

## بررسی تجربی سوراخکاری آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 به روش های روانکاری خشک و کمینه

هادی کیانی

نادر براری

سید علی نیک نام\*

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت و ایران، تهران، ایران

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت و ایران، تهران، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت و ایران، تهران، ایران

### چکیده

در فرآیند سوراخکاری کیفیت سطح، نیروهای ماشینکاری، مکانیزم تشکیل و اندازه پلیسه (طول و ضخامت)، سایش و عمر ابزار و همچنین نوع تراشه ها از شاخصه های مهم در تعیین کیفیت سوراخکاری می باشند که اطلاعات کمی در مورد اثر روانکاری کمینه بر آنها موجود است. لذا، بر اساس مطالعات صورت گرفته، هدف از این پژوهش، بررسی تجربی اثرات روش روانکاری کمینه بر نیروی پیشروی، شکل، طول پلیسه، تقسیم بندی سطح تراشه و میانگین زبری سطح در سوراخکاری آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 و مقایسه نتایج با روش سوراخکاری خشک است. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، افزایش سرعت و نرخ پیشروی در حالت های خشک و روانکاری کمینه منجر به کاهش طول پلیسه شده، ولی، تاثیر روش روانکاری کمینه در کاهش طول پلیسه در سرعت های برشی کم مشهود است. مضافاً در سوراخکاری خشک، میانگین زبری سطح کمتری مشاهده شد. سطح آزاد تراشه های جمع آوری شده در سوراخکاری خشک به نسبت حالت روانکاری کمینه دارای صافی سطح بیشتر و تعداد شیارهای موازی کمتری می باشد که نشان دهنده سختی بیشتر در تراشه ها و نیروی بیشتر مورد نیاز جهت عملیات براده برداری در سوراخکاری خشک است.

واژه های کلیدی: سوراخکاری، ماشینکاری، پلیسه، نیروی برشی، روانکاری کمینه.

## Experimental investigation of drilling 6061-T6 aluminum alloys under MQL and dry modes

H. Kiani

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

N. Barari

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

S. A. Niknam

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

In drilling operation, the surface quality, cutting forces, burr formation mechanism and burr size (height, thickness), tool wear and tool life are considered as the important elements for drilling hole quality assessment which low amount of information is available in this regards. Therefore, on the basis of review of literature, the main aim of this work is to study the effects of MQL and dry lubrication strategies on thrust force, surface quality and burr formation morphology and size (height and thickness) when drilling 6061-T6. According to experimental observations, increased speed and feed rate under dry and MQL modes led to lower burr height, while under lower cutting speed, the direct effect of MQL is sensible. In addition, in dry drilling, lower average surface roughness was monitored. Those chips recorded under dry condition have higher quality and less segmentations on the free surface as compared to those chips recorded under MQL mode, which however resembles more hardness on the chips and higher cutting forces required for drilling operation.

**Keywords:** Drilling, Machining, Burr, Cutting force, Minimum quantity lubrication (MQL).

### ۱- مقدمه

مشکلات ثانویه ای از جمله افزایش نیروهای برشی، کاهش عمر ابزار، کیفیت بد سطح و همینطور پلیسه زایی در سطوح و لبه های قطعه کار می شود [۳]. از بعد ظاهری، پلیسه ها گاهی به عنوان یک برآمدگی کوتاه و گاهی به عنوان یک برآمدگی بلند و باریک از قطعه کار به نظر می آیند [۴].

مضافاً تشکیل پلیسه های سوراخکاری منجر به ایجاد مشکلات عدیده ای در فرآیند مونتاژ می شوند. علاوه بر این، نظر به سختی و شکنندگی در انواع مختلف پلیسه ها، جداسازی و پاکسازی لبه قطعات با استفاده از روش های نادرست منجر به ایجاد ترک در لبه قطعه کار

فرآیند سوراخکاری به طور گسترده ای در صنایع و مراکز گوناگون صنعتی و تولیدی استفاده می شود. یکی از مواد پر کاربرد در این صنایع، آلیاژهای آلومینیوم است که به علت قابلیت های مکانیکی و ماشینکاری بالایی که دارند در صنایع مختلفی همچون هوافضا و خودروسازی استفاده می شوند [۱]. در این بین، به جهت استحکام مناسب، مقاومت به خوردگی مطلوب، قابلیت شکل پذیری و عملیات حرارتی مناسب، توجه ویژه ای معطوف به آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 شده است [۲]. با این وجود، سوراخکاری خشک آلیاژهای آلومینیومی، همچون آلومینیوم 6061-T6 دارای مشکلاتی از جمله تمایل تراشه ها به چسبیدن به سطح ابزار و در نتیجه سایش سریع ابزار می باشد. این پدیده منجر به

\* Burr

آزمایشگاهی و تحقیقاتی، زبری سطح تنها معیار تصمیم‌گیری پیرامون کیفیت نهایی و قابل قبول قطعه کار می‌باشد [۱۴]. در حقیقت، یک سطح زبر حاوی ناهمواری، برآمدگی و فرورفتگی‌هایی است که به فاصله بسیار کم از یکدیگر قرار گرفته‌اند. از این رو، میانگین زبری سطح به عنوان یک شاخص مهم در محاسبه زبری محسوب شده و معمولاً به صورت میانگین ارتفاع پیک‌ها و فرورفتگی‌ها نسبت به خط مرجع محاسبه می‌گردد. سطح ماشینکاری شده با کیفیت مناسب به سطحی اطلاق می‌گردد که مقدار میانگین زبری سطح کمتری داشته باشد. یکی از روش‌های ارتقا کیفیت سطوح ماشینکاری، استفاده از سیال روانکار می‌باشد که علی‌رغم اثرات مثبت، باعث افزایش ۱۶ تا ۲۰ درصدی هزینه ماشینکاری می‌شود [۱۵]. از این رو، جهت کاهش مشکلات عدیده پیش آمده، یک تکنیک جدید که شامل پاشش تنها چند میلی‌لیتر از سیال روان کننده به لبه برنده ابزار و منطقه براده - برداری است با نام صنعتی روانکاری کمینه<sup>۵</sup> معرفی شده و به طور وسیعی توسط جوامع علمی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. ماشینکاری به روش روانکاری کمینه به عنوان یکی از روش‌های سازگار با محیط‌زیست در زمینه تولید سبز شناخته می‌شود (شکل ۲). در این روش، هوای فشرده به همراه قطرات ریز و گسترده از مخلوط مایع که حاوی تنها مقدار کمی از سیال روانکار است در بازه‌های زمانی مشخص به نقاط مورد نظری در منطقه برشی اسپری می‌شوند. به طور کلی، قطر نازل مورد استفاده در این فرآیند حدود ۱ میلی‌متر و فشار اعمال شده در حدود چند صد کیلو پاسکال همراه با نرخ جریان ۵۰ میلی‌لیتر الی ۲ لیتر بر ساعت است [۱۶]. ماشینکاری به روش حداقل مقدار روانکار مشکلات زیست محیطی و بیولوژیکی ناشی از استفاده گسترده از سیالات روانکاری را به حداقل رسانده و از این رو به عنوان یک تکنیک برتر، نتایج آزمایشگاهی مطلوبی را به نسبت روش‌های مرسوم ارائه داده است. در ماشینکاری به روش روانکاری کمینه، براده به طور مستقیم و به صورت خشک قابل جمع‌آوری است.

