مجله مهندسی ساخت و تولید ایران، آبان 1399، دوره 7، شماره 8، ص‌ص. 10- 18

ماه‌نامه علمی پژوهشی

مهندسی ساخت و تولید ایران

www.smeir.org

بررسی اثر توپوگرافی سطح چرخ سنگ و محیط خنک‌کار-روان‌کار بر بارگذاری سنگ در فرایند سنگ‌زنی اینکونل 738 با استفاده از پردازش تصویر

محمد جعفر حداد[1*]، جواد مکاریان[2]، محسن دهقانپور ابیانه[2]

1- استادیار، مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک-ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران

* تهران، صندوق پستی 515-14395، mjhadad@ut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 23 اسفند 1398

داوری اولیه 14 فروردین 1399

پذیرش: 18 فروردین 1399

کلیدواژگان:

سنگ‌زنی

پردازش تصویر

بارگذاری سنگ

توپوگرافی سطح سنگ

درسینگ

چکیده

بارگذاری سنگ در فرایند سنگ‌زنی به علت چسبیدن و جوش خوردن براده‌های جدا شده از سطح قطعه کار در فضای خالی بین دانه‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است. میزان این بارگذاری تابع عواملی همچون جنس قطعه‌کار، شرایط سنگ‌زنی، شرایط خنک‌کار-روان‌کار و توپوگرافی سطح سنگ است. مشخص کردن زمان دفع براده‌های موجود از سطح سنگ یکی از متغیرهای مهم در فرایند سنگ‌زنی است که باعث جلوگیری از چسبیدن براده‌های بارگذاری شده به روی سطح قطعه‌کار و در نتیجه افزایش زبری و عیوب سطح می‌شود. روش‌های متعددی برای آنالیز و پایش وضعیت شرایط سطح سنگ وجود دارد که در این پژوهش با استفاده از پردازش تصویر در نرم‌افزار پایتون به مقایسه ی بین شرایط متفاوت درسینگ و محیط‌های خنک‌کار-روان‌کار بر میزان بارگذاری سطح سنگ پرداخته می‌شود. در تحقیق حاضر با بررسی تصاویر مربوط به سطح سنگ در مراحل قبل و بعد از فرایند سنگ‌زنی اینکونل 738 تحت شرایط مختلف خنک‌کار-روان‌کار، شرایط بهینه برای توپوگرافی سطح سنگ و همچنین سرعت پیشروی قطعه کار هنگام فرایند سنگ‌زنی به منظور جلوگیری از بارگذاری بیش از حد ارائه شده است. بطورکلی با انجام درسینگ خشن و کاهش سرعت پیشروی قطعه کار هنگام فرایند سنگ‌زنی می‌توان میزان بارگذاری چرخ سنگ را کاهش داد.

Investigation of the effects of wheel surface topography and coolant-lubricant types on wheel loading in grinding of Inconel 738 using image processing method

Mohammadjafar Hadad[1*], Javad Makarian[2], Mohsen Dehghanpour[3]

Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

* P.O.B. 14395-515 Tehran, Iran, mjhadad@ut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 14 March 2020
First Decision: 2 April 2020
Accepted: 6 April 2020

Keywords:
Grinding
Image Processing
Wheel Loading
Grinding Wheel Topography
Dressing

Abstract

Wheel loading in the grinding process is inevitable due to the chips arrangement separated from the surface of the workpiece in the gap between the grains. The amount of this loading depends on the factors such as workpiece material, grinding parameters, coolant-lubricant conditions and wheel surface topography. Determining the time to remove the chips from the wheel surface is one of the important variables in the grinding process, preventing the chips from sticking to the surface of the wheel and thus increasing the roughness of the surface. There are several methods for analyzing and monitoring the condition of wheel surface. In this study the influence of dressing condition and coolant-lubricant environments on the wheel surface loading has been investigated using image processing in python software. Using the examination of wheel surface images in pre and post grinding process of Inconel 738 under various condition of coolant-lubricant, optimal conditions for grinding wheel surface topography as well as workpiece feed rate are provided to prevent excessive loading.

1- مقدمه

فرایند سنگ‌زنی یکی از روش‌های نهایی دقیق جهت ایجاد زبری و بافت‌های مختلف روی سطح قطعات می‌باشد. در این روش دانه‌های ساینده بهم چسبیده (چرخ سنگ) با سرعت بالا با سطح قطعه‌کار برخورد کرده و با ایجاد خراش‌های ریز با جداکردن براده، عمل پرداخت سطوح را انجام می‌دهند. چرخ سنگ‌های مختلف مورد استفاده در این فرایند علاوه بر تفاوت در شکل هندسی، دارای تفاوت در توپوگرافی سطح از جمله در فضای خالی بین دانه‌ها (تخلخل)، نوع واندازه دانه‌ها، نوع و مقدار چسب نگهدارنده دانه‌ها می‌باشند که بر عملکرد فرایند و بخصوص انرژی مصرفی فرایند، دما و توپوگرافی نهایی سطح قطعه‌کار مؤثر است [1]. از طرفی، با انتخاب یک نوع چرخ سنگ می‌توان با استفاده از عملیات آماده سازی چرخ سنگ که تحت عنوان فرایند درسینگ (تیزکردن سنگ) نامگذاری می‌شود،

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

M.J. Hadad, J. Makarian, M. Dehghanpour, Investigation of the effects of wheel surface topography and coolant-lubricant types on wheel loading in grinding of Inconel 738 using image processing method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 8, pp. 10- 18, 2020 (in Persian)

