



## تأثیر افزودن نانوذرات گرافیت در روانساز بر کیفیت سطحی و سایش ابزار فولاد ماشینکاری شده 16MnCr5

بهزاد اویشن<sup>1\*</sup>، رحیم صمد زمینی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع علمی کاربردی ماشین‌سازی، تبریز

\* تبریز، صندوق پستی 161-53714-azaraniv.ac.ir, avishan@

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 03 دی 1396

پذیرش: 01 بهمن 1396

ارائه در سایت: 02 اسفند 1396

کلید واژگان:

نانوذرات گرافیت

سیال برشی

فولاد 16MnCr5

سایش ابزار

صافی سطح

### چکیده

تحقیق حاضر به بررسی تأثیر استفاده از نانوذرات گرافیت با اندازه دانه بندی متوسط 400 نانومتر و خلوص 99.9% در سیال برشی بر فرایند ماشینکاری فولاد 16MnCr5 پرداخته است. ماشینکاری در سه عمق براده برداری 1، 2 و 3 میلیمتر و سه سرعت پیشروی 0.15، 0.25 و 0.35 میلیمتر بر دور با استفاده از سیال برشی معمولی و سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت انجام پذیرفته است. بررسی‌های ریزساختاری سطوح ماشینکاری شده، بررسی تغییرات سختی از سطح براده برداری شده به سمت مرکز قطعه و آزمایش‌های صافی سطح و سایش ابزار همگی برای بررسی جنبه‌های مختلف قابلیت ماشینکاری انجام پذیرفته‌اند. نتایج، نشان داده است صرف نظر از عمق براده برداری و سرعت پیشروی، استفاده از نانوذرات گرافیت در سیال برشی در تمامی شرایط ماشینکاری به علت کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه کار، کاهش حرارت تولیدی و کاهش نیروی براده برداری سبب کاهش سایش ابزار و بهبود صافی سطح شده است. بیشترین و کمترین میزان کاهش وزن ابزار برشی در حضور نانوذرات گرافیت به ترتیب 0.022 و 0.002 گرم بوده است. علاوه بر صافی سطح قطعات تحت بیشترین عمق براده برداری و سرعت پیشروی از  $Ra=4.79$  میکرومتر در حضور سیال برشی آب صابون معمولی به  $Ra=3.29$  میکرومتر در حضور نانوذرات گرافیت کاهش یافته است. همچنین نتایج بررسی‌های ریزساختاری موید این واقعیت بوده که استفاده از نانوذرات گرافیت به کاهش جهت‌گیری‌های ریزساختاری، کاهش شدت کارسختی و همچنین کاهش ضخامت لایه متاثر از تنش ایجاد شده در سطح قطعه کار انجامیده است.

## Effect of graphite nanoparticles addition into cutting fluid on surface quality and tool wear of 16MnCr5 machined steel

Behzad Avishan<sup>1\*</sup>, Rahim Samad Zamini<sup>2</sup>

1- Department of Materials Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

2- Department of Mechanical Engineering, University of Applied Science and Technology, Tabriz, Iran

\* P.O.B. 53714-161, Tabriz, Iran, avishan@azaraniv.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 24 December 2017

Accepted 21 January 2018

Available Online 21 February 2018

#### Keywords:

Graphite nanoparticles

Cutting fluid

16MnCr5 steel

Tool wear

Surface roughness

### ABSTRACT

This article investigates the effect of the addition of graphite nanoparticles with average grain sizes of 400nm and purity of 99.9% in cutting fluid on machining process of 16MnCr5 steel. Machining was performed at three cutting depths of 1, 2 and 3mm and three feed rates of 0.15, 0.25 and 0.35mm/rev using ordinary cutting fluid and cutting fluid containing graphite nanoparticles. Microstructural studies of the machined surfaces, hardness tests from surface toward the center and surface roughness and tool wear evaluations all were implemented in order to evaluate different machinability aspects. Results indicated that, regardless of the depth of cut and the feed rate, using the graphite nanoparticles within the cutting fluid decreased the amount of the tool wear and improved the surface quality of the material due to its effect on decreasing the friction between tool and material, decreasing the generated heat and decreasing the cutting force. The highest and the lowest amounts of cutting tool weight losses were 0.022 and 0.002gr, respectively when using the graphite nanoparticles. In addition, the surface roughness of test pieces decreased from  $Ra=4.79\mu\text{m}$  when using ordinary cutting fluid to  $Ra=3.29\mu\text{m}$  when using graphite nanoparticles in cutting fluid both in the case of the highest depth of cut and the highest feed rate. Furthermore, microstructural characterizations illustrated that using the graphite nanoparticles resulted in lower microstructural textures, lower work hardening and lower thickness of stress affected layer at the surface of the material.

### 1- مقدمه

سرعت پیشروی و ... در حین فرایند ماشینکاری آن می‌باشد. اهمیت این پارامتر نه تنها در مورد قطعات مهندسی از جنس آلیاژهای ساده و متداول پایه آهن، بلکه در مورد فولادهای آلیاژی [1]، قطعات فولادی فوق سخت از جمله فولادهای ابزار سردکار [2]، قطعاتی از جنس آلیاژهای غیرآهنی [3] و

کیفیت سطحی از جمله پارامترهای تأثیرگذار بر عمر و خواص مکانیکی نهایی یک قطعه مهندسی است که متاثر از پارامترهای گوناگون از جمله نیروی براده برداری، حرارت و اصطکاک بین قطعه کار و ابزار، عمق براده برداری،

### Please cite this article using:

B. Avishan, R. Samad Zamini, Effect of graphite nanoparticles addition into cutting fluid on surface quality and tool wear of 16MnCr5 machined steel, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 03, pp. 56-64, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

افزایش هدایت حرارتی سیال برشی در تحقیق دیگری توسط هوانگ و همکاران نیز اثبات گردیده است [15]. خلیل پوراآذر و همکاران نشان داده‌اند استفاده از نانوذرات آلومینا در سیال برشی توانسته است به صورت چشمگیری سبب کاهش سایش ابزار و همچنین کاهش پارامترهای  $Rz$  و  $Ra$  به عنوان معیارهایی برای سنجش زبری سطح قطعه نهایی ماشینکاری شده شود [16].

به صورت مشابه، انتظار بر این است که استفاده از نانوذرات گرافیت به عنوان یکی از آلوتروپ‌های کربن با قابلیت روانکاری و هدایت حرارتی بالا بتواند به بهبود فرایند ماشینکاری کمک کند. بنابراین در تحقیق حاضر تأثیر استفاده از نانوذرات گرافیت در سیال برشی بر کیفیت سطحی و سایش ابزار برشی در حین ماشینکاری فولاد 16MnCr5 که به طور گسترده‌ای به عنوان ماده اولیه در بسیاری از کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مورد بررسی قرار گرفته است.

## 2- مواد و روش تحقیق

### 2-1- فولاد مورد استفاده و فرایند ماشینکاری

ترکیب شیمیایی فولاد 16MnCr5 مورد استفاده در تحقیق حاضر که به صورت میلگرد تهیه شده است در جدول 1 آورده شده است.

ماشینکاری قطعات در دو مرحله، ابتدا با استفاده از سیال برشی آب صابون معمولی و سپس با استفاده از همان سیال برشی ولی حاوی نانوذرات گرافیت انجام گرفت. در این راستا آب صابون با درصد حجمی 1 به 10 با آب مخلوط شده و تهیه گردید. برای تهیه آب صابون حاوی نانوذرات گرافیت، برای هر لیتر سیال برشی آب صابون، 1 گرم پودر به آن اضافه شد. عملیات پخش یکنواخت توسط ارتعاش صوتی با استفاده از دستگاه مخلوط کن التراسونیک در فرکانس 480 هرتز و به مدت 15 دقیقه انجام پذیرفت. دستگاه تراش نشان داده شده در شکل 1 برای روتراشی نمونه‌های آزمایشی مورد استفاده قرار گرفت. سیال‌های برشی آماده شده در مخزنی مجزا قرار داده شدند تا مجدداً وارد چرخه نشده و ذرات معلق فلزی حاصل از ماشینکاری بر روی قطعه کار تأثیری نداشته باشند. نانوذرات گرافیت مورد استفاده در این تحقیق، به صورت پودر با اندازه دانه متوسط 400 نانومتر، خلوص 99.9% و  $PH=6-7$  بوده است. حدود 30 گرم از این پودر در تحقیق حاضر مورد استفاده قرار گرفت.

