrooz, M. Zandrahimi, Optimization of process variables and corrosion properties of a multi layer silica sol gel coating on AZ91D using the Box–Behnken design, Journal of sol-gel science and technology, 59(3) (2011) 640-649.
- [12] S.m. Mousavi, A. Sazgar, A. Mostafanejad, Optimization of Machining Parameters in Turning of Carbon Fiber Reinforced Composite, in: 28th annual international conference of Iranian of mechanical engineers (ISME), Amirkabir university of technology, Tehran, I.R. of Iran, 2020, (in persian).
- [13] L. Wu, K.-l. Yick, S.-p. Ng, J. Yip, Application of the Box–Behnken design to the optimization of process parameters in foam cup molding, Expert Systems with Applications, 39(9) (2012) 8059-8065.
- [14] K. Abou-El-Hossein, K. Kadirgama, M. Hamdi, K. Benyounis, Prediction of cutting force in end-milling operation of modified AISI P20 tool steel, Journal of Materials Processing Technology, 182(1-3) (2007) 241-247.
- [15] K. Kadirgama, K. Abou-El-Hossein, B. Mohammad, H. Habeeb, Statistical model to determine surface roughness when milling hastelloy C-22HS, Journal of mechanical science and technology, 21(10) (2007) 1651-1655.

- [1] S.M. Mousavi, A. Sazgar, M.H. Beheshti, Investigation of the Effect of Machining Parameters to Minimize Surface Roughness in Grinding of Carbon-Epoxy Composites, in: 28th annual international conference of Iranian of mechanical engineers (ISME), Amirkabir university of technology, Tehran, I.R. of Iran, 2020, (in persian).
- [2] K.Y. Park, T. Nakagawa, Mirror surface grinding characteristics and mechanism of carbon fiber reinforced plastics, Journal of materials processing technology, 52(2-4) (1995) 386-398.
- [3] H. Yuan, H. Gao, Y.J. Bao, Y.B. Wu, Grinding of Carbon/ Epoxy Composites Using Electroplated CBN Wheel with Controlled Abrasive Clusters, in: Key Engineering Materials, Trans Tech Publ, 2009, pp. 24-29.
- [4] N. Hu, L. Zhang, Grindability of unidirectional carbon fibre reinforced plastics, in: Proceedings of the 13th International Conference on Composite Materials, Beijing, 2001.
- [5] H. Hocheng, Machining technology for composite materials: principles and practice, Elsevier, 2011.
- [6] H. Sasahara, T. Kikuma, R. Koyasu, Y. Yao, Surface grinding of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) with an internal coolant supplied through grinding wheel, Precision Engineering, 38(4) (2014) 775-782.
- [7] H. Gao, H. Ma, Y.J. Bao, H. Yuan, R.K. Kang, Theoretical analysis of grinding temperature field for carbon fiber reinforced plastics, in: Advanced materials research, Trans Tech Publ, 2010, pp. 52-57.
- [8] T. Gao, C. Li, D. Jia, Y. Zhang, M. Yang, X. Wang, H. Cao, R. Li, H.M. Ali, X. Xu, Surface morphology assessment of CFRP transverse grinding using CNT nanofluid minimum quantity lubrication, Journal of Cleaner Production, 277 (2020) 123328.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم S. M. Mousavi, A. Sazgar, V. Fallahpour, Optimization of Carbon Fiber Reinforced Composite Grinding Process by Response Surface Method, Amirkabir J. Mech Eng., 54(2) (2022) 481-490.



DOI: 10.22060/mej.2021.20145.7186

منابع