بر اساس مشاهدات خان و همکاران [۱۷]، ماشینکاری آلیاژ فولاد AISI 4340 در حالت روان کاری کمینه منجر به کاهش قابل توجه زبری سطح می‌شود. دهار و همکاران [۱۶] نیز در مشاهدات خود تصریح کردند که تراشکاری فولاد AISI 1040 با اینسرت کاربیدی بدون پوشش در حالت روان کاری کمینه منجر به تولید قطعاتی با دقت ابعادی بهتر نسبت به ماشینکاری خشک و مرطوب می‌شود. در روش روانکاری کمینه، تماس براده و سطح ابزار کاهش یافته و به این ترتیب تمایل به سایش و آسیب در نوک ابزار کم شده و در نتیجه دقت ابعادی مطلوبی پیش بینی می‌شود. براساس مشاهدات و مستندات ناجیها و همکاران [۱۸]، اگرچه روش روانکاری کمینه در مقایسه با ماشینکاری مرطوب به طور کلی صافی سطح کمتری را نتیجه می‌دهد، اما در عمل می‌توان با انجام تنظیمات مناسبی در شرایط خنک‌کاری به روش حداقل مقدار کمینه، صافی سطح مطلوبی بدست آورد. کوام و همکاران [۱۹] به بررسی اثر روانکاری خشک و حداقل مقدار کمینه بر زبری سطح و ضخامت تراشه در تراشکاری آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 پرداختند. بر این اساس، ساختار تراشه و توانایی شکستن تراشه به

شده و در نتیجه منجر به کاهش شدید عمر مفید قطعه‌کار می‌شود. حضور پلیسه‌ها به دلیل داشتن لبه‌های تیز می‌تواند منجر به آسیب جدی به اپراتورها شود [۴]. از این رو، برای از بین بردن مشکلات مذکور، استفاده از فرآیندهای ثانویه پلیسه‌زدایی<sup>۱</sup> ضرورت دارد [۵]. در اغلب موارد، به حداقل رساندن و کنترل نمودن اندازه و شکل پلیسه نسبت به انجام عملیات پلیسه‌زدایی اهمیت بیشتری دارد، زیرا عملیات پلیسه‌زدایی نیاز به وسایل دقیق و هزینه تقریبی معادل با ۳۰٪ هزینه تمام شده ماشینکاری دارد [۵]. علاوه بر این، فرآیندهای پلیسه‌زدایی سخت و زمان‌بر بوده و استفاده از آن‌ها در بعضی از موارد منجر به ایجاد تغییرات مکانیکی و فیزیکی در قطعه‌کار و بروز مشکلاتی در خط تولید می‌شود [۴، ۶]. در فرآیند فرزکاری، براساس پارامترهای برشی، هندسه و مسیر ابزار، پلیسه‌ها در امتداد لبه‌های قطعه‌کار تولید می‌شوند، ولی در فرآیند سوراخکاری، پلیسه‌ها در سطوح ورودی و خروجی قطعه‌کار به وجود می‌آیند. هنگامی که قطعه‌کار در نزدیکی ابزار برشی و بر روی سطح ورودی تحت جریان تغییر شکل پلاستیک شدید قرار بگیرد، پلیسه‌های ورودی شکل می‌گیرند. همینطور هنگامی که در سطح خروجی قطعه‌کار مواد گسترش یابند، پلیسه‌های خروجی شکل می‌گیرند. از آنجایی که پلیسه‌های خروجی بسیار بزرگتر از پلیسه‌های ورودی هستند، بیشترین مشکلات صنعتی معطوف به پلیسه‌های خروجی هستند [۷-۸]. از این رو اکثر تحقیقات انجام گرفته در این حوزه حول پلیسه‌های خروجی متمرکز شده اند [۹]. با این وجود، علیرغم پژوهش‌های زیادی که به منظور درک و کنترل مکانیزم شکل‌گیری و اندازه پلیسه‌ها در فرآیند سوراخکاری انجام شده است، به علل مختلفی همچون تاثیر غیرخطی متغیرهایی همچون دما، خواص قطعه‌کار و پارامترهای برشی (سرعت برشی<sup>۲</sup>، نرخ پیشروی<sup>۳</sup>) بر شکل و اندازه پلیسه، رابطه تجربی یا تحلیل قابل قبولی برای تخمین اندازه و یا حتی موقعیت دقیق شکل‌گیری پلیسه‌ها وجود ندارد [۴، ۵، ۸، ۱۰].

از دیگر شاخصه‌های مهم در تشخیص توانایی ماشینکاری قابل قبول، نیروی برشی مناسب و شکل تراشه است. یکی از شاخصه‌های مهم نیروهای برشی در فرآیند سوراخکاری، نیروی پیشروی<sup>۴</sup> است که در شکل ۲ نشان داده شده است. بخش a-b شکل ۲ (الف) مبین قسمت درگیر شونده ابزار سوراخکاری در قطعه‌کار است، در حالی که بخش b-c نشان‌دهنده بخشی از سیگنال نیروی پیشروی است که بطور معمول جهت محاسبه میانگین نیروی پیشروی استفاده می‌شود. عمده عوامل تاثیرگذار بر نیروهای برشی عبارتند از ساختار مکانیکی، فیزیکی و همچنین جنس و اندازه قطعه‌کار و ابزار برشی، شرایط روانکاری و پارامترهای برشی همچون نرخ پیشروی، عمق برش و سرعت برشی [۱۱-۱۳]. از دیگر پارامترهای مهم در تخمین و تایید کیفیت قطعه‌کار، زبری سطح است که به عنوان خاصیتی از بافت سطحی ماده شناخته می‌شود که با توپوگرافی ناهمواری آن در مقایسه با یک سطح صاف مطلوب شناسایی می‌شود [۱۱]. زبری سطح اثر قابل توجهی بر خستگی و تعیین کیفیت نهایی قطعه‌کار دارد. در اکثر مستندات

<sup>1</sup> Deburring

<sup>2</sup> Cutting speed

<sup>3</sup> Feed rate

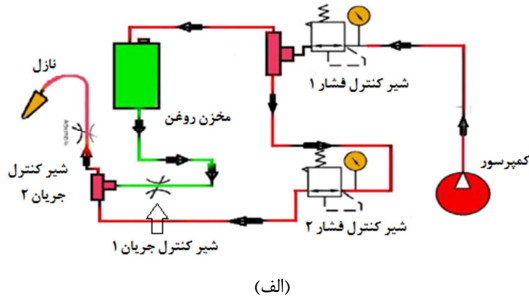
<sup>4</sup> Thrust force (Fz)