توپوگرافی سطح سنگ را نیز تغییر داد. در این فرایند ابزار درسر[1] ثابت تک لبه یا چند لبه و یا ابزار چرخان با پیشروی در راستای محوری چرخ سنگ و نفوذ شعاعی به محیط چرخ سنگ و برخورد با دانه‌ها، باعث شکست و یا جدایش دانه‌های ساینده از سطح سنگ و در نتیجه ایجاد دانه‌های تیز و افزایش تعداد لبه‌های فعال برشی در سطح سنگ می‌شود. از وظایف دیگر درسینگ در فرایند سنگ‌زنی می‌توان به دفع براده‌های چسبیده و جوش خورده روی دانه‌ها و در فضای خالی بین دانه‌ها و همچنین ایجاد فضای خالی جهت پرشدن توسط سیال برشی و ارسال آن به منطقه سنگزنی می‌باشد. نکته قابل توجه این است که با تغییر در پارامترهای درسینگ نظیر سرعت پیشروی و عمق درسینگ و همچنین نوع ابزار درسر (ثابت یا چرخان) می‌توان توپوگرافی‌های متفاوتی بر روی سطح سنگ و در نهایت توسط فرایند سنگ‌زنی بر سطح قطعه‌کار ایجاد کرد. در چرخ سنگ‌های سنتی با ذرات ساینده آلومینا و سیلیکون کارباید، همانند شکل 1 جهت ایجاد پروفیل دلخواه روی سطح چرخ سنگ استوانه‌ای، درسر در راستای شعاعی به چرخ سنگ نفوذ کرده و سپس با پیشروی عرضی، پروفیل مورد نظر روی چرخ سنگ ایجاد می‌شود. در هر پاس سنگ‌زنی لایه‌ای به عمق α_d از سطح چرخ سنگ برداشته می‌شود. پیشروی درسر در راستای عرضی به ازاء هر دور دوران چرخ سنگ، گام درسینگ نامیده می‌شود و از رابطه (1) به دست می‌آید [1]:

$$s_d = \frac{\pi\, d_s\, v_d}{v_s} \qquad (1)$$

به گونه‌ای که v_d سرعت پیشروی عرضی درسر، v_s سرعت خطی چرخ سنگ و d_s قطر چرخ سنگ می‌باشد.

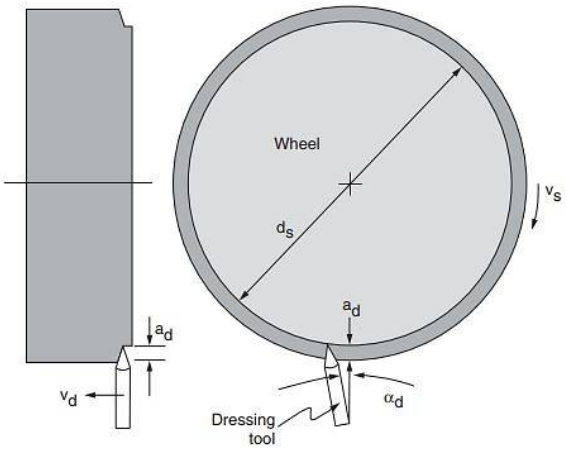

Fig. 1 Schematic of dressing process

شکل 1 تصویر شماتیک از فرایند درسینگ سطح چرخ سنگ

[1] Dresser

برای درس کردن سطح چرخ سنگ بین دو تا پنج پاس مورد نیاز است. در پایان عملیات درسینگ چندین پاس بدون بار[2] انجام می‌گیرد به گونه‌ای که درسر بدون این که دارای بار شعاعی باشد فقط در راستای عرضی چرخ سنگ حرکت میکند. این امر بدون باربرداری از چرخ سنگ می‌باشد و فقط باعث ظریف شدن توپوگرافی سطح چرخ سنگ می‌گردد. ابزار درسینگ ممکن است که یک الماس طبیعی (تک لبه) و یا چندین لبه الماس به شکل دسته یا تیغه و یا چیدمان غیرمنظم که توسط یک باند فلزی نگه داشته شده‌اند، باشد. ابزار تک لبه معمولاً با زاویه بین α_d=10-15° نسبت به سطح چرخ سنگ درگیر می‌شود (زاویه حمله). در استفاده مداوم از درسر تک لبه، سر الماس آن به تدریج کند شده و در نتیجه توپوگرافی سطح چرخ سنگ و رفتار فرایند سنگ‌زنی نیز تغییر خواهد کرد. بنابراین نیاز است تا هر چند تعداد عملیات درس، ابزار را تعویض یا تیز کرد [2- 4].

در فرایند سنگزنی تعداد زیادی لبه برشی (دانه‌های سنگ) با سطح قطعه کار تماس داشته و براده برداری می کنند. در این شرایط، مالش[3] و اصطکاک چسبنده[4] سهم قابل توجهی در تماس بین سنگ و قطعه کار دارد [5]. وجود سیال در ناحیه تماس سنگ-قطعه کار دارای کارکردهای اصلی از جمله؛ دفع گرما و خنک کاری ناحیه سنگ زنی، روانکاری ناحیه تماس و کاهش نیروهای اصطکاکی، محافظت از قطعه کار و ماشین در برابر خوردگی و تمیز کردن سطح سنگ و نیز دفع براده از ناحیه تماس سنگ/قطعه کار می‌باشد [6- 8]. امروزه استفاده از سیستم‌های خنک‌کاری با مصرف زیاد سیال برشی در محیطهای تولیدی به علت اثرات مضر سیالات برشی بر محیط زیست و اپراتور، هزینه‌های تأمین، دفع و بازیابی سیالات برشی در حال کاهش می‌باشد. یکی از جایگزین‌های در حال توسعه برای سیالات برشی، روان‌کاری کمینه می‌باشد. در تکنیک سنگزنی با روان‌کاری کمینه[5] (که تحت عنوان سنگزنی تقریباً خشک[6] یا سنگزنی نیمه خشک[7] نیز شناخته شده است) از حداقل مقدار خنک‌کار/روان‌کار[8] جهت عملیات ماشین‌کاری استفاده می‌شود [9]. در این فرایند اسپری مخلوط هوای فشرده با فشار کمتر از 6 بار و روغن برشی با نرخ کمتر از 500 میلی لیتر بر ساعت به منطقه ماشین‌کاری پاشیده می‌شود، در صورتی‌که در استفاده

[2] Spark-out
[3] Rubbing
[4] Adhesive Friction
[5] Minimum Quantity Lubricant-MQL Grinding
[6] Near Dry Grinding-NDG
[7] Semi Dry Grinding-SDG
[8] Coolant-Lubricant

سنتی از سیال برشی، پاشش حداقل دو لیتر بر دقیقه سیال به موضع ماشین‌کاری انجام می‌شود [10- 12]. علاوه بر اینکه در این روش عملکرد روان‌کاری مؤثرتری نسبت به ماشین‌کاری خشک و ماشین‌کاری با پاشش پیوسته سیال برشی ایجاد می‌شود، هزینه‌های مصرف سیال و هزینه‌های جانبی نیز به طور چشمگیری کاهش می یابد. این تکنولوژی نوپا بوده و به طور روز افزونی در حال گسترش می باشد. در این تکنیک، جهت پاشش سیال با فشار و دبی معین، از دستگاه‌های MQL استفاده می شود [13- 15]. در این تکنیک نیازی به استفاده از سیستم چرخه روان‌کار نیست. ضمناً به علت این که نیازی به تمیز کاری قطعه کار نیست زنجیره فرایند کوتاهتر شده و از هزینه‌های بیشتر جلوگیری می‌شود [16].

