Archive of SID

مجله مهندسی مکانیک مدرس، آبان ۱۳۹٤، دوره ۱۵، شماره ۱۳، ویژه‌نامه مجموعه مقالات کنفرانس، ص‌ص ۳٤٤-۳٤۸

مجموعه مقالات کنفرانس ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ و ۱٤ آبان ۱۳۹٤

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

سنگ‌زنی به کمک محلول شیمیایی خورنده

پویا بهرامی[۱]، عبدالحمید عزیزی[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمانشاه، کرمانشاه

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه ایلام، ایلام

* ایلام، صندوق پستی ۵۱۶-۶۹۳۱۵، ah.azizi@ilam.ac.ir

چکیده

خوردگی شیمیایی فرایندی کنترل شده است که با قرار دادن قطعه‌کار در معرض محلول خورنده برداشت ماده از قطعه صورت می‌گیرد. از این روش در ماشین‌کاری شیمیایی با بکارگیری محلول خورنده جهت برداشت قسمت‌های ناخواسته قطعه‌کار استفاده می‌شود که زمان‌بر و نیز کیفیت سطح در این فرایند پایین می‌باشد. در این تحقیق جهت مرتفع نمودن مشکلات مذکور و نیز همچنین افزایش نرخ برداشت ماده و کیفیت سطح ماشین‌کاری، فرایند پیشنهادی "سنگ‌زنی به کمک محلول شیمیایی" ارایه شده است. جهت بررسی کارآمدی این روش با پاشش محلول خورنده $FeCl_3$ با غلظت ۲۵٪ وزنی به منطقه سنگ‌زنی و نیز با استفاده از تصاویر میکروسکپی سطح و همچنین اندازه‌گیری زبری سطح به بررسی سطح تولیدی توسط این روش پرداخته می‌شود. طبق نتایج به دست آمده با استفاده از روش سنگ‌زنی به کمک محلول شیمیایی مقدار نرخ برداشت ماده نسبت به روش معمولی ماشین‌کاری شیمیایی و نیز سنگ‌زنی افزایش یافته و این در حالی‌است که صافی سطح نهایی قطعه تولیدی به میزان چشمگیری نیز بهبود یافته است.

کلید واژگان: ماشین‌کاری شیمیایی، صافی سطح، سنگ‌زنی، عمق نفوذ، محلول خورنده

Grinding-assisted chemical etching

Pooya Bahrami[1], Abdolhamid Azizi[2*]

1- Department of mechanical engineering,, Islamic Azad University of Kermanshah Branch, Kermanshah, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Ilam University, Ilam, Iran

* P.O.B. 69315-516, Ilam, Iran, ah.azizi@ilam.ac.ir

ABSTRACT

Chemical etching is a controlled dissolution of workpiece material by contacting the strong chemical solution. The process is a corrosion-controlled application. Conventional chemical machining (CHM) method applies a strong chemical etchant solution to remove unwanted parts in the workpiece material. It is time consuming and gives a relatively rough surface. In this study, the grinding-assisted chemical etching (GACE) method is introduced in order to improve the material removal rate and the integrity of the machined surface. A concentration of 1.25mol FeCl3 solution is sprayed to the grinding zone in order to obtain the chemical effects. Scan electron microscope (SEM) and roughness tests were employed to observe the surface topography. Through various experiments and in comparison with conventional results, the superiority of our novel method was verified. Not only did the material removal rate increase, but also the surface roughness was improved and the burr free surface was obtained. The proposed process was proved to be effective.

Keywords: Chemical Machining, Depth of Etch, Etchant, Grinding, Surface Roughness.