<sup>5</sup> MQL

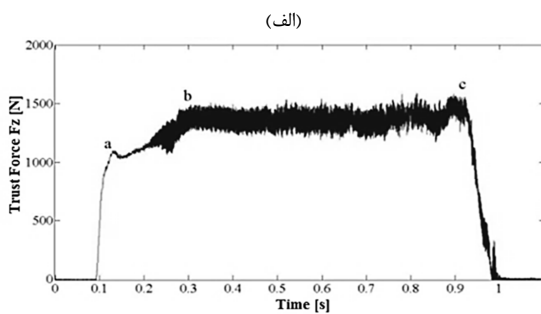
ارزیابی قرار گرفت. نیروهای برشی توسط دستگاه دینامومتر کیستلر<sup>۵</sup> اندازه گیری و در فرکانس ۴۸۰۰۰ هرتز نمونه برداری انجام شد.

جدول ۱- پارامترهای برشی استفاده شده

سطح			پارامتر	نشانه	واحد
Low	Middle	High			
۶۰	۱۵۰	۲۴۰	m/min	A	سرعت برشی
۰.۱۵	۰.۳۵	۰.۳۵	mm/rev	B	سرعت پیشروی
Dry	-	MQL	-	C	روانکاری



شکل ۱- (الف) مدار نیوماتیک سیستم حداقل مقدار روانکار استفاده شده (ب) دستگاه روانکار کمینه ساخته شده



پارامترهایی همچون میزان پیشروی، سرعت برش و شرایط روانکاری وابسته است. می‌توان با تنظیم نرخ پیشروی، سرعت برش و نرخ جریان، توانایی بهتر شکسته شدن تراشه را فراهم کرد. بر اساس تحقیقات موجود، عواملی نظیر ساختار مکانیکی و فیزیکی، جنس و اندازه قطعه-کار و ابزار برشی، شرایط روانکاری، پارامترهای برشی همچون نرخ پیشروی، عمق برش و سرعت برشی بیشترین تاثیر بر کیفیت سطح قطعه‌کار را دارند [۲۰]. از این رو، از جمله نتایج ملموس در ماشینکاری به روش روانکاری کمینه، کاهش نیروهای برش، زبری سطح و دما در منطقه برشی است [۲۱]. با این وجود و علیرغم مزیت‌های ذکر شده و انجام پژوهش‌های متعدد در مورد استفاده از روش روانکاری کمینه در ماشینکاری آلیاژهای آلومینیوم [۲۲-۲۷]، مطالعات محدودی به بررسی طیف وسیعی از شاخصه‌های ماشینکاری پرداخته اند و به طور خاص اکثر مطالعات صورت یافته پیرامون اثر پارامترهای برشی و حالات مختلف روانکاری بر سایش و طول عمر ابزار میباشند [۲۸-۳۳]. علاوه بر این، اطلاعات بسیار محدودی نیز در مورد اثر روانکاری کمینه بر مکانیزم تشکیل و اندازه پلیسه (طول و ضخامت) در سوراخکاری آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 موجود می‌باشد. از این رو و با عنایت به مطالعات صورت گرفته در مورد ماشینکاری آلیاژ آلومینیوم 6061-T6، بررسی تجربی اثر روش روانکاری کمینه بر نیروی پیشروی، شکل، طول پلیسه، سطح تراشه و همین‌طور میانگین زبری سطح در سوراخکاری آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 و مقایسه نتایج با روش سوراخکاری خشک<sup>۱</sup> از جمله اهداف این پژوهش می‌باشد.

## ۲- آزمایشات تجربی

در این پژوهش، کلیه آزمایشات بر روی ماشین فرز اتوماتیک سه محوره هارون<sup>۲</sup> با قابلیت سرعت دورانی ۲۸۰۰۰ دور بر دقیقه انجام شدند. ابزار سوراخکاری استفاده شده در این پژوهش، مته‌های فولادی تندبر<sup>۳</sup> با قطر ۹.۲۵ میلی‌متر بود. پارامترهای برشی استفاده شده از سرعت برشی و نرخ پیشروی (جدول شماره ۱) بر اساس توصیه‌های فنی شرکت سازنده ابزار انتخاب شدند. بر این اساس، پارامترهای برشی در مرتبه‌های دو و سه‌گانه مورد استفاده قرار گرفته و در مجموع ۱۸ (۳×۲) آزمایش انجام شد. لازم به توضیح است که آزمایش‌ها در دو نوبت تکرار گشته و در شرایط برابر آزمایشگاهی، اندازه‌گیری‌ها در ۴ نوبت تکرار گردیدند و میانگین اندازه‌گیری‌ها به عنوان طول پلیسه و میانگین زبری سطح استفاده شدند. بررسی دقیق اثر پارامترهای برشی بر روی نتایج حاصله از سوراخکاری نیز روش‌ها و نرم افزارهای رایج آماری استفاده شدند. مقدار جریان سیال به کار رفته در حالت‌های مرطوب و روانکاری کمینه به ترتیب ۴۰۰۰ و ۶۰ میلی لیتر در ساعت بودند. اندازه طولی پلیسه‌ها توسط دستگاه ارتفاع سنج<sup>۴</sup> که دارای حساسیت ۱۳ میکرومتر است اندازه‌گیری شد (شکل ۳). شکل پلیسه‌های تولیدی نیز توسط میکروسکوپ نوری با دقت ۱۰۰۰ برابری مورد