در هنگام سنگ‌زنی برخی مواد، براده‌ها ممکن است در فضای بین دانه‌ها قرارگیرند و یا به دانه‌های ساینده جوش بخورند، به این رخداد، بارگذاری چرخ سنگ گفته می‌شود. این پدیده، دانه‌های ساینده را کند میکند که در نتیجه، سایش فراوان و ارتعاشات در فرایند سنگ‌زنی رخ خواهد داد [17]. همچنین این پدیده، نیروی برشی و درجه حرارت منطقه سنگ‌زنی را افزایش و عمر چرخ سنگ را کاهش می‌دهد. این تغییرات، تأثیرات بسیاری بر فرایند می‌گذارند. دو نوع تقسیم بندی کلی برای بارگذاری وجود دارد که بارگذاری چسبنده و بارگذاری پرکننده نام گرفته‌اند. در بارگذاری چسبنده، براده‌ها به سطح دانه‌های ساینده و باند می‌چسبند و بارگذاری پرکننده به معنی آن است که براده‌ها، تخلخل یا فضای خالی موجود در سطح چرخ سنگ را پر می‌کنند [18، 19]. تحقیقات بسیاری برای توضیح و بررسی مکانیزم بارگذاری انجام شده است که با توجه به آنها می‌توان علت اصلی بارگذاری چرخ سنگ در سنگ‌زنی مواد داکتیل را ذوب شدن و چسبندگی براده‌ها به دانه‌های فعال بیان نمود [6]. ساکاماتو[1] و همکاران به منظور بررسی میزان بارگذاری سطح سنگ از یک لیزر میکرومتری استفاده کردند که با مقایسه بین سطح سنگ در وضعیت قبل و بعد از سنگ‌زنی، وضعیت بارگذاری سطح سنگ ارزیابی شده است [7]. موکبل[2] و مکسود[3] از روش گسیل صوتی به منظور ارزیابی بارگذاری سطح سنگ پرداخته‌اند [8]. روش‌های دیگری مانند بازرسی‌های شیمیایی، اشعه ایکس و اسپکتروسکوپی (طیف سنجی) نیز گزارش شده‌اند [1]. روش‌های ذکر شده به دلیل هزینه‌ی بالای راه‌اندازی و همچنین زمان زیاد تحلیل داده‌ها دارای محدودیت‌های زیادی در حوزه اجرا هستند. با توجه به گسترش و کارآیی تکنیک بینایی ماشین در حوزه مهندسی ساخت و تولید و بالا بودن سرعت پردازش داده‌های بدست آمده، روش‌های پر هزینه و زمان‌بر به هیچ وجه توجیه اقتصادی و عملی ندارند.

سوپر آلیاژ اینکونل 738 جزء سوپرآلیاژهای پایه نیکل است که کاربردهای گوناگونی بخصوص در صنایع نفت و گاز، نیروگاهی و هوافضا دارد. فرایند سنگزنی بطور گسترده‌ای در ساخت قطعات از جنس اینکونل 738 مورد استفاده قرار می‌گیرد. خصوصیات مکانیکی بی نظیر اینکونل‌ها اما باعث مشکلات ماشین کاری آنها برای ساخت قطعات مورد استفاده در صنایع شده است و این فلزات را همانند بیشتر سوپرآلیاژها در رده مواد با خواص ماشین‌کاری ضعیف قرار داده است [19]. سختی و استحکام بالا در حین ماشین‌کاری و همچنین دماهای بالا در منطقه برش موجب تغییر شکل پلاستیکی لبه برشی ابزار و در فرایند سنگزنی باعث افزایش دمای براده و درنتیجه بارگذاری سنگ و ایجاد عیوب سطحی در قطعه نهایی می‌گردد. بعلاوه این آلیاژها با پایه نیکل دارای ناخالصی‌های بسیار ساینده مانند ذرات کاربایدی (که موجب بالا رفتن مقاومت در برابر خزش می‌شود) هستند و در ضمن میل به کار سخت شدن در حین ماشین کاری دارند که موجب سایش ابزار می‌شوند؛ لذا سنگزنی این آلیاژها به روش‌های سنتی پیچیده بوده و این امر، رسیدن به یک کیفیت سطح مطلوب و نیز اقتصادی را مشکل می‌سازد.

با بررسی پیشینه پژوهش‌های انجام شده در زمینه فرایند سنگ‌زنی و تکنیک‌های درسینگ، می‌توان دریافت که تاکنون توپوگرافی‌های مختلف چرخ سنگ در سنگ‌زنی اینکونل 738 در شرایط مختلف خنک‌کار-روان‌کار بررسی نشده است. بنابراین در پژوهش حاضر، اثر درسینگ و توپوگرافی ایجاد شده توسط ابزار درسر تک لبه ثابت بر فرایند سنگ‌زنی اینکونل 738 بصورت تجربی بررسی شده است. بدین منظور، مقادیر مختلف پارامترهای درسینگ شامل عمق و سرعت پیشروی درسر و همچنین شرایط مختلف سنگ‌زنی با روان‌کاری کمینه و پاشش پیوسته سیال برشی جهت بررسی اثر توپوگرافی سطح سنگ و دانه‌های ساینده بر عملکرد فرایند مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. عملکرد فرایند شامل بارگذاری سطح سنگ، توپوگرافی سطح سنگ قبل و بعد از فرایند سنگ‌زنی و نیز بررسی براده‌های حاصل از فرایند سنگ‌زنی می‌باشد.