۱- مقدمه

پدیده خوردگی فلزات در صورتی که بصورت کنترل شده باشد می‌توان از آن به عنوان یک روش در جهت شکل‌دهی فلزات سود جست. ماشین‌کاری و اچ کردن شیمیایی در واقع یک روش شکل‌دهی به وسیله‌ی ایجاد خوردگی در قطعات می‌باشد که دارای عناوین مختلفی است که در این تحقیق با نام ماشین‌کاری شیمیایی[1] معرفی می‌شود [۲،۱]. موارد استفاده از ماشین‌کاری شیمیایی دارای تاریخی طولانی می‌باشد که اولین بار توسط مصریان باستان و با استفاده از اسید سیتریک جهت شکل‌دهی زیورالات و ادوات جنگی مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. این روش اولین بار توسط سانس در سال ۱۹۵۶ به ثبت رسید و به صنعت معرفی گردید [۴]. تاکنون تحقیقات و مطالعات فراوانی در زمینه ماشین‌کاری شیمیایی صورت گرفته است که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به تحقیقات شکیر اشاره کرد [۶،۵]. او به بررسی تاثیر دما بر روی نرخ برداشت ماده، عمق ماشین‌کاری و صافی سطح بر روی آلومینیم AW7075 و مس خالص به وسیله ماده خورنده $Fecl_3$[2] پرداخت. نتایج بیانگر این موضوع بود که افزایش دما باعث افزایش نرخ برداشت ماده و عمق ماشین‌کاری می‌شود. روش‌های ترمومکانیکی جهت برداشت براده و ماشین‌کاری همیشه با آثار نامطلوبی مانند سوختگی، تنش‌های پسماند و تغییر شکل‌های ناشی از نیروهای بالای ماشین‌کاری همراه است. بنابراین ترکیب روش‌های مختلف ماشین‌کاری در راستای کاهش عیوب مذکور از دیرباز مورد توجه محققان این زمینه بوده است که در این راستا ترکیب روش‌های شیمیایی با روشهای ترمومکانیکی جهت براده‌برداری می‌تواند مفید واقع شود [۹ ،۷]. در این زمینه می‌توان کار چوی و همکارانش که موفق به ابداع روش ترکیبی ماشین‌کاری التراسونیک به همراه محلول خورنده جهت ماشین‌کاری عدسی‌های شیشه‌ایی شده بودند را نام برد [۱۰]. طبق بررسی‌های آنان

1. Chemical machining(CHM)

2. Ferric chloride

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

P. Bahrami, A. Azizi, Grinding-assisted chemical etching, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 344-348, 2015 (in Persian فارسی)

www.SID.ir

Archive of SID

استفاده از محلول شیمیایی در ماشین‌کاری التراسونیک باعث افزایش کیفیت سطح و افزایش نرخ برداشت ماده گردید. از سوی دیگر فرآیند سنگ‌زنی یکی از روش‌های پرداخت سطح می‌باشد که این روش نیز با توجه به ویژگی‌های آن، دارای محدودیت‌هایی از جمله نرخ برداشت براده پایین و عدم امکان سنگ‌زنی فلزات غیرآهنی همچون آلومینیوم می‌باشد. در سنگ‌زنی قطعاتی مانند آلومینیوم به دلیل پایین بودن نقطه ذوب آن، در اثر حرارت ناشی از ماشین‌کاری، براده‌های جدا شده ذوب و در خلل و فرج چرخ‌سنگ قرار گرفته یا به عبارتی چرخ‌سنگ کور می‌شود و مانع از ادامه فرآیند ماشین‌کاری می‌شود. از سویی دیگر نیز در فرآیند ماشین‌کاری شیمیایی زمانی که قطعه‌کار تحت محلول خورنده قرار داده می‌شود لایه خارجی قطعه با محلول خورنده واکنش داده و باعث تشکیل لایه واکنش یافته می‌گردد که با افزایش ضخامت این لایه محدودیت‌هایی همچون کاهش صافی سطح و نیز ماشین‌کاری غیر یکنواخت سطح را در ادامه فرآیند ماشین‌کاری شیمیایی منجر می‌شود [۱۱]. این تحقیق در نظر دارد با ترکیب دو فرآیند ماشین‌کاری شیمیایی و سنگ‌زنی و ایجاد روشی نوین بر محدودیت‌های ذکر شده در هر دو روش ماشین‌کاری فائق آید. در این راستا به بررسی سنگ‌زنی به کمک مایع خورنده $FeCl_3$ فلز آلومینیوم AW7075 پرداخته می‌شود و درباره‌ی تاثیر لایه واکنش یافته بر صافی سطح، عمق نفوذ مایع خورنده به بحث و بررسی پرداخته خواهد شد و کارایی روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از طرفی دیگر جهت بررسی بیشتر روش پیشنهادی با فرایند سنگ‌زنی سنتی مورد مقایسه قرار می‌گیرد و مقدار صافی سطح و خوردگی شعاعی چرخ‌سنگ به عنوان شاخصی جهت مقایسه روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲- طراحی آزمایش