<sup>۱</sup> Dry

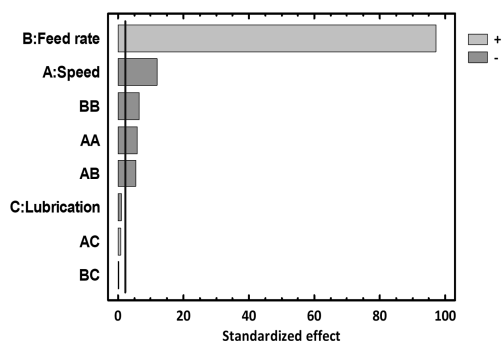
<sup>۲</sup> Huron 3Axis CNC Machine

<sup>۳</sup> HSS

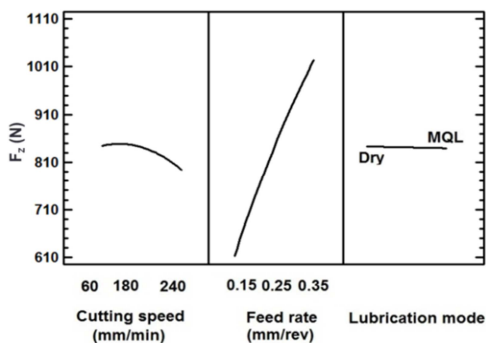
<sup>۴</sup> Mitutoyo height gauge

<sup>۵</sup> KISTLER Dynamometer

پیشروی است. با علم به این که آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 ماده‌ای است که تحت عملیات حرارتی سخت می‌شود، نیروی پیشروی در نرخ پیشروی بالا شاهد افزایش زیادی می‌باشد و همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، در بالاترین نرخ پیشروی (۰/۳۵ میلی‌متر در هر دور)، نیروی پیشروی تا حدود ۱۲۰۰ نیوتن افزایش یافته است. بر اساس شکل های ۳-۴ و به علت حرارت بسیار زیاد ایجاد شده در این شرایط، اثر روانکاری کمینه در کاهش نیروی پیشروی بسیار ناچیز می‌باشد. در چنین حالتی، روش‌های صنعتی دیگری همچون ماشینکاری مرطوب<sup>۲</sup> و ماشینکاری هیبریدی<sup>۳</sup> توصیه می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، افزایش سرعت نیز باعث کاهش نیروی پیشروی می‌شود. دلیل عمده این پدیده، ایجاد سهولت در تغییر شکل پلاستیک منطقه برشی در حین ماشینکاری سرعت بالا است که باعث راحت‌تر جدا شدن مواد از قطعه کار می‌شود. در این حالت، اصطکاک بین ابزار و قطعه کار بسیار کم شده و تراشه های شکننده تولید شده و از منطقه برشی راحت‌تر خارج می‌شوند [۳۵].



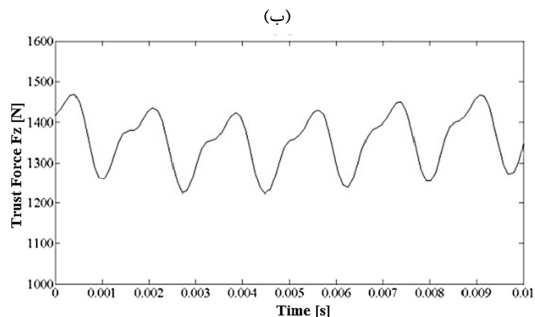
شکل ۴- چارت پارتو نیروی پیشروی ( $R^2 = 0.999$ )



شکل ۵- تاثیر پارامترهای برشی بر نیروی پیشروی

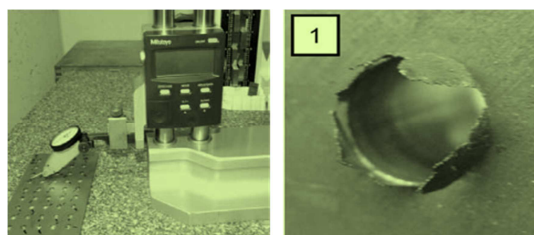
### ۲-۳- اثر پارامترهای برشی بر تراشه‌ها

شکل‌های ۶-۹- نمایی از تقسیم‌بندی در سطح تراشه‌های جمع‌آوری شده در حالت سوراخکاری خشک و روانکاری کمینه را در سرعت ۶۰ و ۲۴۰ متر بر دقیقه را نشان می‌دهند. فارغ از نوع روانکاری استفاده شده، تراشه های ایجاد شده در سرعت ۲۴۰ متر بر دقیقه دارای شیارهای



شکل ۲- شکل روند تغییرات نیروی پیشروی در سوراخکاری آلیاژ آلومینیوم

از میان مولفه‌های رایج در نیروهای برشی، نیروی پیشروی (شکل ۲) به عنوان نیروی اصلی تاثیرگذار در فرآیند سوراخکاری مورد توجه و ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی خصوصیات اساسی تراشه‌ها در حالت روانکاری کمینه و خشک، تراشه‌های جمع‌آوری شده بعد از عملیات آماده سازی در دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> قرار داده شده و با وضوح ۷۰۰۰ برابری عکس برداری انجام شد. در این بین، خصوصیات اساسی تراشه‌ها همچون شکل و قطعه بندی در سطح آزاد مورد بررسی قرار گرفتند.



شکل ۳- (الف) طول پلیسه (ب) دستگاه اندازه گیری طول پلیسه

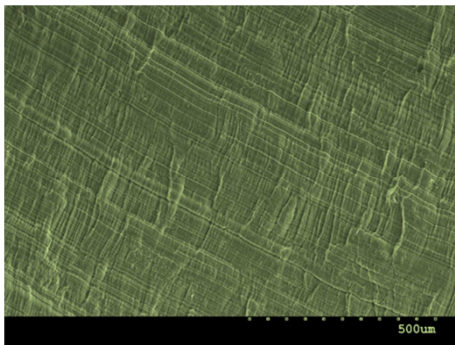
نتایج

### ۳-۱- اثر پارامترهای برشی بر نیروی پیشروی

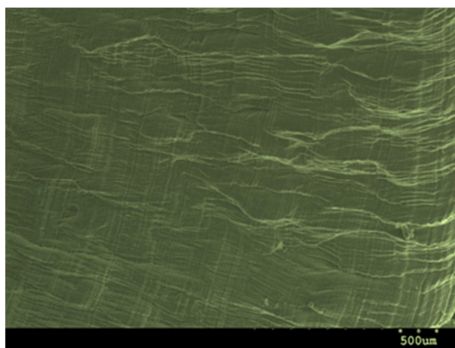
شکل ۴ نشان‌دهنده چارت پارتو نیروی پیشروی است. بر این اساس، نرخ پیشروی (B) و سرعت (A) پارامترهای برشی هستند که تاثیر مستقیم بر تغییرات نیروی پیشروی دارند. همان‌طور که در شکل- ۵های ۴ و ۵ نشان داده شده است، به محض افزایش نرخ پیشروی، نیروی پیشروی نیز افزایش می‌یابد. به عبارتی دیگر، بر اساس مطالعات آزمایشگاهی، نرخ پیشروی (B) پارامتر اصلی و تاثیرگذار بر نیروی پیشروی است. بر اساس مطالعه انجام یافته توسط کوام و همکاران [۳۴] نیروی پیشروی را می‌توان به صورت تابعی از سختی ماده و نرخ پیشروی بیان نمود. پارامتر موثر دیگر سرعت (A) است که به همراه جمعی از روابط متقابل بین پارامترهای برشی، از جمله AA, AB, BB از دیگر عوامل تاثیرگذار بر تغییرات نیروی پیشروی هستند. نکته جالب توجه در شکل ۴ تاثیر کم روانکاری کمینه بر کاهش نیروی