بعد از تهیه قطعه فولادی به شکل میلگرد و به قطر 75 میلی‌متر، قطعاتی به طول 150 میلی‌متر به وسیله دستگاه اره نوری به تعداد 18 عدد بریده شده و شماره‌گذاری گردیدند. آزمایش‌های ماشینکاری در سه سرعت پیشروی 0.15، 0.25 و 0.35 میلی‌متر بر دور و سه عمق برش 1، 2 و 3 میلی‌متر و با استفاده از سیال برشی آب صابون معمولی و همچنین سیال برشی آب صابون حاوی نانوذرات گرافیت انجام پذیرفت. در تمام آزمایش‌های ماشینکاری، سرعت برشی ثابت و 220 متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. برای هر آزمایش یک ابزار برشی مجزا استفاده گردید. برای هر نمونه ماشینکاری، ابزار برش تعویض و شماره قطعه ماشینکاری شده روی جعبه نگهداری ابزار برش ثبت

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد 16MnCr5 مورد استفاده

Table 1 The chemical composition of 16MnCr5 steel used in this study

عنصر شیمیایی	کربن	سیلیسیم	منگنز	فسفر	گوگرد	کروم
درصد وزنی	0.17	0.40	1.25	0.02	0.03	0.90

همچنین سوپراآلیاژها [4] نیز مدنظر قرار گرفته است. بنابراین توجه به فرایند ماشینکاری و متغیرهای دخیل در راستای کنترل قابلیت ماشینکاری و کیفیت سطحی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار خواهد بود [5].

متغیرهای ماشینکاری را می‌توان در دو دسته کلی مستقل (متغیرهای ورودی) و وابسته (متغیرهای خروجی) دسته بندی کرد [6]. متغیرهای مستقل آن دسته از متغیرهایی هستند که قابل کنترل بوده و قبل از شروع عملیات ماشینکاری می‌توان آنها را تعیین کرد. از آن جمله می‌توان به نوع و جنس قطعه کار، شکل و ابعاد نمونه، نوع فرایند ماشینکاری انتخاب شده، مواد مصرفی در تولید ابزارهای برشی (جنس ابزار)، پارامترهای براده برداری، شکل ابزار برشی و مایع خنک کننده اشاره نمود. در مقابل، متغیرهای وابسته قابل کنترل نبوده و بر اساس تنظیمات اولیه و متغیرهای ورودی انتخاب شده برای ماشینکاری می‌توانند به عنوان معیاری برای سنجش قابلیت ماشینکاری در نظر گرفته شوند. از جمله این متغیرها می‌توان به نیرو و انرژی باربرداری، اندازه و شکل و خواص محصول نهایی و دقت آن، صافی سطح نهایی و همچنین سایش و عمر نهایی ابزار اشاره کرد [6]. شایان ذکر است که در بررسی قابلیت ماشینکاری فلزات مختلف با در نظر گرفتن متغیرهای ورودی و با توجه به خروجی‌های بدست آمده، می‌توان قابلیت ماشینکاری را بررسی نمود. به عبارت دیگر این متغیرهای خروجی هستند که قابل بحث و بررسی برای پی بردن به قابلیت ماشینکاری فلزات مختلف بر اساس یک سری تنظیمات اولیه می‌باشند.

در میان پارامترهای ورودی مختلف، استفاده از سیال‌های برشی مناسب در حین ماشینکاری به عنوان یکی از مهمترین متغیرها مطرح بوده و استفاده از سیال‌های برشی مناسب به عنوان روانساز و خنک کننده می‌تواند با تأثیر مستقیم بر نیروی اصطکاک بین قطعه کار و ابزار برشی و همچنین تأثیر بر نیروهای براده برداری سبب بهبود شرایط ماشینکاری و افزایش راندمان تولید گردد [7]. در تحقیق انجام شده قبلی نشان داده شده است که استفاده از سیال برشی مناسب حتی می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای بر کیفیت سطحی و تنش‌های پسماند در سطح ماشینکاری سوپراآلیاژهای پایه آهن که در توربین‌های بخار مورد استفاده قرار می‌گیرند تأثیرگذار باشد. بر اساس نتایج بدست آمده، استفاده از سیال برشی مناسب برای ماشینکاری، ضمن افزایش کارایی سطحی قطعه، بازدهی کلی آن را نیز افزایش داده است [8]. در این بین استفاده از مواد ثانویه در سیال برشی برای بهبود عملکرد آن بسیار تأثیر گذار خواهد بود. همانگونه که کاربرد مفید نانوسیالات در صنایع مختلف اثبات شده است [9]، به نظر می‌رسد که استفاده از نانوذرات معلق در سیال برشی نیز می‌تواند بسیار مفید بوده و با افزایش هدایت حرارتی در سیال برشی سبب کاهش هرچه بیشتر تعداد قطعات معیوب نهایی شود [10, 11]. به عنوان مثال، نشان داده شده است که استفاده از نانوذرات مولیبدن دی‌سولفاید در سیال برشی در حین ماشینکاری فولاد بلبرینگ سبب کاهش قابل ملاحظه‌ای در اصطکاک، و در نتیجه سایش ابزار برشی شده است [12]. همچنین شبرگرد و همکاران [13] تأثیر استفاده از نانوذرات اکسید مس بر فرایند ماشینکاری فولاد AISI 4340 را مورد مطالعه و بررسی قرار داده و نشان داده‌اند استفاده از این نانوذرات در سیال برشی علاوه بر بهبود قابل توجه کیفیت سطحی قطعه نهایی توانسته است نیروی براده برداری را نیز کاهش دهد. در تحقیق دیگری اثبات شده است که استفاده از نانو پودرهای اکسید سیلیسیم و اکسید آلومینیوم در دی الکتریک در فرایند ماشینکاری تخلیه الکتریکی آلیاژ خاصی از تیتانیوم توانسته است بر صافی سطح نهایی تأثیر مثبت داشته باشد [14]. به طور مشابه تأثیر مثبت استفاده از نانوذرات اکسید مس در روانکار بر

همچنین تهیه تصاویر دارای عمق میدان، سطوح ماشینکاری شده نمونه‌ها توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۲</sup> تحت بررسی قرار داده شدند.

#### 2-4- بررسی سایش ابزار

برای بررسی سایش ابزار به عنوان معیاری از قابلیت ماشینکاری، از محاسبه اختلاف وزن ایجاد شده ابزارهای برشی قبل و بعد از ماشینکاری در اثر سائیدگی در فرایندهای مختلف براده برداری استفاده شده است. برای این منظور ابتدا تیغچه‌ها با برس نرم و استون، تمیزکاری و شسته شده و به وسیله ترازوی دیجیتالی با دقت 0.0001 وزن شدند. بعد از عمل براده برداری توسط تیغچه‌ها و شستشو و خشک شدن آنها، وزن آنها مجدد اندازه گیری شده و اختلاف وزن تیغچه‌ها قبل و بعد از ماشینکاری محاسبه گردید. برای درک بهتر سایش ابزارهای برشی، از تیغچه‌ها به وسیله میکروسکوپ نوری و با بزرگ نمایی 50 برابر، تصویر گرفته شد و لبه برشی آنها مورد بررسی قرار گرفت.