برای انجام آزمایش ابتدا نمونه‌های قطعات آلومینیوم با ابعاد ۲۰×۲۰×۱۰mm از جنس AW7075 که مشخصات و درصد عناصر آلیاژی آن در جدول ۱ داده شده است به وسیله مواد تمیز کننده از هرگونه چربی و گریس و سایر ذراتی که باعث عدم تماس محلول خورنده با سطح قطعه‌کار گردد پاک می‌شود. پس از آماده کردن محلول $FeCl_3$ با غلظت ۲۵٪ وزنی با آب دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، محلول به منطقه ماشین‌کاری پاشیده می‌شود و همزمان با انحلال شیمیایی قطعه‌کار اقدام به براده‌برداری از سطح مورد نظر توسط ماشین سنگ‌زنی می‌شود. در شکل ۱ نمای فرآیند سنگ‌زنی به کمک محلول خورنده[1] نشان داده شده است. همانطور که مشخص است جهت انجام این عملیات از ماشین سنگ‌زنی بهره گرفته شده است. مخزنی پلاستیکی جهت ذخیره محلول خورنده که بوسیله پمپ به محل ماشین‌کاری منتقل می‌شود تعبیه شده است. همچنین جهت جلوگیری از آسیب دیدگی قطعات دستگاه، محلول خورنده مصرف شده به وسیله ورق فرم داده شده‌ایی که با لایه نازکی از پلیمر پوشش داده شده است جمع‌آوری می‌شود. مراحل انجام این فرایند به اینصورت است که ابتدا از مخزن محلول خورنده که در این آزمایش $FeCl_3$ می‌باشد بر روی قطعه‌کار پاشیده شده و انحلال شیمیایی صورت می‌گیرد. هم‌زمان با آن نیز فرآیند ماشین‌کاری سنگ‌زنی اتفاق می‌افتد. این فرایند تا رسیدن قطعه‌کار به ابعاد نهایی تکرار می‌شود. شرایط آزمایش در جدول ۲ خلاصه گردیده است. بعد از انجام آزمایش مقادیر زبری سطح، میزان برداشت ماده و عمق نفوذ محلول خورنده را برای سه زمان ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه اندازه‌گیری می‌شود. لازم به ذکر است مقدارهای زبری سطح توسط دستگاه زبری سنج و مقدار برداشت ماده و عمق نفوذ توسط تصاویر میکروسکوب الکترونی اندازه‌گیری شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- لایه واکنش یافته

فرایند ماشین‌کاری شیمیایی آلومینیوم یا انحلال شیمیایی توسط محلول $FeCl_3$ براساس واکنش شیمیایی با معادله (۱):

$$3\,FeCl_3 + Al \rightarrow 3\,FeCl_2 + AlCl_3 \qquad (1)$$

نشان داده می‌شود که در آن هر اتم AL با سه اتم CL پیوند یونی برقرار می‌کند. هنگام انحلال شیمیایی AL توسط محلول خورنده $FeCl_3$ با ترکیب CL با اتم AL باعث تشکیل لایه‌هایی بر سطح نمونه با نام لایه‌ی واکنش یافته[2] می‌شود (شکل ۲). این لایه مرز مشخصی را دارا نمی‌باشد بلکه دارای ترکیب شیمیایی پیوسته‌ای بین سطح خام قطعه آلومینیومی و محلول خورنده می‌باشد به طوری که در سطح قطعه میزان عنصر آلومینیوم حداکثر مقدار و به تدریج تا تماس با محلول خورنده در حال کاهش می‌باشد. نمودارهای اسکن خطی عناصر لایه نیز بیانگر میزان تغییرات فراوانی عناصر گفته شده در قبل و در مقیاس ۱۶۰ میکرومتر از لایه واکنش یافته می‌باشد. همچنین شکل ۳ نیز نمای شماتیکی از نحوه توزیع اتم‌ها در لایه واکنش یافته را نمایش می‌دهد.