<sup>۲</sup> Wet Machining  
<sup>۳</sup> Hybrid machining

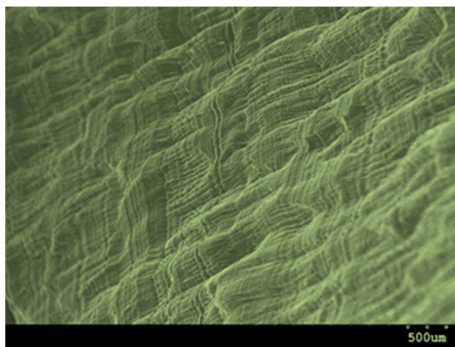
<sup>۱</sup> Hitachi SEM S-3600N



شکل ۷- نمایی از تقسیم بندی در سطح تراشه در سرعت ۶۰ متر بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰.۲۵ میلیمتر بر دقیقه در حالت روانکاری کمینه

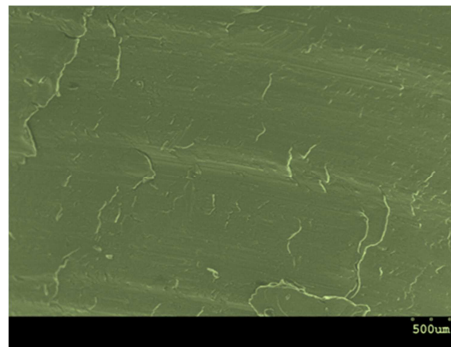


شکل ۸- نمایی از تقسیم بندی در سطح تراشه در سرعت ۲۴۰ متر بر نرخ پیشروی ۰.۲۵ میلیمتر بر دقیقه در حالت سوراخکاری خشک



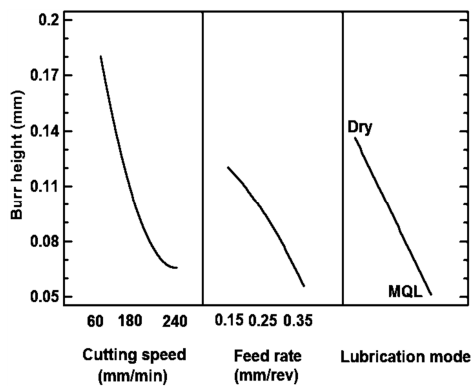
شکل ۹- نمایی از تقسیم بندی در سطح تراشه در سرعت ۶۰ متر بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰.۲۵ میلیمتر بر دقیقه در حالت روانکاری کمینه

موازی طولی کمتری به نسبت تراشه های ایجاد شده در سرعت ۶۰ متر بر دقیقه (شکل های ۶-۷) هستند. تقسیم بندی در سطح تراشه های ایجاد شده در حالت خشک موید صافی بیشتر و تعداد شیارهای موازی کمتر در واحد اندازه به نسبت حالت روانکاری کمینه است. این پدیده نشان دهنده اصطکاک کمتر و در نتیجه شکنندگی بیشتر در سطح آزاد تراشه های ایجاد شده در حالت روانکاری کمینه است که موید سهولت نسبی عملیات براده برداری در این حالت می باشد [۱۶، ۱۹]. بر اساس تراشه های ایجاد شده در سرعت ۲۴۰ متر بر دقیقه در شکل های ۸-۹ و در نتیجه مقایسه آنها با شکل های ۶-۷، علیرغم حالت روانکاری استفاده شده، شکنندگی بیشتری در تراشه های ایجاد شده در سرعت بالاتر قابل تفسیر است. این پدیده به خوبی تصدیق کننده تسهیل در براده برداری در سرعت های بالاتر و در نتیجه اصطکاک کمتر است که منجر به سهولت در جداسازی تراشه ها از منطقه برشی می شود. در نتیجه، نیروی پیشروی کمتری در سرعت بالاتر مشاهده می شود. این نتیجه گیری در انطباق کامل با مشاهدات آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل ۵ و نتایج منتشر شده توسط کوام و همکاران [۳۴] می باشد. یکی دیگر از مشکلات رایج در فرآیندهای سوراخکاری در سرعت بالا، سایش ابزار است که احتمال پیدایش آن در حالت استفاده از سیال روانکار کمتر خواهد بود. بر اساس شکل ۱۰، سایش ابزار در حالت سوراخکاری خشک معمولاً به صورت سایش ابزار با لبه انباشته<sup>۱</sup> خواهد بود. دلیل عمده پدیده فوق عدم جداسازی مطلوب تراشه ها از سطح آزاد قطعه کار و چسبیده شدن آن به لبه قطعه کار در نتیجه انتقال حرارت از منطقه برشی به سطح آزاد ابزار می باشد که منجر به بروز عواقب نامطلوبی همچون تغییر حالت هندسی و مکانیکی ابزار برشی و قطعه کار و در نتیجه ایجاد مشکلاتی در روند فرآیند برشی و کاهش دقت و تolerانس های ابعادی مورد نظر خواهد شد [۳۵].

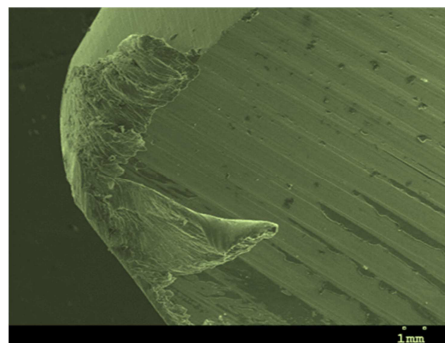


شکل ۶- نمایی از تقسیم بندی در سطح تراشه در سرعت ۶۰ متر بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰.۲۵ میلیمتر بر دقیقه در حالت سوراخکاری خشک

<sup>1</sup> Built up edge formation



شکل ۱۲- تاثیر پارامترهای برشی بر روی طول پلیسه

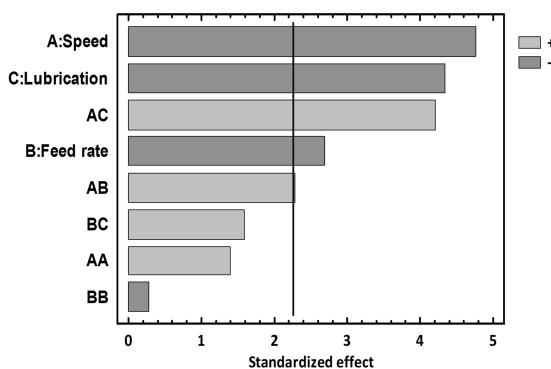


شکل ۱۰- سایش ابزار در حالت سوراخکاری خشک

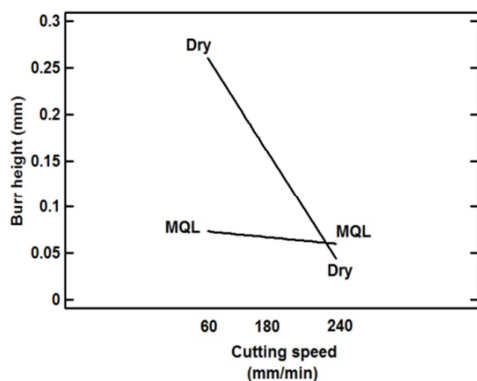
### ۳-۳- اثر پارامترهای برشی بر پلیسه

شکل ۱۱ نشان‌دهنده چارت پارتو طول پلیسه است. براین اساس، سرعت (A)، مدل روانکاری (C) و نرخ پیشروی (B) پارامترهای برشی هستند که تاثیر مستقیم بر تغییرات طول پلیسه دارند. از دیگر پارامترهای تاثیرگذار بر طول پلیسه می‌توان از اثر متقابل بین پارامترهای برشی سرعت-روانکاری (AC) و همینطور سرعت-نرخ پیشروی (AB) نام برد. براساس شکل ۱۱، از لحاظ آماری امکان کنترل طول پلیسه توسط پارامترهای برشی تا سطح ۸۹.۴٪ وجود دارد. به عبارت دیگر طول پلیسه یکی از نتایج حساس و مهم ماشینکاری است که از لحاظ آماری قابلیت کنترل پذیری توسط پارامترهای برشی در سطح قابل قبولی دارد.