[1] Sakamoto
[2] Mokbel
[3] Maksoud

2- مشخصات تجهیزات و روش انجام آزمایش‌ها

در مطالعه حاضر به منظور انجام آنالیز و بررسی میزان بارگذاری سطح سنگ در شرایط مختلف درسینگ و نیز محیط‌های مختلف خنک‌کار-روان‌کار در هنگام سنگ‌زنی، آزمایش‌های مختلف با شرایط نشان داده شده در جدول 1 بر روی ماشین سنگ PROMPT-SG-5010AH انجام شده است. در شکل 2 چیدمان فرایند درسینگ و نیز سنگ‌زنی قطعه‌کار نشان داده شده است. درسینگ سنگ مطابق با شرایط جدول 1 و چیدمان شکل 2 و با پاشش پیوسته سیال برشی و با تکرار سه مرتبه انجام شده است. تصاویر سطح سنگ با استفاده از دوربین دیجی میکرو (ساخت شرکت DNT) با قابلیت ثبت تصاویر به صورت مستقیم، وضوح (1600×1200) پیکسل و بزرگنمایی 200 برابر گرفته شد که امکان مشاهده سطح سنگ را با وضوح مناسب برای کاربر فراهم می‌کند. روش ارائه شده در این پژوهش به منظور بررسی میزان بارگذاری سطح سنگ؛ استفاده از تحلیل تصویر با زبان برنامه‌نویسی پایتون است. پس از هر مرحله درسینگ از نقاط مختلف سطح سنگ عکس‌برداری شده و با تصاویر بعد از سنگ‌زنی مقایسه شده و در نتیجه میزان بارگذاری سنگ به صورت نمودار و تصاویر حقیقی از سطح سنگ نشان داده شده است. ناحیه‌بندی در پردازش تصویر یکی از پارامترهای مهم به منظور تحلیل هرچه بهتر تصاویر دریافتی می‌باشد.

جدول 1 شرایط سنگ‌زنی

Table 1 Grinding conditions

متغیرها	مقادیر
سرعت پیشروی درسر V_d(mm/min)	600-426-213-86-50
دبی سیال برشی (lit/min)	4/5
دبی روغن در تکنیک روان‌کاری کمینه (cc/h)	125
فشار هوا در تکنیک روان‌کاری کمینه (bar)	5
عمق سنگ‌زنی a_p(µm)	30
سرعت پیشروی قطعه کار V_w(m/min)	15 -4/5
سرعت چرخ سنگ V_s(m/s)	30
چرخ سنگ	WA60K9V
قطعه کار	Inconel 738; (160mm×50mm×16mm)
نوع درسر	الماس تک لبه
زاویه قرار گیری درسر (درجه)	10
عمق درسینگ a_d(µm)	5-10
عمق درسینگ کل(a_{dt})	15-30

روش‌ها و الگوریتم‌های متفاوتی به منظور مرزبندی در مبحث پردازش تصویر وجود دارد که در بعضی از روش‌ها برای جداسازی بین سطح سنگ اکسید آلومینیوم و براده‌های چسبیده شده به سطح سنگ از روش‌های دستی و در برخی موارد، از روش‌های کاملاً خودکار استفاده می‌شود.

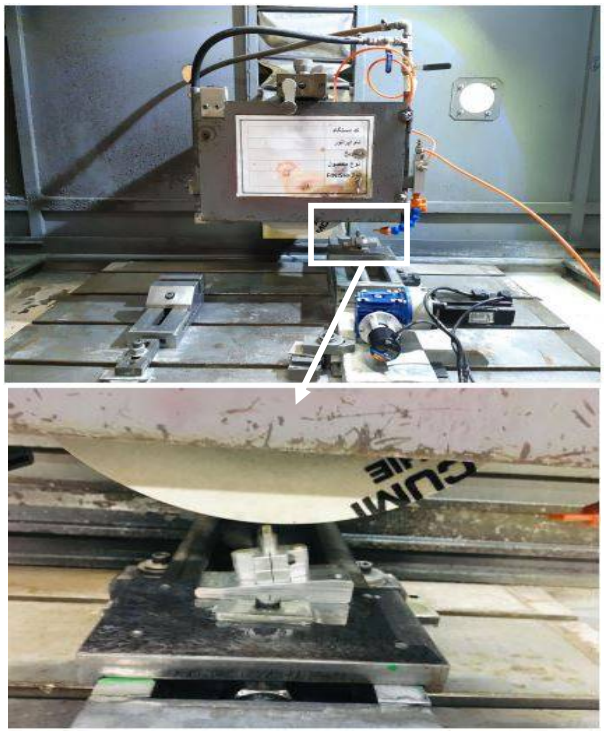

Fig. 2 Experimental setup

شکل 2 چیدمان انجام آزمایش‌ها

روش متداول و پرکاربردی که اغلب به منظور مرز بندی در پژوهش‌ها انجام می‌شود، روش حد آستانه می‌باشد که بر مبنای دو رنگ سیاه و سفید و یا ترکیب این دو رنگ، تصاویر گرفته شده به تصاویر باینری تبدیل شده و در نتیجه میزان بارگذاری توسط نرم‌افزار تعیین خواهد شد. لازم به ذکر است که دوربین مورد استفاده در این پژوهش دارای 8 عدد لامپ به صورت دایره‌ای در اطراف لنز دوربین بوده که باعث ایجاد نور یکنواخت بر روی سطح شده است. اما با توجه به این موضوع که سنگ اکسید آلومینیوم دارای زمینه سفید رنگ است، نور بازتابی از سطح باعث ایجاد نقاط روشن بر روی براده‌های چسبیده شده بر روی سنگ می‌شود که در این صورت روش حد آستانه[1] که بر مبنای تصاویر باینری شده عمل می‌کند دچار خطا در تشخیص برادهای موجود بر روی سطح می‌شود. در این پژوهش به منظور جلوگیری از بروز خطا در شناسایی، از اختلاف میانگین RGB هر پیکسل جهت شناسایی و مرزبندی تصاویر استفاده شده است. خطای سطح با استفاده از یک کد توسعه داده شده بر پایه زبان

[1] Threshold technique

برنامه‌نویسی پایتون، میانگین RGB هر پیکسل عکس به عنوان یک داده توسط نرم‌افزار شناسایی شده است. با مرجع قراردادن عدد 25 به عنوان شاخص تشخیص براده که در نرم‌افزار Adobe Illustrator مورد ارزیابی قرار گرفته است، در صورت وجود اختلاف میانگین RGB دو پیکسل مشابه در بازه ذکر شده، نرم‌افزار داده بدست آمده از سطح سنگ را به عنوان براده شناسایی و پس از بررسی پیکسل‌ها و ضرب در عدد صد، مقدار بدست آمده را به عنوان چگالی نسبی براده معرفی می‌کند.

3- تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

درسینگ چرخ سنگ قبل از فرایند سنگ‌زنی و همچنین محیط خنک‌کار-روان‌کار در هنگام فرایند سنگ‌زنی از عوامل مهم بر مکانیزم تشکیل براده، توان مصرفی و گرمای ایجاد شده در منطقه سنگ‌زنی می‌باشند. در زمان انجام درسینگ سنگ، ضریب همپوشانی یکی از عوامل مؤثر در تعیین توپوگرافی سطح سنگ می‌باشد (شکل 3). این تأثیر با توجه به رابطه (2) ارائه می‌شود:

$$u_d = \frac{f_{ad}}{b_d} \qquad (2)$$

که در آن، f_{ad} نشان دهنده گام حرکتی و b_d بیانگر پهنای درسر در سطح درگیری با سنگ می‌باشد.