#### 3- نتایج و بحث

##### 3-1- مشخصات ریزساختاری نمونه اولیه و نمونه های ماشینکاری شده

شکل 3 نمونه‌ای از ریزساختار قطعه خام (بدون ماشینکاری) را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که ریزساختار نمونه خام فولاد 16MnCr5 حاوی فازهای فریت<sup>۳</sup> (فاز سفید رنگ) و پرلیت<sup>۴</sup> (فاز تیره رنگ) می‌باشد. بررسی‌های ریزساختاری از قسمت‌های مختلف فولاد نشان داد که فولاد، حاوی حدود 60 تا 65 درصد حجمی فریت و 35 تا 40 درصد حجمی پرلیت می‌باشد.



Fig. 2 Surface roughness testing machine

شکل 2 دستگاه سنجش صافی سطح مورد استفاده

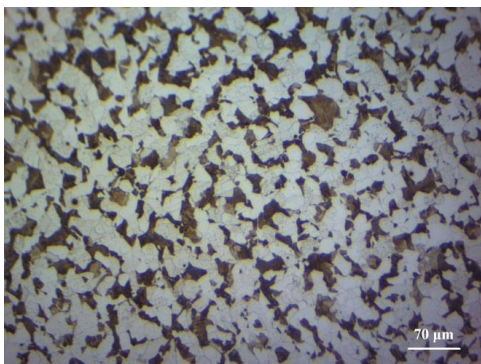


Fig. 3 Optical microscopy picture of microstructure of 16MnCr5 steel

شکل 3 تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار فولاد 16MnCr5

<sup>2</sup> Scanning Electron Microscope (SEM)

<sup>3</sup> Ferrite

<sup>4</sup> Pearlite



Fig. 1 CNC turning machine and designed cutting fluid container

شکل 1 دستگاه تراش CNC و مخزن سیال برشی تعبیه شده

شد. بار برداری در تمام نمونه‌های آزمایشی در طول براده برداری و تعداد دفعات براده برداری یکسان انجام پذیرفت.

##### 2-2- بررسی های ریزساختاری و سختی سنجی

بررسی‌های ریزساختاری بر روی نمونه‌های مکعبی شکل با ابعاد 10×10×10 میلیمتر مکعب که از نمونه‌های ماشینکاری و نمونه خام، بریده شدند انجام پذیرفت. کلیه بررسی‌های ریزساختاری قبل و بعد از ماشینکاری از سطح بیرونی قطعات و سطحی که در معرض روتراشی قرار گرفته است، انجام شد. برای این منظور نمونه‌ها ابتدا توسط سمباده‌های با مش بندی‌های 80 تا 1200 مورد سایش قرار گرفته و پس از پولیش و اچ توسط محلول نایتال 2 درصد توسط میکروسکوپ نوری مطالعه شدند. آزمایش سختی برای تعیین سختی نمونه‌های اولیه قبل از ماشینکاری انجام پذیرفت. سختی سنجی با معیار ویکرز و با بار 30 کیلوگرم به تعداد 5 بار از قسمت‌های مختلف نمونه انجام شده و مقدار متوسط گزارش گردید. همچنین برای بررسی و تعیین عمق ناحیه متأثر از تنش در فرایندهای مختلف براده برداری، از روش میکروسختی سنجی از سطح به سمت مرکز سطح مقطع نمونه‌ها استفاده شد. در این روش، میکروسختی نمونه‌ها بر روی سطح مقطع عمود بر سطح براده برداری شده از سطح به سمت مغز نمونه انجام پذیرفت. برای این منظور سطح مقطع عمود بر سطح براده برداری شده ابتدا توسط سمباده‌های مختلف از شماره 80 تا 1200 سمباده زنی شده و سپس پولیش گردیدند تا سطح آینه ای حاصل شود. اولین اثر سختی در فاصله 0.15 میلیمتر از سطح ماشینکاری انجام و سپس سختی سنجی به سمت مغز با فواصل 0.1 میلیمتر به و تا عمق 0.35 میلیمتر از لبه سطح ماشینکاری شده، توسط دستگاه میکرو سختی سنجی و با بار 100 گرمی ادامه یافت. آزمایش‌های میکروسختی سنجی به تعداد 3 مرتبه انجام و میانگین نتایج گزارش شد.

##### 2-3- سنجش صافی سطح<sup>۱</sup>

صافی سطوح ماشینکاری شده تحت شرایط مختلف براده برداری توسط دستگاه صافی سنج مدل Perthometer S6P که در شکل 2 نشان داده شده است و تحت شرایط دمایی متوسط 22 درجه سانتیگراد و رطوبت نسبی 55% مورد آزمایش قرار گرفتند. صافی سطح نمونه‌ها از سه قسمت مختلف نمونه انجام شده و نتایج به صورت میانگین با معیار Ra گزارش گردید. در ادامه و برای بررسی بهتر و دقیق‌تر زبری سطوح تحت شرایط مختلف ماشینکاری و

<sup>1</sup> Surface roughness

[13] مطالعه شده و آنها نشان داده‌اند که استفاده از نانوذرات اکسید مس در سیال برشی سبب کاهش نیروی ماشینکاری و همچنین کاهش مقدار اصطکاک در فصل مشترک ابزار و قطعه کار و همچنین ابزار و براده شده است.

### 3-2- عمق لایه متأثر از تنش در نمونه‌های ماشینکاری

جدول 2 نتایج آزمایش میکروسختی سنجی به عمل آمده در سطح مقطع نمونه‌های ماشینکاری شده به سمت مرکز نمونه‌ها تحت شرایط براده برداری مختلف و با استفاده از سیال برشی معمولی و سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت را نشان می‌دهد.

همانگونه که دیده می‌شود، انجام عملیات ماشینکاری در عمق‌های براده برداری و سرعت‌های پیشروی مختلف سبب افزایش سختی در زیر سطح براده برداری شده نسبت به سختی قطعه خام اولیه (حدود  $5 \pm 200$  ویکرز<sup>2</sup>) شده است به گونه‌ای که با حرکت از سطح ماشینکاری به سمت زیرسطح و مرکز نمونه، سختی افت پیدا کرده و به سختی قطعه خام نزدیک‌تر می‌شود. به عبارت دیگر می‌توان گفت انجام فرایند ماشینکاری سبب ایجاد یک لایه متأثر از تنش در اثر براده برداری شده است که سختی از سطح به سمت داخل این لایه کاهش یافته است.

همچنین نتایج نشان می‌دهند صرف نظر از نوع سیال برشی به کار رفته، افزایش سرعت پیشروی در عمق براده برداری ثابت و همچنین افزایش عمق براده برداری در سرعت پیشروی ثابت سبب افزایش سختی در فواصل یکسان از سطح ماشینکاری شده در لایه سخت شده گردیده است. این در حالی است که نتایج حاکی از این واقعیت است که افزایش سرعت پیشروی نقش مؤثرتر و قوی‌تری در این زمینه داشته است. نتایج، نشان دهنده این واقعیت هستند که استفاده از نانوذرات گرافیت در سیال برشی باعث شده است تا مقدار افزایش سختی در سطح و زیرسطح و همچنین عمق لایه سخت شده کمتر از حالتی باشد که از سیال آب صابون معمولی استفاده شده است. ایجاد

جدول 2 تغییرات سختی با فاصله از سطح ماشینکاری شده

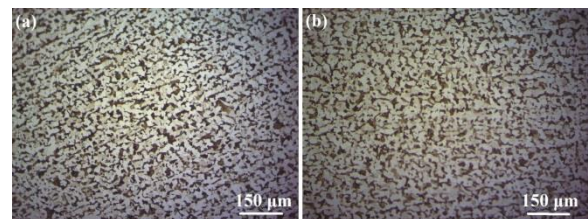
**Table 1** Change in hardness in different distances from machined surface

