دانشکده مهندسی
گروه مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

بررسی پارامترهای میکرو سوراخکاری تخلیه الکتریکی روی تنگستن کاربید

نگارنده:

نیما تفضلی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی مکانیک گرایش ساخت و تولید

استاد راهنما:

دکتر علی اکبر اکبری

آبان ۱۳۹۲

تائیدیه

گواهی می‌شود که این پایان‌نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن به جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

دانشجو: نیما تفضلی امضاء تاریخ

استاد راهنما: دکتر علی‌اکبر اکبری امضاء تاریخ

بسمه تعالی

دانشگاه فردوسی مشهد

صورتجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

جلسه دفاع از پایان نامه آقای نیما تفضلی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی مکانیک** گرایش **ساخت و تولید** در ساعت **۱۳** روز **۱۳۹۲/۹/۹** در محل **کلاس ۳۱۳** دانشکده مهندسی با حضور امضا کنندگان ذیل تشکیل گردید. پس از بررسی های لازم، هیأت داوران پایان نامه نامبرده را با نمره به عدد ..... به حروف ..... و با **درجه** ..... مورد تأیید قرار داد.

عنوان رساله

دستورالعمل نحوه نگارش پایان نامه ارشناسی ارشد

هیئت داوران امضا

- **داور: دکتر فرهاد کلاهان**

  دانشیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- **داور و نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر بهنام معتکف ایمانی**

  استاد گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- **استاد راهنما: دکتر علی‌اکبر اکبری**

  استادیار گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

- **مدیر گروه: دکترمسعود طهانی**

  استاد گروه مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

تقدیم به مادر مهربان و پدر بزرگوارم که دانش ناچیزم مرهون تلاشهای ایشان می باشد.

تقدیم به خواهر و برادرم که همواره در طول تحصیل متحمل زحماتم بودند و تکیه گاه من در

مواجهه با مشکلات، وجودشان مایه دلگرمی من می باشد.

اکنون که باعنایت پروردگار کارنگارش این پایان نامه به سرانجام رسید، وظیفه می دانم مراتب امتنان و سپاس خودرا از استادبزرگوارم جناب آقای

دکتر علی اکبر اکبری بجای آورم. ایشان با محیاکردن شرایط و ارائه راهنمایی های ارزشمند، امکان انجام گرفتن این امر را فراهم کردند، همچنین از

جناب آقای مهندس **احسان ایمانیان** نیزکمال تشکر و سپاس را دارم، ایشان با دقت، دانش و تجربیات گرانسنگ خود در طی مراحل انجام این پژوهش

دلسوزانه یاری ام نمودند.

همچنین از توجه و دقت نظر اساتید گرامی آقایان **دکتر معتکف** و **دکتر کلاهان** که با صرف وقت ارزشمندشان سهم بسزایی در برطرف نمودن اشکالات و

کاستی های پژوهش حاضر داشته اند نیز صمیمانه سپاس گذاری می شود. بدون شک تعهد مثال زدنی ایشان الگویی بی بدیل در آینده کاری اینجانب خواهد بود.

و با تشکر خالصانه خدمت همه کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده اند.

چکیده فارسی

بسمه تعالی

مشخصات پایان نامه تحصیلی مقطع کارشناسی ارشد

دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان پایان نامه: بررسی پارامترهای میکرو سوراخکاری تخلیه الکتریکی روی تنگستن کاربید

نام نویسنده: نیما تفضلی

نام استاد راهنما: دکتر علی اکبر اکبری

دانشکده: مهندسی	گروه: مکانیک	**رشته تحصیلی:** مهندسی مکانیک- ساخت و تولید
تاریخ تصویب:		**تاریخ دفاع:**
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ● **دکتری** ○		**تعداد صفحات:** .....

چکیده پایان نامه:

ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پروسه‌ای است که در آن مواد از طریق جرقه‌های الکتریکی بین الکترود و قطعه‌کار بصورت غوطه‌ور در سیال دی‌الکتریک به‌وسیله یک عمل سایشی برداشته می‌شود. این روش در سطح میکرونی برای ایجاد میکرو سوراخ و میکرو شیار را میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی می‌نامند، روش EDM یک روش الکتروترمال است و امکان ماشین‌کاری مواد رسانا بسیار سخت با هر استحکامی و تنش تسلیم بالایی را دارد. تنگستن کاربید از جمله موادی سخت و شکننده است که مقاومت به حرارت بالا و همچنین خوردگی بسیارکمی دارد، که می‌تواند در زمینه‌های قالب‌سازی، هوافضا، ابزارسازی و لوازم جراحی در علوم پزشکی کاربردهای بسیاری داشته باشد. در این تحقیق به بررسی پارامترهای میکرو سوراخ‌کاری تخلیه الکتریکی به‌منظور دستیابی به یک روند صحیح برای میکرو ماشین‌کاری تخلیه الکتریکی پرداخته شده است. در این پژوهش تنگستن کاربید باضخامت ۳۰۰ میکرومتر و سختی 82HRC به‌عنوان قطعه کار انتخاب‌شده که با ساخت ابزاری با قطری کمتر از ۱۵۰ میکرومتر از جنس تنگستن-مس (۷۰٪ به۳۰٪)، با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی L16 برای پارامترهای ولتاژ، جریان الکتریکی، زمان روشنایی پالس، سرعت دورانی ابزار، زمان خاموشی پالس و نوع منبع تغذیه، میکرو سوراخ‌هایی با تلرانس استاندارد به قطر $0.23^{+0.05}_{-0.05}$ بر روی تنگستن کاربید ایجاد شده است، نرخ برداشت مواد، فرسایش ابزار و کیفیت لبه سوراخ مورد بررسی قرار گرفته و تحلیل آن‌ها ارائه شده است. در این تحقیق، در مدار RC نسبت به مدار ایزوپالس نتایج بهتری بدست آمده است و ولتاژ بالا، نرخ برداشت کمتر ولی سایش ابزار بیشتر را در برداشته است.