جدول ۱ درصد عناصر شیمیایی آلومینیوم AL7075

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
۹۶	۰/۴	۰/۵	۱/۲-۲	۰/۳	۲/۱-۲/۹	۱/۸-۰/۲	۵/۱	۰/۲

شکل ۱ تجهیزات سنگ‌زنی به کمک ماشین‌کاری شیمیایی

جدول ۲ شرایط انجام عملیات ماشین‌کاری

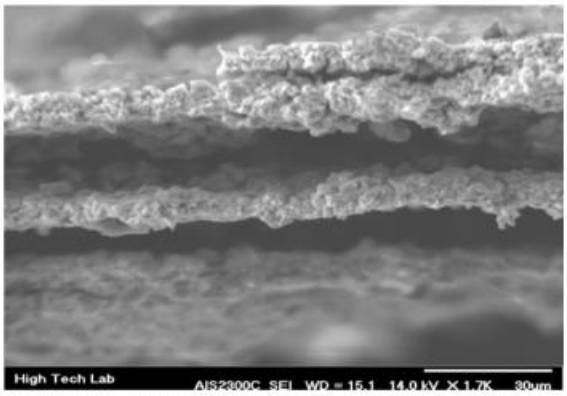
ماشین سنگ‌زنی و فرایند ماشین‌کاری شیمیایی	
مدل	MELLO 30
ماکزیمم سرعت دورانی اسپیندل	۴۰۰۰ Rpm
ماکزیمم توان	۲/۳ Kw
چرخ‌سنگ	GW20020e
سرعت خطی چرخ سنگ	۳۰ m/s
سرعت پیشروی قطعه‌کار	۰/۱۵ m/s
عمق برش	۱۰ µm
قطعه‌کار	AL-EN AW-7075
درسر	درسر تک نقطه‌ای
مایع خورنده	$FeCl_3$
مدت زمان ماشین‌کاری	۵، ۱۰، ۱۵ Min

1. Grinding-Assisted Chemical Etching(GACE)

2. Reaction layer

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲ تصویر میکروسکوپی ازلایه واکنش یافته با بزرگ‌نمایی ۱۷۰۰ برابر

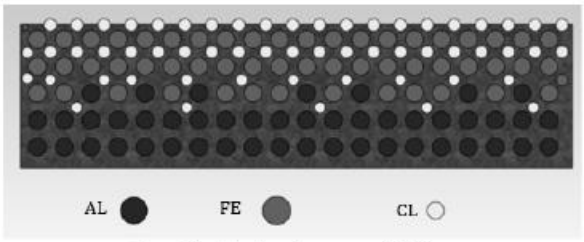
۳-۲- عمق نفوذ

یکی از پارامترهای مهم در ماشین‌کاری شیمیایی عمق نفوذ می‌باشد. شکل ۴ مشخصه‌ها و اجزا آن در فرآیند ماشین‌کاری شیمیایی را نمایش می‌دهد.