سیال برشی	سرعت پیشروی (mm/rev)	عمق براده برداری (mm)	سختی در فاصله 0.15mm از سطح	سختی در فاصله 0.25mm از سطح	سختی در فاصله 0.35mm از سطح
بدون نانوذرات گرافیت	0.15	1	240±3	218±3	212±2
		2	240±2	220±3	212±2
		3	245±3	225±4	211±2
	0.25	1	251±3	231±3	220±2
		2	253±2	235±3	221±3
		3	253±2	239±2	225±3
	0.35	1	266±4	248±3	227±3
		2	275±3	254±3	234±2
		3	280±3	250±3	226±4
حاوی نانوذرات گرافیت	0.15	1	200±2	189±2	181±2
		2	202±2	191±2	182±2
		3	209±3	196±2	183±2
	0.25	1	215±2	200±3	191±2
		2	216±2	203±3	191±2
		3	216±2	209±3	199±2
	0.35	1	248±3	225±3	211±3
		2	261±2	230±3	211±2
		3	266±2	230±4	211±3

<sup>2</sup> Vickers

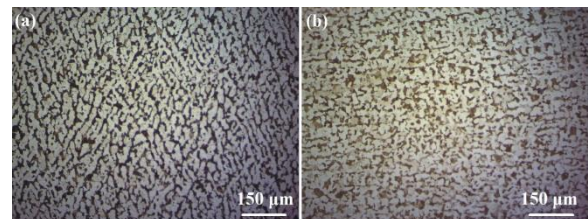
همانگونه که در شکل‌های 4 و 5 دیده می‌شود، صرف نظر از فرایند ماشینکاری و سیال برشی استفاده شده، نمونه‌های فولادی ماشینکاری شده با همان مشخصات ریزساختاری نمونه خام حاوی فریت و پرلیت با درصد حجمی مشابه بوده‌اند. تفاوت عمده نسبت به نمونه خام اولیه در ریخت شناسی<sup>1</sup> و جهت‌گیری فازهای فریت و پرلیت دیده می‌شود.

بررسی‌های کلی ریزساختار نمونه‌های ماشینکاری شده نشان می‌دهند اعمال فرایند براده برداری، سبب کشیده شدن فریت و پرلیت در جهت اعمال نیروی براده برداری در حین ماشینکاری شده است. این در حالی است که شدت کشیدگی‌ها با افزایش سرعت پیشروی در عمق براده برداری ثابت و همچنین افزایش عمق براده برداری در سرعت پیشروی ثابت در هر دو فرایند ماشینکاری با سیال برشی آب صابون و سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت شدت بیشتری داشته است. چنین پدیده‌ای با در نظر گرفتن افزایش نیروی براده برداری و اصطکاک در سرعت‌های پیشروی و عمق‌های براده برداری بیشتر قابل توجیه است. تصاویر نشان می‌دهند، استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت در فرایندهای مختلف ماشینکاری سبب کاهش میزان کشیدگی و لهیدگی در سطح ماشینکاری شده است که علت آن را می‌توان در نقش تاثیرگذار نانوذرات گرافیت به کار برده شده در سیال برشی در کاهش اصطکاک، کاهش سطح تماس و کاهش نیروی براده برداری جستجو کرد. تغییرات نیروی براده برداری و اصطکاک بین ابزار و قطعه کار با متغیرهای ماشینکاری و نوع سیال به کار برده شده در برخی تحقیقات قبلی نیز مؤید استدلال فوق می‌باشد. به عنوان مثال، تاثیر افزودن نانوذرات ثانویه به سیال برشی بر نیروی براده برداری و اصطکاک توسط شبرگرد و همکارانش



**Fig. 4** Optical microscopy pictures of machined specimens with feed rate of 0.15mm/rev and cutting depth of 1mm a) without graphite nanoparticles in cutting fluid, b) with graphite nanoparticles in cutting fluid

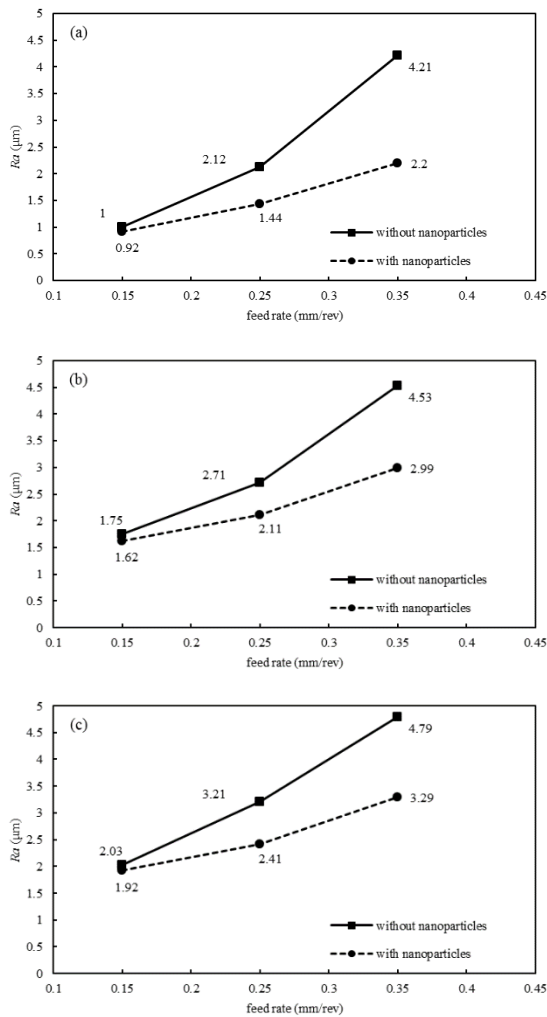
شکل 4 تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه‌های ماشینکاری شده با شرایط سرعت پیشروی 0.15 میلیمتر بر دور و عمق برش 1 میلیمتر (a) بدون استفاده از نانوذرات در سیال برشی (b) با استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت



**Fig. 5** Optical microscopy pictures of machined specimens with feed rate of 0.35 mm/rev and cutting depth of 3mm a) without graphite nanoparticles in cutting fluid, b) with graphite nanoparticles in cutting fluid

شکل 5 تصاویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار نمونه‌های ماشینکاری شده با شرایط سرعت پیشروی 0.35 میلیمتر بر دور و عمق برش 3 میلیمتر (a) بدون استفاده از نانوذرات در سیال برشی (b) با استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت

<sup>1</sup> Morphology



**Fig. 6** The effect of cutting fluid on surface roughness at different feed rates a) 1mm depth of cut, b) 2mm depth of cut and c) 3mm depth of cut

شکل 6 تأثیر سیال برشی بر روی زبری سطح ماشینکاری شده در سرعت‌های پیشروی مختلف و عمق براده برداری (a) 1 میلی‌متر، (b) 2 میلی‌متر و (c) 3 میلی‌متر از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت سبب بهبود بیشتر کیفیت سطحی خواهد شد.

در ادامه بررسی‌های انجام شده در مورد کیفیت سطح قطعات ماشینکاری شده، سطوح ماشینکاری شده توسط میکروسکوپ الکترونی رویشی برای مشاهده پستی و بلندی‌های سطحی مورد بررسی قرار گرفتند که برخی از نتایج، به عنوان نمونه در شکل‌های 8 و 9 نشان داده شده‌اند. تصاویر نشان می‌دهند، کاهش سرعت پیشروی در عمق براده برداری یکسان و کاهش عمق براده برداری در سرعت پیشروی یکسان بدون در نظر گرفتن نوع سیال برشی به کار رفته، امکان دستیابی به سطوح ماشینکاری مناسب‌تر و صاف‌تر را فراهم ساخته‌اند. همچنین بر اساس تطابق با آنچه در نتایج صافی سطح نیز نشان داده شد، بررسی‌های سطحی با میکروسکوپ الکترونی روبشی تأیید کننده بهبود کیفیت سطحی در هر یک از شرایط براده برداری در شرایط استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت می‌باشد. ضمن اینکه تصاویر میکروسکوپی تأیید کننده بهبود صافی سطحی در شرایط سرعت پیشروی پایین و عمق براده برداری کم می‌باشد. تصاویر میکروسکوپ الکترونی همچنین نشان می‌دهند بهترین کیفیت سطحی مربوط به نمونه ماشینکاری