براساس شکل ۱۲، افزایش سرعت و نرخ پیشروی به کمتر نمودن طول پلیسه کمک شایانی می‌کند. افزایش نرخ پیشروی منجر به بزرگتر شدن ضخامت تراشه تولیدی شده و در نتیجه نیروهای برشی افزایش یافته و تراشه‌های تولید شده راحت‌تر از منطقه برشی به بیرون دفع می‌شوند و احتمال تبدیل آن‌ها به پلیسه در اثر عدم انجام صحیح فرآیند سوراخکاری کمتر می‌شود. در نتیجه طول پلیسه کمتری بدست خواهد آمد. علاوه بر این، افزایش سرعت برشی باعث ایجاد سهولت در فرآیند تغییر شکل پلاستیک قطعه‌کار در منطقه برشی شده و در نتیجه فرآیند براده‌برداری و تخلیه تراشه با سرعت بیشتری انجام گرفته و اندازه طولی پلیسه در منطقه خروجی به نسبت کوچکتر خواهد بود.



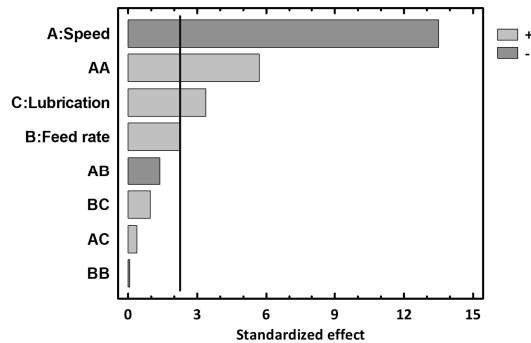
شکل ۱۱- چارت پارتو طول پلیسه ( $R^2=0.889$ )



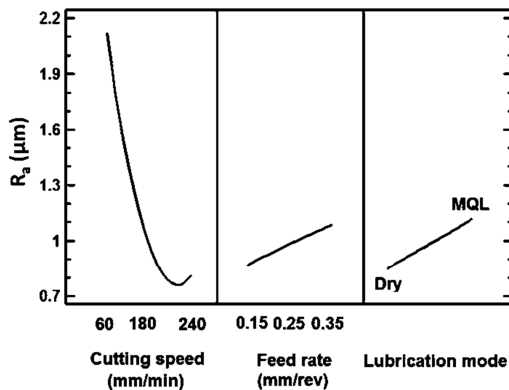
شکل ۱۳- اثر متقابل پارامترهای برشی بر روی طول پلیسه

یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار در این پدیده استفاده از سیال روانکار است که با پایین آوردن دما در منطقه برشی، فرآیند تغییر شکل پلاستیک را سهولت داده و باعث عدم چسبیدن تراشه‌ها به ابزار و در نتیجه ایجاد لبه انباشته می‌شود که این امر در نهایت منجر به کوچکتر شدن اندازه پلیسه می‌شود. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، تغییر حالت روانکاری از حالت خشک به روانکاری کمیننه منجر به کاهش طول پلیسه می‌شود. بر اساس شکل ۱۳، اثر متقابل بین پارامترهای برشی همچون سرعت برشی و نوع روانکاری که به صورت پارامتر AC نشان داده شده است از جمله عوامل تاثیرگذار در کنترل طول پلیسه‌های تولیدی است. براساس شکل ۱۳، در سرعت برشی کم و در هنگام فرآیند سوراخکاری خشک، طول پلیسه به مراتب بیشتر از مقداری است که در همین سرعت برشی و در حالت روانکاری کمیننه بدست می‌آید. لذا با افزایش سرعت برشی به ۲۴۰ متر بر دقیقه، طول پلیسه در هر دو حالت روانکاری مطالعه شده تقریباً مشابه یکدیگر می‌باشند. این پدیده را اثر متقابل بین پارامترهای برشی می‌نامند. در سرعت‌های بالای ماشینکاری و به سبب حرارت زیاد ایجاد شده در منطقه برشی و اندازه محدود سیال روانکاری، اثر روانکاری کمیننه بر اندازه پلیسه به نسبت سرعت‌های پایین‌تر به مراتب کمتر است (شکل ۱۳). در صورت نیاز به سطح نهایی مطلوب‌تر، تغییر در مقدار پاشش سیال روانکار و یا استفاده از روانکاری کامل در فرآیند ماشینکاری را می‌توان از جمله راه حل‌های علمی و قابل بحث در این موضوع دانست.

روانکاری کمینه بر میانگین زبری سطح را بررسی کرده و پارامترهای دیگر کیفیت سطح همچون تنش‌های پسماند و لایه سفید مورد ارزیابی قرار نگرفته است.



شکل ۱۵- چارت پارتو میانگین زبری سطح ( $R^2=0.96$ )



شکل ۱۶- تاثیر پارامترهای برشی بر میانگین زبری سطح

#### ۴- نتیجه‌گیری

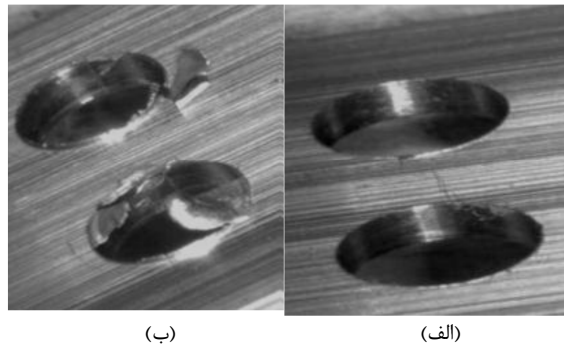
در این پژوهش، اثر روانکاری کمینه و خشک بر میانگین زبری سطح، سایش ابزار، نیروی پیشروی، نوع، مدل و طول پلیسه در حین سوراخکاری آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، نتایج ذیل قابل ارائه می‌باشند:

- بر طبق مشاهدات آزمایشگاهی، افزایش نرخ پیشروی و کاهش سرعت برشی منجر به افزایش نیروی پیشروی می‌شوند. بر اساس نرخ پیشروی و سرعت برشی استفاده شده، تفاوت بسیار محسوسی بین نیروهای پیشروی در حالات سوراخکاری خشک و حداقل مقدار روانکار مشاهده نشد.
- تقسیم بندی سطح آزاد تراشه‌های جمع آوری شده در سرعت‌های استفاده شده در حالت سوراخکاری خشک به نسبت حالت روانکاری کمینه دارای صافی سطح بیشتر و تعداد شیارهای موازی کمتری می‌باشد که نشان‌دهنده سختی بیشتر در تراشه‌ها و نیروی بیشتر مورد نیاز جهت عملیات براده برداری در سوراخ‌کاری خشک است.
- بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی، افزایش سرعت و نرخ پیشروی باعث کاهش طول پلیسه شده و از طرفی، کاهش میانگین زبری سطح با کاهش نرخ پیشروی و افزایش سرعت میسر است.

به طور کلی پلیسه‌ها در فرآیند سوراخکاری به سه نوع کلی تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱. پلیسه نوع اول (پلیسه یکنواخت)<sup>۱</sup>
۲. پلیسه نوع دوم (پلیسه یکنواخت کلاه‌دار)<sup>۲</sup>
۳. پلیسه نوع سوم (پلیسه گلبرگی)<sup>۳</sup> [۳۱].

بر اساس شکل ۱۴، پلیسه‌های تولید شده در حالت روانکاری خشک از نوع دوم هستند و پلیسه‌های تولیدی تحت روانکاری کمینه از نوع پلیسه‌های نوع اول (شکل ۱۴ب)) هستند. لذا، به علت بزرگی پلیسه‌های تولیدی در حالت خشک، روش‌های هزینه‌بر و زمان‌بری همچون پلیسه‌زدایی نیاز است. علیرغم مقدار کم سیال روانکار استفاده شده، پلیسه‌های کوچکی در قطعات سوراخکاری شده ایجاد شده‌اند که موید تاثیر مثبت این روش بر طول پلیسه به عنوان یکی از شاخصه‌های اصلی کیفیت ماشینکاری و کنترل کیفیت قطعه کار می‌باشد. از این رو می‌توان اثر مثبت روانکاری کمینه بر شکل و اندازه پلیسه‌های تولیدی را مورد تاکید قرار داد.



شکل ۱۴- شکل پلیسه‌های تولیدی در حالات (الف)سوراخکاری خشک و (ب)روانکاری کمینه

#### ۴-۳- اثر پارامترهای برشی بر میانگین زبری

بر اساس شکل ۱۵، سرعت (A)، نوع روانکاری (C) و همینطور نرخ پیشروی (B) از جمله پارامترهای برشی تاثیرگذار بر میانگین زبری سطح هستند که از لحاظ آماری قابلیت کنترل میانگین زبری سطح به میزان ۹۶.۳٪ را دارند. بر اساس شکل ۱۶، افزایش سرعت و کاهش نرخ پیشروی باعث کاهش میانگین زبری سطح و در نتیجه بهبود سطح ماشینکاری شده می‌شوند. جالب توجه است که بر اساس شکل ۱۶ و در حالت خشک، میانگین زبری سطح بهتری به نسبت حالت روانکاری کمینه بدست آمده است. این تفاوت اگر چه از لحاظ آماری قابل توجه نیست (شکل ۱۵)، اما موید این مطلب است که روانکاری لزوماً تاثیر مثبتی بر تمام جنبه‌های ماشینکاری ندارد. به علت مکانیزم پیچیده سوراخکاری، روانکاری در مقادیر متفاوت و تحت پارامترهای مختلف برشی می‌بایست انجام گیرد تا اثر روانکاری بر زبری سطح کاملاً مشخص شود. همانطور که قبلاً اشاره شد، این پژوهش، صرفاً اثر

<sup>1</sup> Uniform burr

<sup>2</sup> Uniform burr with cap

<sup>3</sup> Petal burr

Review, in Machining of Titanium Alloys, ed: Springer Berlin Heidelberg, pp. 1-30, 2014.

[12] Niknam S. A., Wygowski W., Balazinski M., and Songmene V., Milling Burr Formation and Avoidance, Machinability of Advanced Materials, J. P. Davim, Ed., ed London, UK: ISTE Wiley, pp. 57-94, 2014.

[13] Niknam S. A. and Songmene V., Analytical modelling of slot milling exit burr size, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 73, No. 1-4, pp. 421-432, 2014.

[14] Aspinwall D., Dewes R., and Mantle A., The machining of  $\gamma$ -TiAl intermetallic alloys, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 54, No. 1, pp. 99-104, 2005.

[15] Dasch J. M., Ang C. C., Wong C. A., Cheng Y. T., Weiner A. M., Lev L. C., et al., A comparison of five categories of carbon-based tool coatings for dry drilling of aluminum, Surface and Coatings Technology, Vol. 200, No. 9, pp. 2970-2977, 2006.

[16] Dhar N., Islam M., Islam S., and Mithu M., The influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 171, No. 1, pp. 93-99, 2006.

[17] Khan M., Mithu M., and Dhar N. R., Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid, Journal of materials processing Technology, Vol. 209, No. 15, pp. 5573-5583, 2009.

[18] Najiha M. and MM R., Experimental study on minimum quantity lubrication in end milling of AA6061-T6 using tialn coated carbide tools, International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME), Vol. 11, pp. 2771-2785, 2015.

[19] Khanna N., Garay A., Iriarte L. M., Soler D., Sangwan K. S., and Arrazola P. J., Effect of heat treatment conditions on the machinability of Ti64 and Ti54M alloys, Procedia CIRP, Vol. 1, pp. 477-482, 2012.

[20] Gillespie L. and Blotter P., Formation and properties of machining burrs, J. Eng. Ind. (Trans. ASME, B), Vol. 98, No. 1, pp. 66-74, 1976.

[21] Silva L. R., Corrêa E. C., Brandão J. R., and de Ávila R. F., Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant-MQL in grinding process, Journal of Cleaner Production, 2013.

[22] Davim J., Sreejith P., Gomes R., and Peixoto C., Experimental studies on drilling of aluminium (AA1050) under dry, minimum quantity of lubricant, and flood-lubricated conditions, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 220, No. 10, pp. 1605-1611, 2006.

[23] Zedan Y., Niknam S.A., Djebara A., and Songmene V., Burr Size Minimization When Drilling 6061-T6 Aluminum Alloy, ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 9-15, 2012, Houston, TX, USA, pp. 1053-1059.

[24] Braga D. U., Diniz A. E., Miranda G. W., and Coppini N. L., Using a minimum quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum-silicon alloys, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 122, No. 1, pp. 127-138, 2002.