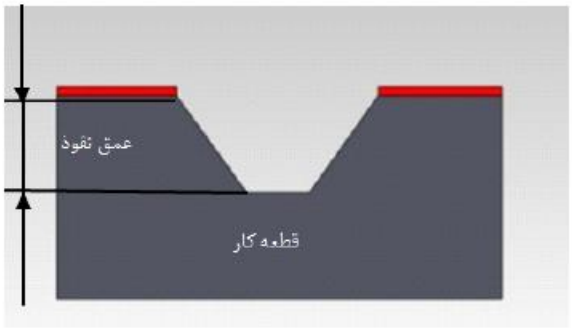
در شکل ۵ تاثیر فرایند ماشین‌کاری شیمیایی روی مقدار عمق نفوذ در مقایسه با سنگ‌زنی به کمک محلول شیمیایی و سنگ‌زنی را در مقدار پیشروی[1] ۰/۰۶ میلی‌متر بر دقیقه نشان داده شده است سایر پارامترهای ماشین‌کاری نیز به صورت ثابت در واحد زمان در نظر گرفته شده‌اند. هنگامی که نمونه تحت تاثیر محلول خورنده قرار می‌گیرد در سطح قطعه لایه واکنش یافته باعث جلوگیری از تماس محلول خورنده با سطح قطعه‌کار و در نتیجه کاهش مقدار نرخ برداشت ماده و کاهش عمق نفوذ خواهد شد. در واقع با روش سنگ‌زنی به کمک ماشین‌کاری شیمیایی این لایه به صورت مداوم برداشته شده و سطح تازه نمونه تحت تاثیر محلول خورنده قرار گرفته و در نتیجه منجر به افزایش عمق نفوذ و نرخ برداشت براده می‌گردد. با قرار گرفتن اتمهای AL در معرض محلول خورنده $FeCl_3$ اتم‌های AL با CL ترکیب شده و به صورت ذرات در ابعاد میکرو از نمونه جدا می‌شوند و مقدار بیشتری از اتم‌های AL با CL واکنش یافته و مقدار برداشت ماده و عمق نفوذ مایع خورنده افزایش می‌یابد. بررسی نتایج بیانگر این موضوع است که با افزایش مقدار عمق نفوذ به دلیل همسان بودن عرض قطعات، مقادیر نرخ برداشت ماده نیز در حدود ۶۰۰ برابر در فرایند سنگ‌زنی به کمک محلول شیمیایی نسبت به ماشین‌کاری شیمیایی افزایش می‌یابد. در سنگ‌زنی معمولی نیز تغییرات عمق نفوذ به صورت خطی با مقدار پیشروی همگام بوده و با افزایش زمان مقدار کمتری عمق نفوذ نسبت به عمق بار داده شده مشاهده می‌شود که این موضوع بعلت فرسایش شعاعی چرخ‌سنگ می‌باشد.

۳-۳- صافی سطح

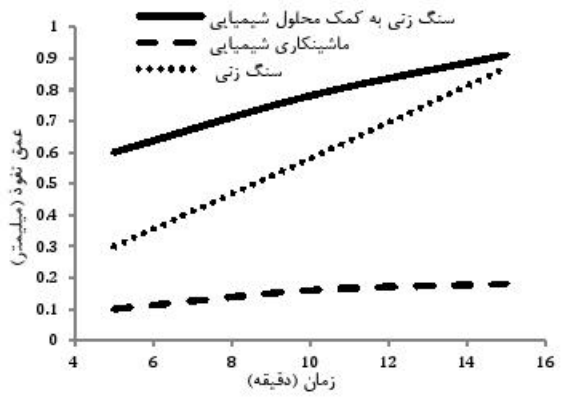
در شکل ۶ به مقایسه سطح تولیدی در روش‌های ماشین‌کاری شیمیایی، سنگ‌زنی سنتی و نیز سنگ‌زنی به کمک محلول شیمیایی پرداخته شده است. در ماشین‌کاری شیمیایی به روش معمول، پس از گذشت مدت زمان، لایه واکنش یافته ضخیم‌تر شده و قسمت‌هایی از آن به صورت توده از سطح قطعه جدا شده و در داخل مایع خورنده ته‌نشین می‌شود اما در بعضی قسمتها هنوز لایه واکنش یافته بر روی سطح نمونه قرار دارد. این ناهماهنگی در جداشدن لایه واکنش یافته باعث می‌شود که سطح قطعه‌کار به صورت ناهماهنگ خورده شده و باعث افت کیفیت سطح گردد. اما با به کار بردن ترکیب فرایند سنگ‌زنی با ماشین‌کاری شیمیایی در واقع در هر بار عمل رفت



شکل ۳ نحوه توزیع اتم‌ها در لایه واکنش یافته



شکل ۴ تشریح پارامتر عمق نفوذ



شکل ۵ مقادیر عمق نفوذ در ماشین‌کاری شیمیایی، سنگ‌زنی و سنگ‌زنی به کمک ماشین‌کاری شیمیایی

و برگشت چرخ‌سنگ لایه واکنش یافته از سطح جدا شده و سطح جدید به طور یکسان در معرض محلول خورنده قرار می‌گیرد و در نتیجه منجر به تولید سطحی یکنواخت پس از فرایند می‌گردد که این موضوع در جدول ۳ به صورت شماتیک نشان داده شده است. از طرفی دیگر فرایند ارائه شده در مقایسه با سنگ‌زنی سنتی منجر به تولید سطحی با کیفیت بالاتر می‌شود. دلیل این است که در سنگ‌زنی سنتی قطعه‌کار آلومینیومی با پدیده کور شدن و چسبیدن براده‌های ایجاد شده به سطح چرخ‌سنگ و قطعه‌کار مواجه خواهیم شد و همین امر باعث کاهش کیفیت سطح در سنگ‌زنی سنتی قطعه‌کارهایی از جنس مشابه آلومینیوم می‌شود. اما در ترکیب کردن روش سنگ‌زنی سنتی با ماشین‌کاری شیمیایی این پدیده رخ نداده و در نتیجه کیفیت سطح بدست آمده نیز مطلوب‌تر خواهد بود.