تنش پسماند در سطح و زیر سطح و همچنین تغییر شکل پلاستیک سطح ماشینکاری شده و سطح زیرین آن و در نتیجه کارسختی<sup>1</sup> ایجاد شده در این مناطق در اثر نیروی ماشینکاری وارد شده به قطعه می‌تواند توجیه کننده رفتار افزایش سختی در سطح و تشکیل لایه سخت شده باشد. هر چه نیروی براده برداری بیشتر باشد این اثر شدیدتر بوده و افزایش سختی نیز بیشتر خواهد بود. بنابراین طبیعی است که با افزایش سرعت پیشروی و افزایش عمق براده برداری که هر دو باعث افزایش نیروی ماشینکاری می‌شوند به سختی بالاتر در سطح و زیرسطح و همچنین عمق لایه سخت شده بزرگتر دست یافت. از طرفی چون استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت اصطکاک بین ابزار برشی و قطعه را کاهش داده و سبب کاهش مقدار نیروی براده برداری می‌شود طبیعی است که سختی حاصله کمتر و عمق لایه سخت شده کوچکتر از حالتی باشد که از سیال آب صابون معمولی استفاده شده است. نانوذرات گرافیت موجود در سیال برشی سبب افزایش سرعت انتقال حرارت از سطح قطعه ماشینکاری شده و همچنین سبب ایجاد یک لایه حایل بین براده- ابزار- قطعه می‌شود و در نتیجه با کاهش اصطکاک و نیروی ماشینکاری از انباشت بیشتر تنش و ایجاد تغییر شکل پلاستیک و کارسختی شدیدتر در سطح و زیرسطح جلوگیری کرده و سبب دستیابی به لایه سخت شده کوچکتر با سختی کمتر می‌شود.

وجود لایه سخت شده عمیق‌تر و سختی بالاتر این لایه، می‌تواند با ایجاد شیب سختی از سطح به سمت مرکز قطعه سبب ترغیب ایجاد ترک بین لایه سخت شده و قطعه خام گردیده و در کارکرد قطعه اختلال ایجاد کند. وجود این ترک‌ها و رشد آنها در اثر تنش‌های وارده حین کارکرد قطعه می‌تواند سبب شکست زود هنگام شود.

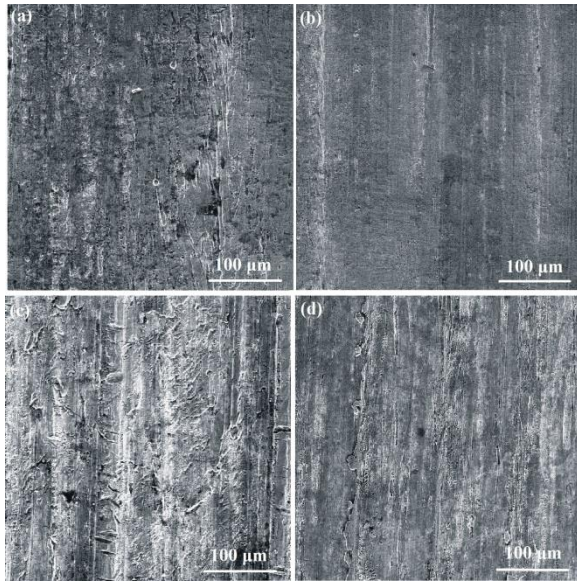
### 3-3- کیفیت سطحی نمونه‌ها

همان‌طور که در شکل 6 دیده می‌شود با افزایش سرعت پیشروی و ثابت ماندن دیگر پارامترهای ماشینکاری (عمق بار و نوع سیال برشی) زبری سطح قطعه کار بیشتر شده و کیفیت سطح کاهش پیدا کرده است. همچنین نتایج نشان می‌دهند استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت سبب بهبود کیفیت سطح ماشینکاری شده در سرعت‌های پیشروی مختلف گردیده است. به طور مشابه و برای بررسی اینکه کدام یک از پارامترهای سرعت پیشروی و عمق براده برداری تأثیر بیشتری بر کیفیت سطحی داشته‌اند، تغییرات صافی سطح نمونه‌های ماشینکاری شده این بار در سرعت پیشروی ثابت و عمق‌های براده برداری مختلف در شرایط استفاده از سیال‌های برشی آب صابون معمولی و آب صابون حاوی نانوذرات گرافیت در شکل 7 نشان داده شده‌اند.

مطابق نتایج، دیده می‌شود که افزایش عمق براده برداری در هر یک از سرعت‌های پیشروی سبب افزایش پستی و بلندی‌های سطحی شده است. ضمن این که استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت سبب بهبود کیفیت سطح در هر یک از عمق‌های براده برداری شده است.

نتایج نشان می‌دهند افزایش سرعت پیشروی نسبت به افزایش عمق براده برداری تأثیر بیشتری در کاهش کیفیت سطحی داشته است. همچنین می‌توان گفت تغییرات صافی سطح در عمق‌های براده برداری و سرعت‌های پیشروی مختلف در حضور سیال‌های برشی به کار رفته، نشان می‌دهند برای دستیابی به سطحی بهتر و با زبری کمتر لازم است ماشینکاری در سرعت‌های پیشروی کمتر و عمق‌های براده برداری کمتر انجام شود. ضمن اینکه استفاده

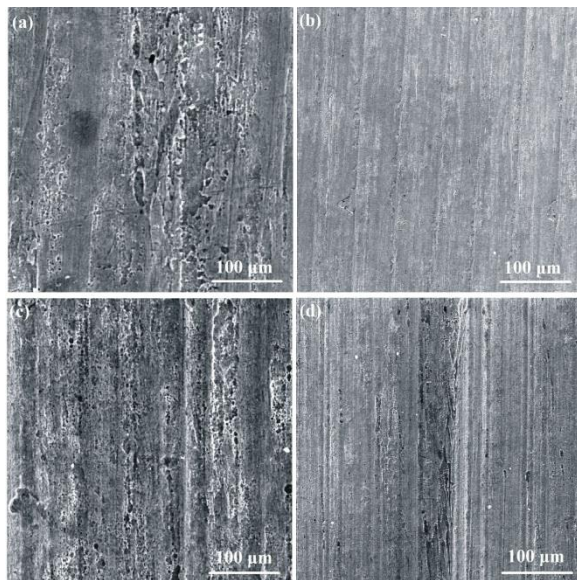
<sup>1</sup> Work hardening



**Fig. 8** SEM pictures of samples with feed rate of 0.15mm/rev a) 1mm depth of cut without graphite nanoparticles, b) 1mm depth of cut with graphite nanoparticles, c) 3mm depth of cut without nanoparticles and d) 3mm depth of cut with nanoparticles

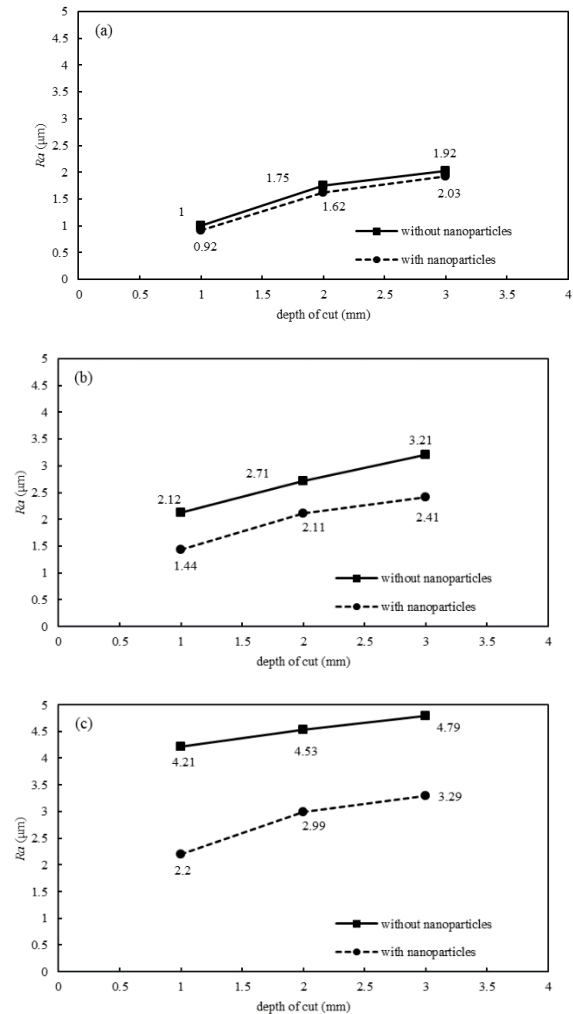
شکل 8 تصویر SEM از نمونه با سرعت پیشروی 0.15 میلیمتر بر دور عمق 1mm بدون نانوذرات گرافیت (a) عمق 3mm بدون نانوذرات گرافیت (b) عمق 1mm با نانوذرات گرافیت (c) عمق 3mm با نانوذرات گرافیت (د)