شکل 4 میزان بارگذاری سطح سنگ با افزایش سرعت پیشروی و عمق درسینگ در شرایط روان‌کاری مختلف در هنگام سنگ‌زنی را نشان می‌دهد. در نمودارهای این شکل محور عمودی، میزان چگالی براده بر روی سنگ و محور افقی بیان‌کننده سرعت پیشروی درسر است. مطابق با نتایج بدست‌آمده از تحلیل‌های انجام گرفته در نرم‌افزار، با توجه به ثابت بودن میزان عمق درسینگ و عمق سنگ‌زنی، با تغییر شرایط خنک‌کار-روان‌کار و سرعت پیشروی درسر و همچنین سرعت پیشروی قطعه‌کار در هنگام سنگ‌زنی، میزان بارگذاری سطح سنگ دچار تغییر شده است.

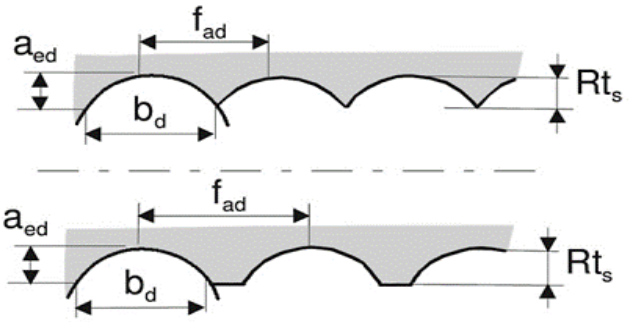

Fig. 3 Influence of dressing feed velocity on overlap coefficient

شکل 3 تأثیر سرعت پیشروی درسر بر میزان ضریب همپوشانی

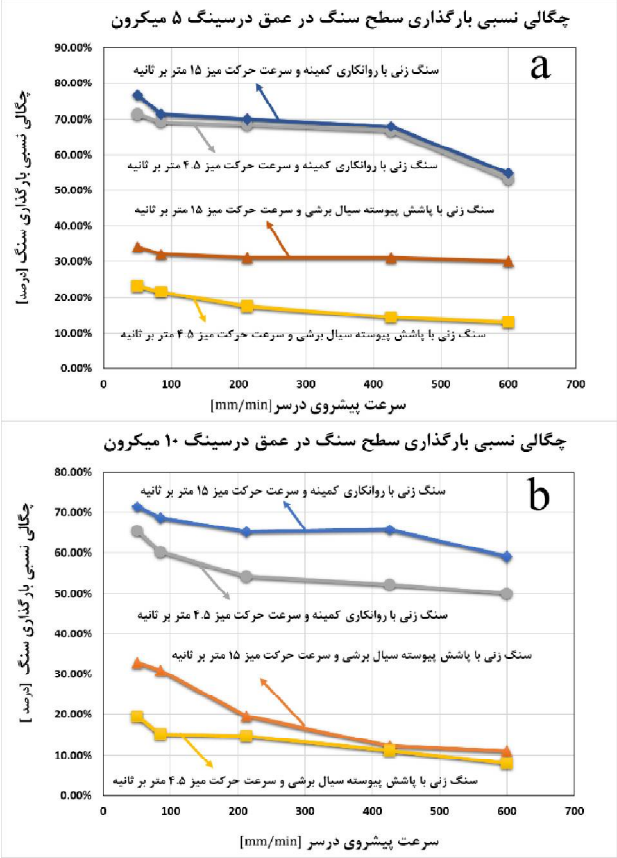

Fig. 4 Wheel loading density Vs dressing feed rates and coolant lubricant types

شکل 4 چگالی بارگذاری سطح سنگ در شرایط مختلف درسینگ و دو محیط خنک‌کار-روان‌کار

همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش سرعت خطی درسر کاهش ضریب هم پوشانی سطح سنگ (U_d) را مطابق با رابطه (2) به دنبال دارد؛ که این امر به دلیل افزایش تخلخل سطح سنگ و کاهش تعداد لبه‌های برشی فعال در واحد سطح سنگ می‌باشد.

کاهش تعداد لبه‌های برشی فعال در منطقه سنگ‌زنی بیان‌کننده افزایش تخلخل موجود بر روی سطح سنگ و در نتیجه فضای باز بیشتر به منظور تجمع براده‌ها می‌شود و از طرفی می‌تواند افزایش زبری سطح را نیز به دنبال داشته باشد. همانگونه که در شکل 4 مشاهده می‌شود میزان چگالی براده‌ها در سرعت‌های پایین پیشروی درسینگ بیشتر بوده که نشان‌دهنده پرشدن بیشتر خلل و فرج موجود بر روی سطح سنگ توسط براده‌ها تحت شرایط سنگ‌زنی یکسان می‌باشد. افزایش تعداد دانه‌های فعال در منطقه سنگ‌زنی باعث بوجود آمدن پدیده‌های شخم زنی و مالش (اصطکاک) بیشتر ناشی از دانه‌ها شده که این مسئله افزایش حرارت در منطقه درگیری را به دنبال دارد؛ بنابراین افزایش میزان ذوب شدگی براده‌ها و در

نتیجه بارگذاری سنگ را در پی دارد. با توجه به نمودارهای مربوط به عمق درسینگ 5 و 10 میکرون با شرایط یکسان و سرعت پیشروی مختلف قطعه‌کار، می‌توان مشاهده کرد که با کاهش سرعت پیشروی قطعه‌کار در هنگام سنگ‌زنی از 15متر بر دقیقه به 4/5 متر بر دقیقه میزان بارگذاری سطح سنگ نیزکاهش پیدا کرده که این تغییر در میزان پر شدن سطح سنگ به نرخ براده‌برداری در فرایند سنگ‌زنی ارتباط دارد.

با افزایش سرعت پیشروی قطعه‌کار تعداد و میزان نفوذ دانه‌ها به داخل قطعه‌کار بیشتر شده و در نتیجه حجم براده‌های ایجاد شده می‌باشد. از طرفی افزایش میزان درگیری سنگ با قطعه کار، سایش بیشتر دانه‌ها و نرخ بارگذاری بالاتر سطح سنگ را به دنبال دارد. با توجه به رابطه (3) می‌توان تأثیر ضخامت براده بر میزان حجم براده برداری و در نتیجه بارگذاری سنگ را مشاهده کرد:

$$V_{cu} = b_{cu} \times h_{cu} \times l_c \qquad (3)$$

که در آن، l_c مسیر حرکت یک دانه بر روی سطح، h_{cu} ضخامت براده و b_{cu} پهنای براده به ازای هر دانه می‌باشد.