[25] Wakabayashi T., Suda S., Inasaki I., Terasaka K., Musha Y., and Toda Y., Tribological action and cutting performance of MQL media in machining of aluminum, CIRP Annals-Manufacturing Technology, Vol. 56, No. 1, pp. 97-100, 2007.

[26] Kishawy H., Dumitrescu M., Ng E.-G., and Elbestawi M., Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, No. 2, pp. 219-227, 2005.

[27] Hussain M., Taraman K., Filipovic A., and Garren I., Experimental Study to Analyze the Workpiece Surface Temperature in Deep Hole Drilling of Aluminum Alloy Engine Blocks Using MQL Technology, J. Achievement Mat. Manuf. Eng, Vol. 31, pp. 485-490, 2008.

- دو مدل پلیسه های یکنواخت و یکنواخت کلاه دار در ماشینکاری خشک و روانکار کمینه مشاهده شدند. پلیسه های یکنواخت کلاه دار مدل نامطلوبی از پلیسه های سوراخکاری هستند که وجود آنها باعث مشکلات ثانویه در عملیات مونتاژ می شود.
- در پایین ترین سرعت برشی استفاده شده (۶۰ متر بر دقیقه)، طول پلیسه در حالت خشک بسیار بزرگتر از حالت مشابه در روش حداقل مقدار روانکار می باشد. این مطلب موید اثر مثبت روش روانکار کمینه بر ارتفاع پلیسه در سرعت های به نسبت پایین تر است. بر اثر افزایش سرعت تا پیشینه استفاده شده (۲۴۰ متر بر دقیقه)، طول پلیسه تولیدی در هر دو حالت تقریباً به یک اندازه بود که این مطلب مهر تاییدی بر تاثیر ماشینکاری با سرعت بالا بر کاهش طول پلیسه می باشد. اما متعاقباً، به اثر بخشی محدود روانکاری کمینه در دامنه های سرعتی بالا اشاره می نماید.
- میانگین زبری سطح کمتری در حالت سوراخکاری خشک به نسبت سوراخکاری با روش حداقل مقدار روانکار مشاهده شد.
- میانگین زبری سطح در سرعت های بالاتر ماشینکاری و نرخ پیشروی کمتر کاهش یافته و کیفیت مطلوبتری در سطح سوراخکاری شده بوجود آمد. امید است اثر بخشی روش حداقل مقدار روانکار بر دیگر مولفه های موثر بر کیفیت سطح همچون تنش های پسماند و لایه سفید نیز در مطالعات آتی مورد بررسی قرار گیرد.

## ۵- مراجع

[1] Gillespie L. R. K., A quantitative approach to vibratory deburring effectiveness, SME Tech. Report., 1975.

[2] Lee S., Choi H., Kim G., Choi Y., and Ko S. L., Micro Deburring Technology Using Ultrasonic Vibration with Abrasive, Proceedings of the ISAAT, International Symposium on Advances in Abrasive Technology, pp. 477-482, 2004.

[3] Koelsch J. R., Divining edge quality by reading the burrs, Quality, Vol. 40, No. 13, pp. 24-28, 2001.

[4] Kim J., Min S., and Dornfeld D. A., Optimization and control of drilling burr formation of AISI 304L and AISI 4118 based on drilling burr control charts, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 41, No. 7, pp. 923-936, 2001.

[5] Niknam S.A., Zedan Y., and Songmene V., Machining Burrs Formation & Deburring of Aluminium Alloys, Light Metal Alloys Applications ed, pp. 99-122, 2014.

[6] Gillespie L., The battle of the burr: new strategies and new tricks, Manufacturing Engineering (USA), Vol. 116, No. 2, pp. 69-70, 1996.

[7] Niknam S. A., Burrs understanding, modeling and optimization during slot milling of aluminium alloys, Ph.D. Thesis, École de technologie supérieure, 2013.

[8] Niknam S. A. and Songmene V., Factors governing burr formation during high-speed slot milling of wrought aluminium alloys, Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 227, No. 8, pp. 1165-1179, 2013.

[9] Niknam S. A., Burrs Understanding, Modeling and Optimization during Slot Milling of Aluminium Alloys, Ph.D. Thesis, École de Technologie Supérieure, Université du Québec, 2013.

[10] Niknam S. A. and Songmene V., Deburring and edge finishing of aluminum alloys: A review, 12th International conference on Aluminium (INALCO), Montreal, QC, Canada, 2013.

[11] Niknam S. A., Khettabi R., and Songmene V., Machinability and Machining of Titanium Alloys: A



- [28] Okokpujie I. P., Ikumapayi O. M., Okonkwo U. C., Salawu E. Y., Afolalu S. A., Dirisu J. O., et al., Experimental and Mathematical Modeling for Prediction of Tool Wear on the Machining of Aluminium 6061 Alloy by High Speed Steel Tools, *Open Engineering*, Vol. 7, pp. 461-469, 2017.
- [29] A. H. Ghasemi, A. M. Khorasani, and I. Gibson, Investigation on the Effect of a Pre-Center Drill Hole and Tool Material on Thrust Force, Surface Roughness, and Cylindricity in the Drilling of Al7075, *Materials*, Vol. 11, pp. 140, 2018.
- [30] Gupta M. K., Mia M., Singh G., Pimenov D. Y., Sarikaya M., and Sharma V. S., Hybrid cooling-lubrication strategies to improve surface topography and tool wear in sustainable turning of Al 7075-T6 alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 101, No. 1-4, pp. 55-69, 2019.
- [31] Mia M., Singh G., Gupta M. K., and Sharma V. S., Influence of Ranque-Hilsch vortex tube and nitrogen gas assisted MQL in precision turning of Al 6061-T6, *Precision Engineering*, Vol.53, pp-289-899, 2018.
- [32] Okokpujie I., Ohunakin O., Bolu C., and Okokpujie K., Experimental data-set for prediction of tool wear during turning of Al-1061 alloy by high speed steel cutting tools, *Data in brief*, Vol. 18, pp. 1196-1203, 2018.
- [33] Singh G., Sharma V. S., and Gupta M. K., Sustainable drilling of aluminium 6061-T6 alloy by using nano-fluids and Ranque-Hilsch vortex tube assisted by MQL: an optimization approach, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 20, pp. 252-273, 2018.
- [34] Kouam J., Songmene V., Zedan Y., A. Djebara, and R. Khettabi, On chip formation during drilling of cast aluminum alloys, *Machining Science and Technology*, Vol. 17, No. 2, pp. 228-245, 2013.
- [35] Lauderbaugh L., Analysis of the effects of process parameters on exit burrs in drilling using a combined simulation and experimental approach, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 4, pp. 1909-1919, 2009.
- [36] Aurich J. C., Dornfeld D., Arrazola P. J., Franke V., Leitz L., and Min S., Burrs-Analysis, control and removal, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 58, No. 2, pp. 519-542, 2009.