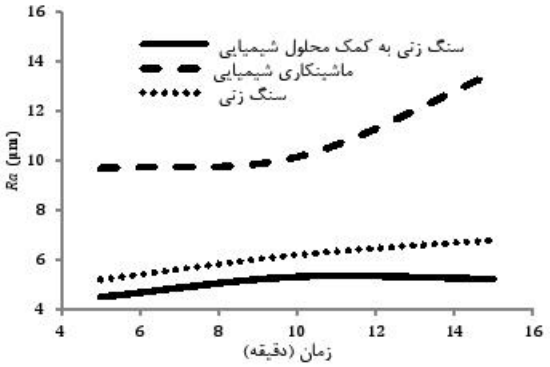
همچنین جهت مقایسه بهتر، تصاویر میکروسکوپی از کیفیت سطح حاصل شده پس از فرایند ماشین‌کاری شیمیایی و سنگ‌زنی به کمک

1. Infeed

www.SID.ir

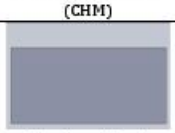
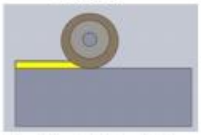
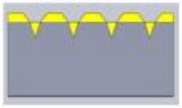
Archive of SID

ماشین‌کاری شیمیایی در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۶ مقادیر زبری سطح در ماشین‌کاری شیمیایی، سنگ‌زنی سنتی و سنگ‌زنی به کمک ماشین‌کاری شیمیایی

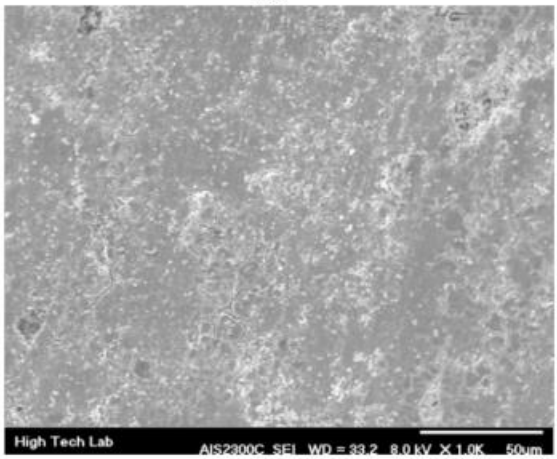
جدول ۳ مقایسه شماتیک ماشین‌کاری شیمیایی و ترکیب این فرایند با سنگ‌زنی

مرحله	ماشین‌کاری شیمیایی (CHM)	سنگ‌زنی به کمک محلول شیمیایی (GACE)
۱	 تماس قطعه با محلول	تماس قطعه با محلول
۲	پس از مدتی لایه واکنش یافته تشکیل می‌شود	پس از مدتی لایه واکنش یافته تشکیل می‌شود
۳	قسمت‌هایی از لایه واکنش یافته از سطح جدا شده و بعضی قسمت‌ها باقی می‌ماند	 به وسیله ابزار سنگ‌زنی لایه واکنش یافته به طور مداوم برداشته می‌شود
۴	 با جدا شدن قسمت‌هایی ازلایه واکنش یافته سطح جدید قطعه در معرض محلول خورنده قرار می‌گیرد	سطح جدید پس از برداشت لایه واکنش یافته به طور یکسان مجددا در معرض محلول خورنده قرار می‌گیرد
۵	سطح تهایی قطعه‌کار	سطح تهایی قطعه‌کار