در شکل 5 توپوگرافی سطح سنگ در شرایط مختلف درسینگ از قبیل سرعت پیشروی و عمق درسینگ را نشان می‌دهد. بزرگتر بودن و کاهش تعداد لبه‌های برنده دانه‌ها با افزایش سرعت پیشروی درسر[1] و نیز با افزایش عمق درسینگ[2] قابل مشاهده است.

با جمع آوری دانه‌های جدا شده از سطح سنگ در هر دو عمق درسینگ 5 و 10 میکرون به بررسی نوع شکست دانه‌ها پرداخته شده است. اندازه دانه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Image J مورد بررسی قرار گرفت که در شکل 6 تفاوت دراندازه دانه‌های جدا شده مشاهده می‌گردد. میانگین قطر دانه‌های اولیه سنگ نیز در این نمودار از رابطه $d_g = 15.2m^{-1}$ محاسبه شده است که در آن m عدداندازه سنگ می‌باشد.

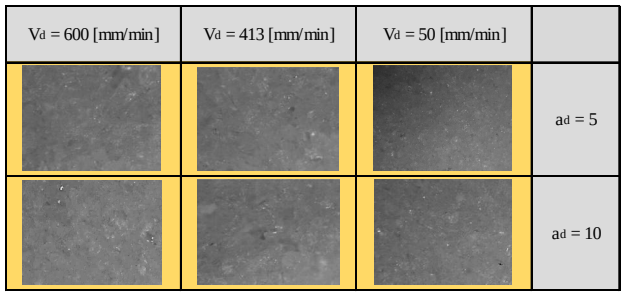

Fig. 5 Wheel surface topography after dressing using various dressing parameters

شکل 5 تصاویر سطح سنگ پس از انجام درسینگ در شرایط مختلف

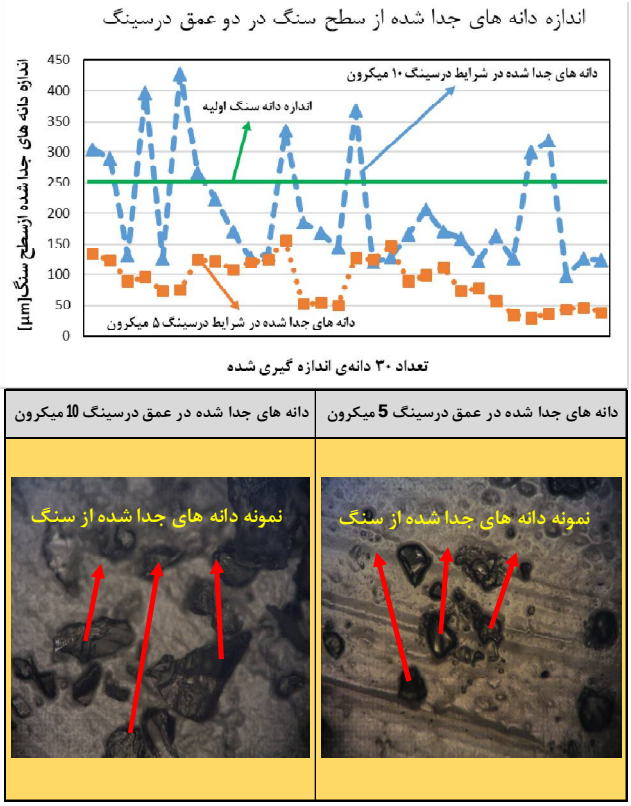

Fig. 6 Grain size distribution removed by single point dressing processes

شکل 6 اندازه دانه‌های جدا شده از سطح سنگ در شرایط متفاوت درسینگ

همان‌گونه که مشاهده می‌شود با افزایش عمق درسینگ ابعاد دانه‌های اندازه‌گیری شده به مراتب بزرگتر می‌باشد که این عامل حتی می‌تواند منجر به شکست دانه‌ها از محل اتصال و کاهش تعداد دانه‌های فعال در منطقه سنگ‌زنی شود.

سیال برشی یکی از مهمترین عوامل در میزان بارگذاری سطح سنگ است. با وجود مزایای محیطی کمتر و کاهش زبری سطح قطعه‌کار و همچنین هزینه پایین کاربرد تکنیک روان‌کار کمینه، اما به دلیل عدم توانایی مطلوب این روش در دفع براده و حرارت از ناحیه سنگ‌زنی، بارگذاری سطح سنگ با مقدار بیشتری نسبت به سیستم پاشش پیوسته خنک‌کار-روان‌کار رخ می‌دهد. اهمیت توجه به میزان بارگذاری سطح سنگ در شرایط مختلف سنگ‌زنی و درسینگ را می‌توان در نمودارهای ارائه شده در شکل 4 مشاهده کرد.

با توجه به تصاویر ارائه شده در شکل‌های 7 و 8 مشاهده می‌شود که در شرایط استفاده از روان‌کاری کمینه به جای پاشش پیوسته سیال برشی بصورت سنتی، بارگذاری بیشتر براده‌ها بر سطح سنگ بوجود آمده است که دلیل اصلی آن کمتر بودن میزان انتقال حرارت روان‌کاری کمینه نسبت به سیال برشی می‌باشد.