می‌توان گفت، شکست خستگی شکست ماده در اثر اعمال نیروهای متناوب کمتر از استحکام نهایی فلز می باشد. این نوع شکست اکثراً همراه با جوانه زنی ترک در سطح قطعه آغاز می شود و شکست به طور ناگهانی اتفاق می افتد بنابراین شرایط سطح قطعه تأثیر زیادی بر عمر خستگی آن خواهد



**Fig. 9** SEM pictures of samples with feed rate of 0.35mm/rev a) 1mm depth of cut without graphite nanoparticles, b) 1mm depth of cut with graphite nanoparticles, c) 3mm depth of cut without nanoparticles and d) 3mm depth of cut with nanoparticles

شکل 9 تصویر SEM از نمونه با سرعت پیشروی 0.35 میلیمتر بر دور عمق 1mm بدون نانوذرات گرافیت (a) عمق 3mm بدون نانوذرات گرافیت (b) عمق 1mm با نانوذرات گرافیت (c) عمق 3mm با نانوذرات گرافیت (د)



**Fig. 7** The effect of cutting fluid on surface roughness at different depth of cuts and feed rates of a) 0.15 mm/rev, b) 0.25 mm/rev and c) 0.35 mm/rev

شکل 7 تأثیر سیال برشی بر روی زبری سطح ماشینکاری شده در عمق های براده برداری مختلف و سرعت های پیشروی (a) 0.15 میلیمتر بر دور، (b) 0.25 میلیمتر بر دور و (c) 0.35 میلیمتر بر دور

شده تحت شرایط عمق براده برداری 1 میلیمتر و سرعت پیشروی 0.15 میلیمتر بر دور با استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت بوده است. این در حالی است که براده برداری در سرعت پیشروی 0.35 میلیمتر بر دور و عمق براده برداری 3 میلیمتر با سیال برشی آب صابون معمولی بدترین کیفیت سطحی را به دست داده است. به طور خلاصه می‌توان گفت نتایج بررسی های سطح ماشینکاری شده با میکروسکوپ الکترونی، تأیید کننده نتایج به دست آمده قبلی توسط تست صافی سطحی بوده و نشان می‌دهند استفاده از عمق براده برداری کمتر و سرعت پیشروی کمتر بر بهبود کیفیت سطحی موثر خواهد بود. همچنین نتایج، تأیید کننده این واقعیت است که استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت، صافی سطحی بهتری را به دست خواهد داد.

اهمیت بررسی کیفیت سطحی قطعات ماشینکاری شده مورد استفاده از آنجایی است که کیفیت سطحی به طور مستقیم بر عمر قطعه و به خصوص عمر خستگی<sup>1</sup> آن نقش بسیار مهمی دارد [17,18]. در تعریف مفهوم خستگی

<sup>1</sup> Fatigue life

برشی این بار در سرعت پیشروی ثابت و عمق‌های براده برداری مختلف در شرایط استفاده از سیال‌های برشی آب صابون معمولی و آب صابون حاوی نانوذرات گرافیت در شکل 11 نشان داده شده‌اند.

همان‌گونه که مشخص است، افزایش عمق براده برداری در یک سرعت پیشروی ثابت و عدم استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت سبب شده است تا سایش ابزار شدیدتر بوده و کاهش وزن شدیدتر در ابزار به وجود آید. درصد اختلاف وزنی به وجود آمده در ابزار مؤید این واقعیت است که تأثیر سرعت پیشروی بر کاهش وزن ابزار شدیدتر از تأثیر عمق براده برداری بوده است.

تغییر شکل پلاستیک و اصطکاک ایجاد شده در اثر ماشینکاری، مقدار قابل توجهی گرما در سطح قطعه و همچنین نوک ابزار به وجود می‌آورد در نتیجه مقدار سایش ابزار بالا رفته و عمر ابزار کم می‌شود. از طرفی سایش ابزار با عواملی نظیر تغییر در شکل و اندازه و هندسه ابزار همراه خواهد بود که به تبع آن نیروهای براده برداری در حین فرایند ماشینکاری تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. افزایش در نیروهای براده برداری خود مستقیماً به افزایش بیشتر حرارت در نوک ابزار و در نتیجه سایش بیشتر آن منجر می‌شود و این

داشت. صافی سطح کم‌تر سطح قطعه و وجود پستی و بلندی‌های شدید در آن می‌تواند به عنوان مکان‌های مناسب برای تمرکز تنش و شروع شکست خستگی باشند. لذا ضروری است تا با افزایش صافی سطح قطعه مقاومت آن در برابر شکست خستگی را بالاتر برد.

#### 3-4- سایش و هندسه نوک ابزار برشی

شکل 10 تغییرات وزن ابزار برشی قبل و بعد از ماشینکاری با تغییر سرعت پیشروی در عمق‌های مختلف براده برداری را در هر دو حالت استفاده از سیال برشی آب صابون معمولی و سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت نشان می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که در هر یک از شرایط ماشینکاری از ابزار براده برداری جدید استفاده شده است تا مقایسه نتایج منطقی باشد. نتایج نشان می‌دهند صرف نظر از نوع سیال برشی، افزایش سرعت پیشروی در حین ماشینکاری سبب سایش شدیدتر ابزار و کاهش وزن بیشتر شده است. ضمن اینکه نتایج، حاکی از این است که استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت شدت سایش ابزار و کاهش وزن را کاهش داده است.

مجدداً برای بررسی اینکه کدام یک از پارامترهای سرعت پیشروی و عمق براده برداری تأثیر بیشتری بر سایش ابزار داشته‌اند، تغییرات وزن ابزار

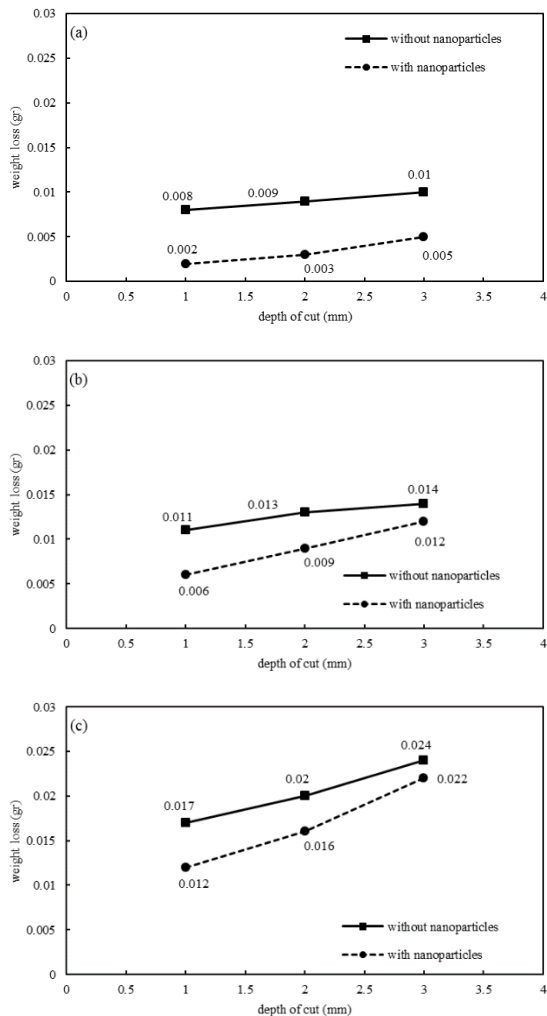


Fig. 11 Weight loss of the cutting tool at different depth of cut and feed rates of a) 0.15 mm/rev, b) 0.25 mm/rev c) 0.35 mm/rev