با توجه به شکل ۷، مشخص است که پس از ماشین‌کاری شیمیایی مقداری براده به سطح قطعه‌کار چسبیده و مقداری نیز از سطح جدا شده است این ناهماهنگی در جدا شدن ذرات منجر به کاهش کیفیت سطح می‌گردد و این در حالیست که این ضعف در ترکیب ماشین‌کاری شیمیایی با فرایند سنگ‌زنی مرتفع می‌شود. در فرآیند سنگ‌زنی نیز به علت حرارت بالای فرآیند و همچنین نقطه ذوب پایین آلومنیوم لایه‌های سطحی قطعه کار ذوب شده و در سطح پخش می‌شوند که این امر منجر به افزایش زبری سطح می‌گردد همچنین لایه‌های ذوب شده در خلل و فرج چرخ‌سنگ نفوذ کرده و باعث کور شدن چرخ‌سنگ [1] نیز می‌شود.

(الف)

(ب)



(پ)

شکل ۷ تصاویر میکروسکوپی از سطوح تولیدی در روش الف و ب- ماشین‌کاری شیمیایی در بزرگنمایی‌های به ترتیب ۱۰۰۰ و ۲۱۰۰ برابر پ- سنگ‌زنی به کمک

1. wheel loading

www.SID.ir

Archive of SID

ماشین‌کاری شیمیایی در بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر

۳-۴- نسبت سنگ‌زنی

یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی و مقایسه فرایندهای سنگ‌زنی نسبت سنگ‌زنی[1] می‌باشد. نسبت سنگ‌زنی در واقع معیاریست برای محاسبه خوردگی ابزار و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱۳].

$$G-ratio=\frac{V_w}{V_s} \quad (۲)$$

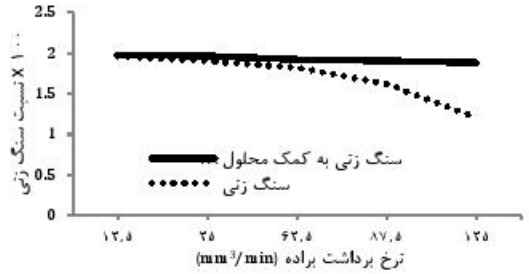
که در آن V_w مقدار حجم ماده برداشته شده از قطعه‌کار و V_s مقدار حجم جدا شده از چرخ‌سنگ می‌باشد که با کنده‌شدن دانه‌ها ابعاد شعاعی چرخ-سنگ نیز تغییر می‌کند. جهت اندازه‌گیری سایش چرخ‌سنگ روش‌های مختلفی وجود دارد. یکی از روش‌های کارآمد که بعضی از محققان از آن جهت محاسبه مقدار فرسایش شعاعی چرخ‌سنگ به‌کار برده‌اند استفاده از تیغ اصلاح جهت محاسبه سایش چرخ‌سنگ می‌باشد [۱۲]. در این روش به موازات قطعه‌کار تیغ اصلاح قرار داده می‌شود سپس به میزان مورد نظر به ماشین دستور عمق برش داده شده از تفاضل مقدار پیشروی که به ماشین داده شده و عمق پله ایجاد شده بر روی تیغ می‌توان مقدار سایش چرخ‌سنگ را بدست آورد. شکل ۸ نتایج حاصل از مقدار نسبت سنگ‌زنی در دو فرایند سنگ‌زنی به کمک محلول شیمیایی و سنگ‌زنی سنتی را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار با افزایش مقدار نرخ برداشت براده در سنگ‌زنی مقدار نسبت سنگ‌زنی کاهش پیدا کرده و فرسایش شعاعی چرخ سنگ افزایش می یابد اما در فرآیند سنگ‌زنی به کمک محلول شمیایی نسبت سنگ‌زنی با افزایش مقدار نرخ برداشت ماده تغییر کمتری نسبت به سنگ‌زنی دارد و فرسایش شعاعی چرخ‌سنگ کمتر می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی ماشین‌کاری شیمیایی خالص، ترکیب آن با فرایند سنگ‌زنی و سنگ‌زنی یک نمونه از آلیاژهای آلومینیوم پرداخته شده است. جهت بررسی و مقایسه روش‌های مذکور از پارامترهای مقدار عمق نفوذ یا برداشت براده، نسبت سنگ‌زنی و همچنین کیفیت سطح حاصل شده استفاده شده است که نتایج حاصل از این تحقیق را می‌توان به‌صورت زیر دسته‌بندی کرد:

ترکیب ماشین‌کاری شیمیایی با فرایند سنگ‌زنی به دلیل برداشت مکانیکی لایه واکنش یافته توسط چرخ‌سنگ و در نتیجه افزایش سطح تماس قطعه‌کار با محلول خورنده منجر به انحلال بیشتر قطعه‌کار و در نتیجه افزایش نرخ برداشت ماده می‌شود.