[1] Dressing feed
[2] Depth of dressing

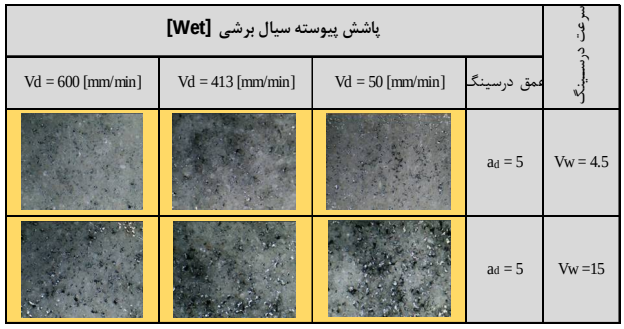

Fig. 7 Wheel loading in wet grinding operation

شکل 7 بارگذاری سطح سنگ در سنگ‌زنی با پاشش پیوسته سیال برشی

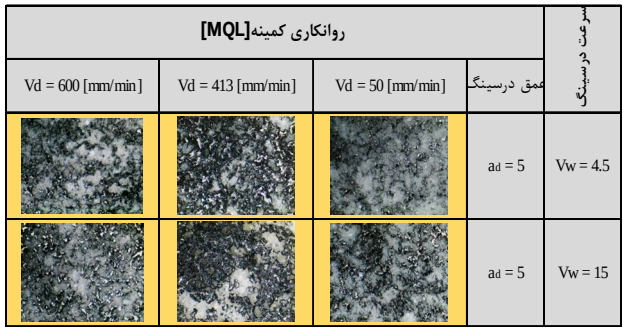

Fig. 8 Wheel loading in MQL grinding

شکل 8 بارگذاری سطح سنگ در سنگ‌زنی با روان‌کاری کمینه

به همین منظور در صورت عدم توجه به میزان بارگذاری سطح سنگ در تکنیک روان‌کاری کمینه افزایش زبری و سوختگی سطح قطعهکار و نیز سایش سنگ بوجود خواهد آمد. شکل 9 توپوگرافی سطح سنگ پس از انجام فرایند سنگ‌زنی در شرایط روان‌کاری کمینه و پاشش پیوسته سیال برشی را نشان می‌دهد.

با توجه به شکل‌های 4 و 5 و 6 می‌توان مشاهده کرد که کاهش میزان بارگذاری سطح سنگ در شرایط خشن درسینگ (افزایش سرعت پیشروی و عمق درسینگ) به دلیل شکست بیشتر دانه‌ها و نیز جداشدن دانه‌ها و در نتیجه کاهش نسبت همپوشانی می‌باشد. برای بررسی توپوگرافی سطح سنگ می‌توان از براده‌های حاصله در شرایط مختلف سنگ‌زنی استفاده کرد. به هر میزان براده‌های جداشده از سطح قطعه‌کار دارای و ضخامت و طول بیشتری باشند، به معنای خراش‌های بزرگ‌تر و با همپوشانی کمتر توسط دانه‌ها بر روی سطح قطعه‌کار می‌باشد. اندازه براده‌ها (طول و ضخامت) به تعداد دانه‌های فعال واندازه دانه‌های سطح سنگ بستگی دارد. با افزایش نسبت همپوشانی در هنگام فرایند فرایند درسینگ، تعداد لبه‌های برشی فعال روی سطح سنگ افزایش می‌یابد. در نتیجه با توجه به رابطه (4) ضخامت براده کاهش می‌یابد.

$$h_m = 2l\,\frac{v_w}{v_s}\left(\frac{a_p}{d_s}\right)^{\frac{1}{2}} - \frac{l^2}{d_e}\left(\frac{v_w}{v_s}\right)^2 \qquad (4)$$

با افزایش تعداد لبه‌های برشی فعال فاصله بین لبه‌های برشی فعال در منطقه سنگ‌زنی کاهش می‌یابد. با کاهش ضخامت و طول براده، زبری سطح قطعه کار کاهش می‌یابد. به دلیل افزایش در تعداد لبه‌های برشی فعال نیروی اصطکاک کل دانه‌ها در منطقه تماس سنگ و قطعه‌کار افزایش می‌یابد و باعث افزایش دما و ذوب و جوش خوردن به هم و به سطح سنگ می‌شود. در شکل 10 براده‌های حاصل از فرایند سنگ‌زنی اینکونل 738 مشاهده می‌شود. چسبندگی و ذوب شدگی براده‌های حاصل از سنگ‌زنی قطعه‌کار با استفاده از سنگ آماده شده با عمق درسینگ 5 میکرون نشان دهنده بالاتر بودن حرارت در منطقه سنگ‌زنی نسبت به عمق درسینگ 10 میکرون می‌باشد. از طرفی مکانیزم‌های شکست دانه بر اثر فرایند درسینگ به چهار حالت کلی تقسیم بندی می‌شود که عمق و سرعت پیشروی درسر در فرایند درسینگ بر نحوه شکست دانه‌ها تأثیرگذار است.

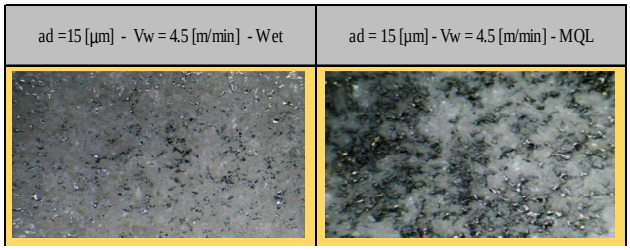

Fig. 9 Wheel loading under different coolant-lubrication conditions

شکل 9 بارگذاری سنگ تحت شرایط مختلف خنک‌کار-روان‌کار مختلف

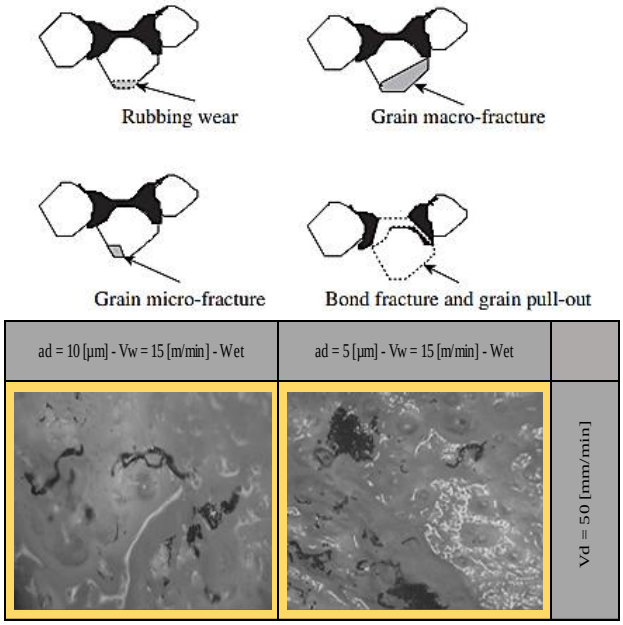

Fig. 10 Grinding chips obtained from various grinding conditions

شکل 10 براده‌های حاصل از سنگ‌زنی اینکونل 738 در شرایط مختلف

با کاهش عمق درسینگ و میکروشکست دانه‌های سنگ، در

واقع تعداد لبه‌های برنده فعال در منطقه سنگ‌زنی افزایش یافته و در نتیجه برآیند اصطکاک ایجاد شده‌ی حاصل از دانه‌ها روند صعودی پیدا خواهد کرد که همین امر منجر به تولید حرارت بیشتر و همچنین ذوب شدگی بیشتر براده‌های جدا شده از سطح خواهد شد.