شکل 11 کاهش وزن ابزار برشی در عمق‌های برش مختلف و سرعت‌های پیشروی (a) 0.15 میلیمتر بر دور (b) 0.25 میلیمتر بر دور (c) 0.35 میلیمتر بر دور

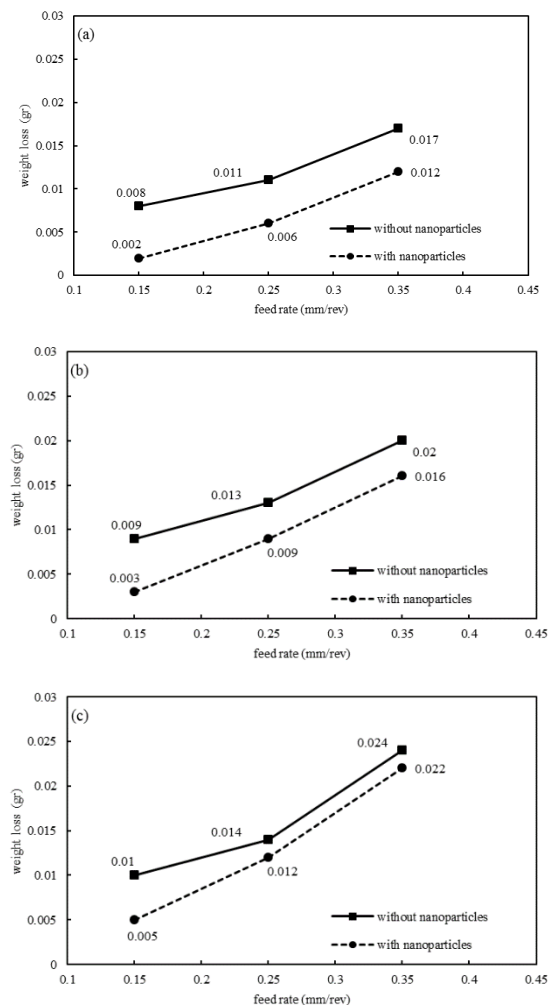


Fig. 10 Weight loss of the cutting tool at different feed rates and a) 1mm depth of cut, b) 2mm depth of cut c) 3mm depth of cut

شکل 10 کاهش وزن ابزار برشی در سرعت‌های پیشروی مختلف (a) عمق بار 1 میلیمتر، (b) عمق بار 2 میلیمتر، (c) عمق بار 3 میلیمتر

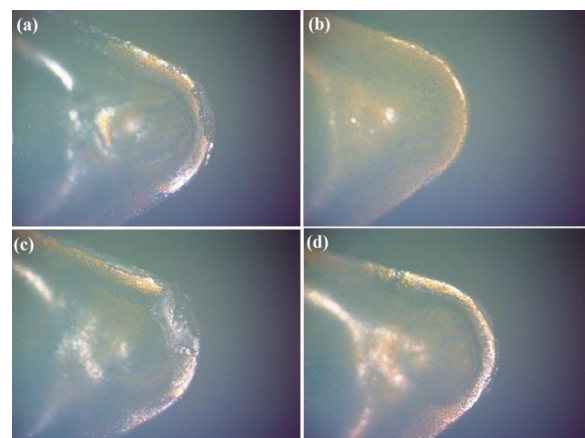
فرایند تا از کار افتادگی نهایی ابزار ادامه پیدا می‌کند. همچنین، تغییر در شکل و اندازه ابزار سبب تغییر در اندازه نهایی قطعه کار شده و ویژگی‌های سطحی را نیز تحت تأثیر قرار خواهد داد. در این حالت می‌توان با کنترل یک سری از عوامل ورودی، قابلیت ماشینکاری را بهبود بخشید. با انتخاب سرعت پیشروی کمتر در ماشینکاری و همچنین عمق براده برداری کمتر میزان اصطکاک بین ابزار و قطعه کار کمتر شده و همچنین نیروهای ماشینکاری کمتری در حین براده برداری به وجود خواهد آمد. در نتیجه کاهش حرارت تولید شده و کاهش شدت درگیری ابزار با قطعه کار سبب افزایش عمر ابزار، کاهش سایش آن و همچنین بهبود کیفیت سطحی خواهد شد. از طرفی، استفاده از نانوذرات گرافیت در سیال برشی سبب می‌شود که لایه‌ای از گرافیت بین ابزار-قطعه کار-براده ایجاد شده مانع از درگیری شدید سطح ابزار و قطعه کار شود. همچنین گرافیت با کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه کار از طرف دیگر با انتقال حرارت ایجاد شده در فصل مشترک نوک ابزار و سطح ماشینکاری شده از تجمع حرارت در ابزار و سایش شدید آن جلوگیری بعمل می‌آورد. به همین دلیل استفاده از نانوذرات گرافیت در سیال برشی نسبت به حالتی که سیال برشی معمولی استفاده می‌شود دستیابی به عمر بیشتر ابزار و سایش کمتر آن و در نتیجه کیفیت بهتر سطحی را فراهم می‌سازد.

شکل و هندسه ابزار روی اکثر معیارهای عمر ابزار مانند کیفیت سطح، نیروی براده برداری، دقت قطعه کار و درجه حرارت تأثیر دارد. در حین ماشینکاری، ابزار به دو صورت مختلف تغییر شکل می‌دهد، اول این که فرسایش ابزار باعث جدا شدن ذراتی از ابزار می‌شود و دوم این که تغییر شکل پلاستیک باعث تغییر شکل ابزار می‌شود. در همین راستا شکل 12 نمونه‌ای از تصاویر میکروسکوپ نوری از نوک ابزار برشی مورد استفاده در فرایندهای ماشینکاری در سرعت‌های پیشروی مختلف و عمق براده برداری 1 میلیمتر را نشان می‌دهد.

همانگونه که دیده می‌شود لبه سائیده شده ابزار برشی با افزایش سرعت پیشروی بزرگتر شده است به گونه‌ای که در سرعت‌های پیشروی 0.25 و 0.35

به طور خلاصه میتوان گفت نقش موثر نانوذرات گرافیت مورد استفاده در سیال برشی در فرایند ماشینکاری را می‌توان به ویژگیهای مثبت و ذاتی این ماده مربوط دانست. گرافیت به عنوان یکی از آلوتروپ‌های کربن بوده و پایدارترین شکل کربن در شرایط استاندارد است. ساختار لایه لایه گرافیت وجود پیوند واندروالسی ضعیف بین لایه‌ها سبب میشود که لایه‌های گرافیت براحتی روی همدیگر لغزیده و قابلیت روانکاری مناسب را ایجاد کنند. همچنین گرافیت دارای ضریب هدایت حرارتی و الکتریکی بسیار بالایی است. بنابراین طبیعی است با اضافه شدن چنین ماده‌ای در سیال برشی به مقدار مناسب، در ضمن کاهش اصطکاک و افزایش روانکاری، بتوان انتقال حرارت ایجاد شده در بین ابزار و قطعه کار در حین ماشینکاری را تسریع بخشید. مطابق آنچه در نتایج تحقیق حاضر نیز دیده شده است، چنین رفتاری مستقیماً سبب کاهش سایش ابزار، افزایش صافی سطح، کاهش عمق متاثر از تنش براده برداری و در کل سبب بهبود قابلیت ماشینکاری شده است.