برداشت مداوم لایه واکنش یافته توسط یک ابزار، پرداخت بهتری نسبت به ماشین‌کاری شیمیایی خالص را نتیجه می‌دهد که این امر به دلیل عدم چسبیدن و باقی ماندن براده روی سطح می‌باشد.



شکل ۸ محاسبه مقدار نسبت سنگ‌زنی در سنگ‌زنی به‌کمک محلول شیمیایی و سنگ‌زنی

نسبت سنگ‌زنی درفرایند سنگ‌زنی به کمک محلول شیمیایی در مقایسه با سنگ‌زنی سنتی بیشتر بوده که این امر بیانگر کم بودن فرسایش چرخ سنگ در روش ارائه شده می‌باشد.

۵- مراجع

[1] T. J. Drozda, C. Wick, *Nontraditional machining in: Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, pp. 14-81, SME Publication, 1989.
[2] A. F. Tehrani, E. Imanian, A new etchant for the chemical machining of St304, *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 55, pp. 404-408, 2004.
[3] W. T. Harris, Chemical machining: *the Technology of cutting Materials by Etching*, Clarendon press, 1976.
[4] M. A. David , J. A. Heather, Characterization of aqueous ferric chloride etchants used in industrial photochemical machining, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 149, pp. 238-245, 2004.
[5] O. Cakir, Copper etching with cupric chloride and regeneration of waste etchant, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 175, pp. 63-68, 2006.
[6] O. Cakir, H. Temel, M. Kiyak, Chemical etching of Cu-ETP copper, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 162, pp. 275-279, 2005.
[7] J. M. Park, S.C. Jeong, H.W. Lee, H.D. Jeong, E. Lee, A study on the chemical mechanical micro-machining (C3M) process and its application, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130, pp. 390-395, 2002.
[8] K. Tagashira, The chip formation mechanism of orthogonal cutting for pure iron coated with dilute Oleic acid, *Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 66, No. 12, pp. 1917-1921, 2000.
[9] M. Yoshiro, Some experiment on the scratching of silicon: in situ scratching inside an SEM and scratching under high external hydrostatic pressures, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp. 335-347, 2001.
[10] J. P. Choi, B. H. Jeon, B. H. Kim, Chemical-assisted ultrasonic machining of glass, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 191, pp. 153-156, 2007.
[11] W. Ying-Lang, T. Wei-Tsu, C. Shih-Chieh, Chemical-mechanical polish of aluminum alloy thin films: slurry chemistries and polish mechanisms, *Thin Solid Films*, Vol. 474, pp. 36-43, 2005.
[12] A. H. Azizi, S. M. rezaei, A. rahimi, Study on the rotary cup dressing of CBN grinding wheel and the grinding performance, *International Journal of Advanced manufacturing Technology*, Vol. 47, pp. 1053-1063, 2010.
[13] I. D. Marinescu, M. P. Hitchiner, E. Uhlmann, W. Rowe, I. Inasak, *Handbook of Machining with Grinding Wheels*, pp. 487-489, Florida : CRC Press, 2006.
[14] H. S. Lee, H.D. Jeong, Semi-empirical material removal rate distribution model for SiO_2 chemical mechanical polishing (CMP) processes, *Precision Engineering*, Vol. 37, pp. 483-490, 2013.
[15] S. Gates, S. P. Rao, Effects of chemical mechanical polishing on a porous SiCOH dielectric, *Microelectronic Engineering*, Vol. 91, pp. 82-88, 2012.
[16] A. Beaucamp, Y. Namba, Process mechanism in shape adaptive grinding (SAG), *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 64, pp. 305-308, 2015.

2. G-ratio

www.SID.ir