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر برای اولین بار اثر پارامترهای درسینگ بر فرایند سنگ‌زنی اینکونل 738 تحت شرایط مختلف خنک‌کار-روان‌کار بررسی شده است. پارامترهای عمق و سرعت پیشروی درسینگ به همراه تغییر در سرعت پیشروی قطعه کار در هنگام فرایند سنگ‌زنی نیز در شرایط مختلف بررسی شد و نتایج زیر بدست آمد:

- با استفاده از پاشش پیوسته خنک‌کار-روان‌کار و به دلیل دفع بهتر براده و نیز دفع حرارت ناشی از سنگ‌زنی اینکونل 738 بارگذاری سطح سنگ به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد (چگالی نسبی بارگذاری سنگ در تکنیک روان‌کاری کمینه حدود سه تا چهار برابر مقدار آن در فرایند سنگ‌زنی با پاشش پیوسته سیال برشی می‌باشد).

- در شرایط درسینگ خشن (عمق درسینگ 10μm و سرعت پیشروی درسر 600mm/min) به دلیل نرخ پایین‌تر حرارت و همچنین فضای بیشتر بین دانه‌ها می‌توان از روش روان‌کاری کمینه استفاده کرد که دارای اثرات زیست محیطی و همچنین هزینه‌های کمتری می‌باشد (در این شرایط چگالی نسبی بارگذاری سنگ تقریباً 30% نسبت به شرایط درسینگ ظریف کاهش میابد).

- با کاهش سرعت پیشروی قطعه کار به 4/5m/min در هنگام سنگ‌زنی و در نتیجه کاهش حجم براده برداری، چگالی نسبی بارگذاری سنگ در تکنیک روان‌کاری کمینه تا حدود 33% درصد و در فرایند سنگ‌زنی با پاشش پیوسته سیال برشی تا حدود 15% درصد کاهش میابد.

- تغییر در شرایط درسینگ به دلیل مصرف بالای سیال برشی در دفع براده‌ها در روش پاشش پیوسته سیال برشی با هدف نیل به کمینه کردن مصرف سیالات برشی و همچنین بالا بودن انتقال حرارت، بر میزان بارگذاری سطح سنگ اثر قابل توجهی دارد.

5- فهرست علایم

v_d سرعت پیشروی درسر

a_p عمق سنگ‌زنی

v_w سرعت پیشروی قطعه کار

v_s سرعت سنگ‌زنی

v_{cu} حجم براده

a_{dt} عمق درسینگ کل

h_{cu} ضخامت براده

d_s قطر سنگ

l_c طول براده

d_g اندازه دانه معادل سنگ

v_w سرعت پیشروی قطعه کار

b_d پهنای درگیری درسر

u_d ضریب همپوشانی

f_{ad} گام حرکتی درسر

6- تقدیر و تشکر

از مدیریت محترم و پرسنل بخش تحقیق و توسعه شرکت مپنا-پرتو که شرایط و امکانات انجام تمام آزمایش‌ها را فراهم نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

7- مراجع

[1] Malkin S, Guo C (2008) Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, 2nd edition. Industrial Press Inc, New York, USA.

[2] Tawakoli T, Hadad MJ, Sadeghi MH, Daneshi A, Stöckert S, Rasifard A (2009) An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding. International Journal of Machine Tools & Manufacture 49:924-932.

[3] Tawakoli T, Hadad MJ, Sadeghi MH (2010) Investigation on minimum quantity lubricant-MQL grinding of 100Cr6 hardened steel using different abrasive and coolant-lubricant types. International Journal of Machine Tools & Manufacture 50:698-708.

[4] Tawakoli T, Hadad MJ, Sadeghi MH, Daneshi A, Sadeghi B (2011) Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolant-lubricant types. Journal of Cleaner Production 19:2088-2099.

[5] Davim JP (2008) Machining: fundamentals and recent advances. Springer-Verlag, London, UK.

[6] Sadeghi MH, Hadad MJ, Tawakoli T, Vesali A, Emami M (2010) An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique. International Journal of Material Forming 3:241-251.

[7] Sakamoto H, Shimizu S, Kato D (1998) Evaluation of loading behavior of grinding wheel based on working surface topography. Journal of the japan society for precision engineering 64(9) 1320-1324

[8] Mokbel AA, Maksoud TMA (2000) Monitoring of the condition of diamond grinding wheels using acoustic emission technique. Journal Materials Processing Technology 101(1) 292–297.
[9] Tawakoli T, Hadad MJ, Daneshi A, Sadeghi MH, Sadeghi B (2011) Study on the effects of abrasive and coolant-lubricant types on minimum quantity lubrication-MQL grinding. Advanced Materials Research 325:231-237.
[10] Hadad MJ, Tawakoli T, Sadeghi MJ, Sadeghi B (2012) Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. International Journal of Machine Tools & Manufacture 54-55:10-17.
[11] Rabiei F, Rahimi AR, Hadad MJ, Ashrafijou M (2015) Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization. Journal of Cleaner Production 86:447-460.
[12] Hadad MJ, Sharbati A (2017) Analysis of the effects of dressing and wheel topography on grinding process under different coolant-lubricant conditions. Int J Adv Manuf Technol 90:3727-3738.
[13] Tawakoli T, Hadad MJ, Sadeghi MH (2010) Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding process. International Journal of Machine Tools & Manufacture 50:521-531.
[14] Hadad MJ (2015) An experimental investigation of the effects of machining parameters on environmentally friendly grinding process. Journal of Cleaner Production 108:217-231.
[15] Hadad MJ, Sadeghi B (2013) Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy. Journal of Cleaner Production 54:332-343.
[16] Hadad MJ, Tawakoli T, Sadeghi MH, Sadeghi B (2012) Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. International Journal of Machine Tools & Manufacture 54:10-17.
[17] Hadad MJ, Sadeghi B (2012) Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process. International Journal of Machine Tools & Manufacture 63:1–15.
[18] Sadeghi MH, Haddad MJ, Tawakoli T, Emami M (2009) Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 44:487-500.
[19] Daneshi A (2019) Micro-chip formation mechanism in grinding of Nickel-base superalloy-Inconel 718. Ph.D. Thesis, Department of Microsystems Engineering-IMTEK, Faculty of Engineering, University of Freiburg, Germany.