در پایان ذکر این نکته ضروری است که علاوه بر اینکه نتایج این تحقیق از تکرارپذیری مناسبی برخوردار بوده‌اند، آزمایش‌های انجام شده نیز صحت یکدیگر را اثبات نموده‌اند. به عنوان مثال، زبری سطح نمونه‌ها که با معیار  $Ra$  گزارش گردیده است علاوه بر اینکه در نتیجه سنجش صافی سطح از سه قسمت مختلف قطعه انجام شده است، با تصاویر SEM از سطح نمونه همخوانی دارند. زبری سطح بیشتر در این تصاویر موید  $Ra$  بزرگتر بوده است. همچنین سایش شدیدتر نوک ابزار در مواردی مشاهده شده‌اند که نمونه صافی سطح پایین‌تری داشته است. بدیهی است که هندسه نوک ابزار بر صافی سطح بی‌تأثیر نبوده است.



**Fig. 12** Cutting edges of tools after machining with 1mm depth of cut and a) feed rate of 0.25 mm/rev without graphite nanoparticles, b) feed rate of 0.25 mm/rev with graphite nanoparticles, c) feed rate of 0.35 mm/rev without graphite nanoparticles, d) feed rate of 0.35 mm/rev with graphite nanoparticles

شکل 12 لبه برشی تیغچه‌ها بعد از ماشینکاری با عمق برشی 1 میلیمتر و (a) سرعت پیشروی 0.25 میلیمتر بر دور بدون حضور نانوذرات گرافیت، (b) سرعت پیشروی 0.25 میلیمتر در حضور نانوذرات گرافیت (c) سرعت پیشروی 0.35 میلیمتر بر دور بدون حضور نانوذرات گرافیت (d) سرعت پیشروی 0.35 میلیمتر بر دور در حضور نانوذرات گرافیت

#### 4- نتیجه گیری

تأثیر استفاده از نانوذرات گرافیت در روانساز بر کیفیت سطحی قطعه نهایی و قابلیت ماشینکاری فولاد 16MnCr5 مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شد که:

- 1- نیروی وارده در حین ماشینکاری سبب ایجاد کشیدگی در ریزساختار نمونه‌های ماشینکاری شده گردیده است که افزایش سرعت پیشروی و عمق براده برداری شدت این پدیده را بیشتر کرده است.
- 2- استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت به سبب کاهش میزان



- Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 35-41, 2015. (in Persian فارسی)
- [4] B. Davoodi, S. H. Musavi, An experimental investigation of the effect of lubrication method on surface roughness and cutting fluid consumption in machining of super alloys, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 343-352, 2016. (in Persian فارسی)
- [5] A. Gholipour, V. Zakeri Mehrabad, A. Hejavari, Experimental investigation of the effects of machining parameters and lubrication on consumed power and surface roughness in CK45 steel milling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 10, pp. 80-84, 2014. (in Persian فارسی)
- [6] *ASM Metals Handbook*, Vol. 16, ninth Edition, pp. 43-45, Materials Park, OH, ASM International, 1995.
- [7] Y. Yildiz, M. Nalbant, A review of cryogenic cooling in machining processes, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 9, pp. 947-964, 2008.
- [8] J. Zhu, P. Yan, L. Jiao, Z. Peng, P. Wang, X. Wang, Y. Rong, Effect of cutting fluids on corrosion properties and turning surface quality of Fe-based superalloy, *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9, No. 11, pp. 1-9, 2017.
- [9] M. Asadi, S. Saedodin, Nanofluids in different industrial and engineering applications, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 6, No. 4, pp. 51-55, 2016. (in Persian فارسی)
- [10] X. Wang, X. Xu, U. S. Choi, Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture, *Journal of Thermophys Heat Transfer*, Vol. 13, No. 4, pp. 474-480, 1999.
- [11] Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nano fluids, *International Journal of Heat Fluid Flow*, Vol. 21, No. 1, pp. 58-64, 2000.
- [12] A. Verma, W. Jiang, H. H. Abu Safe, W. D. Brown, A. P. Malshe, Tribological behavior of deagglomerated active inorganic nanoparticles for advanced lubrication, *Tribology Transactions*, Vol. 51, No. 5, pp. 673-678, 2008.
- [13] M. R. Shabgard, M. Jafarian Zenjanab, R. azarafza, Experimental study on the influence of CuO nanofluid on surface roughness and machining force in turning of AISI 4340 steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 27-33, 2014. (in Persian فارسی)
- [14] M. Shabgard, B. Khosrozadeh, Comparative study of adding nanopowders in dielectric effects on outputs and surface integrity of Ti-6Al-4V alloy in Electrical Discharge Machining, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 41-50, 2016. (in Persian فارسی)
- [15] Y. Hwang, J. Lee, C. Lee, Y. Jung, S. Cheong, C. Lee, B. Ku, S. Jang, Stability and thermal conductivity characteristics onanofluids, *Thermochimica Acta*, Vol. 455, No. 1, pp. 70-74, 2007.
- [16] S. Khalilpourazary, S. S. Meshkat, Investigation of the effects of alumina nanoparticles on spur gear surface roughness and hob tool wear in hobbing process, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 71, No. 9, pp. 1599-1610, 2014.
- [17] A. Sadighzadeh Benam, S. Yazdani, B. Avishan, Effect of shot peening process on fatigue behavior of an alloyed austempered ductile iron, *China Foundry*, Vol. 8, No. 3, pp. 325-330, 2011.
- [18] M. R. Vaziri Sereshk, The investigation of fatigue failure of machined thin walled structures, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 11-19, 2013. (in Persian فارسی)

اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و همچنین کاهش نیروی وارده در حین براده برداری سبب کاهش شدت جهت‌گیری‌ها نسبت به حالتی که سیال برشی آب صابون معمولی استفاده می‌شود، گردیده است.

3- نیروی براده برداری در حین ماشینکاری به سبب ایجاد تنش‌های پسماند و تغییر شکل پلاستیک سبب ایجاد کار سختی در سطح و زیر سطح شده و در نتیجه سختی در این نواحی، نسبت به سختی قطعه خام افزایش یافته است. استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت به علت کاهش نیروی براده برداری و کاهش اصطکاک، سبب کاهش عمق لایه متاثر از نیروی ماشینکاری و همچنین کاهش سختی این لایه شده است.

4- نتایج، نشان می‌دهند کاهش سرعت پیشروی، کاهش عمق براده برداری و استفاده از سیال برشی حاوی نانوذرات گرافیت همگی در دستیابی به سطح مناسب تر با صافی سطح بیشتر تأثیرگذار بوده‌اند.

5- شرایط ماشینکاری با عمق براده برداری و سرعت پیشروی کمتر، سایش ابزار را کمتر کرده است. ضمن این که استفاده از نانوذرات گرافیت در سیال برشی بر کاهش وزن ابزار برشی مؤثر بوده و سایش ابزار را کاهش داده است.

6- نتایج نشان داده‌اند عدم استفاده از نانوذرات گرافیت در سیال برشی باعث ایجاد شکست و لب پریدگی در نوک ابزار برشی در سرعت‌های پیشروی بالای ماشینکاری شده است. این در حالی است که استفاده از نانوذرات گرافیت به سبب کاهش اصطکاک بین ابزار و قطعه کار و کاهش نیروی براده برداری و کاهش شدت درگیری لبه ابزار با سطح ماشینکاری باعث شده است تا لب پریدگی در لبه ابزار مشاهده نشده و همچنین لبه ساییده شده ابزار کوچک تر نیز باشد.

## 5- مراجع

- [1] H. Hassanpour, A. Rasti, M. H. Sadeghi, M. H. Saadatbakhsh, A. R. Omiddodman, Effect of cutting fluid application on surface roughness in hard milling of 4340-alloyed steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 14, pp. 50-60, 2015. (in Persian فارسی)
- [2] B. Heydari, M. M. Abootorabi, H. R. Karimi Zarchi, The effect of workpiece hardness and cutting parameters on surface roughness in dry hard turning of X210Cr12 cold tool steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 6, pp. 241-247, 2017. (in Persian فارسی)
- [3] H. Hassanpour, A. Rasti, M. H. Sadeghi, Surface integrity in high speed machining of Ti6Al4V alloy in presence of minimum quantity lubrication,