کلید واژه:

۱. ماشینکاری تخلیه الکتریکی
۲. میکرو سوراخکاری تخلیه الکتریکی
۳. تنگستن کاربید
۴. تنگستن- مس

امضای استاد راهنما:.....

تاریخ:.....

فهرست

۱ فصل اول: مقدمه ۲

۱-۱ پیشگفتار ۲

۱-۲ تاریخچه ماشینکاری ۳

۱-۳ میکرو ماشینکاری ۶

۱-۳-۱ میکرو ماشینکاری مدرن ۱۰

۱-۴ مرور بر تحقیقات گذشته ۱۰

۱-۵ ضرورت تحقیق و مراحل اجرا ۱۵

۱-۶ ساختار پایان نامه ۱۷

۲ فصل دوم: ماشینکاری تخلیه الکتریکی ۱۹

۲-۱ پیشگفتار ۱۹

۲-۲ تعریف ماشینکاری تخلیه الکتریکی ۲۰

۲-۳ تاریخچه ۲۰

۲-۴ فرآیند باربرداری ماشینکاری تخلیه الکتریکی ۲۱

۲-۵ قابلیت‌های ماشینکاری تخلیه الکتریکی ۲۴

۲-۶ انواع جرقه ایجاد شده در EDM ۲۶

۲-۶-۱ مدار باز ۲۶

۲-۶-۲ اتصال کوتاه ۲۶

۲-۶-۳ جرقه اسپارک ۲۷

۲-۶-۴ جرقه آرک ۲۷

۲-۷ سیستم مولد قدرت ماشین ۲۸

۲-۷-۱ منبع تغذیه پالسی ۲۹
۲-۷-۲ ژنراتور قدرت RC ۳۱
۲-۸ سیال دی‌الکتریک ۳۳
۲-۹ جنس ابزار ۳۶
۲-۱۰ سایش ابزار ۳۹
۲-۱۰-۱ انواع مختلف سایش ۴۰
۲-۱۱ پارامترهای ماشینکاری تخلیه الکتریکی ۴۱
۲-۱۱-۱ پارامترهای ورودی ۴۲
۲-۱۱-۲ پارامترهای خروجی ۴۴
۲-۱۲ میکرو ماشینکاری تخلیه الکتریکی ۴۴
۲-۱۲-۱ میکرو اسپارک ۴۶
۲-۱۲-۲ میکرو تخلیه الکتریکی سوراخکاری ۴۷
۲-۱۲-۳ میکرو تخلیه الکتریکی فرزکاری ۴۸
۲-۱۲-۴ روش‌های ساخت میکرو الکترود ۴۸
۲-۱۲-۵ تجهیزات مورد نیاز در فرآیند میکرو تخلیه الکتریکی ۵۳
۲-۱۲-۶ روش‌های تلفیقی EDM با سایر روش‌های ماشینکاری ۵۵
۳ فصل سوم: انجام آزمایشات ۶۳
۳-۱ مقدمه ۶۳
۳-۲ پارامترها و سطوح انتخابی ۶۴
۳-۳ طراحی ماتریس آزمایش ۶۶
۳-۴ متغیرهای پاسخ و اندازه‌گیری آن‌ها ۶۷

۳-۴-۱ نرخ ماشینکاری ۶۸
۳-۴-۲ میزان سایش ابزار ۶۹
۳-۴-۳ کیفیت لبه ورودی سوراخ ۷۰
۳-۵ تجهیزات و وسایل اندازه‌گیری ۷۱
۳-۵-۱ ماشین تخلیه الکتریکی ۷۱
۳-۵-۲ میکروسکوپ الکترونی روبشی ۷۷
۳-۵-۳ کرنومتر ۷۸
۳-۶ انتخاب جنس ابزار و قطعه‌کار ۷۸
۳-۶-۱ جنس ابزار ۷۸
۳-۶-۲ جنس قطعه‌کار ۷۹
۳-۷ فرآیند ساخت ابزار و آماده‌سازی ۸۲
۴ تحلیل نسبت سیگنال به نویز و مدل‌سازی رگرسیونی ۸۹
۴-۱ مقدمه ۸۹
۴-۲ تحلیل نسبت سیگنال به نویز ۹۰
۴-۲-۱ تحلیل نسبت سیگنال به نویز در نرخ برداشت مواد ۹۰
۴-۲-۲ تحلیل نسبت سیگنال به نویز در سایش ابزار ۹۲
۴-۲-۳ تحلیل نسبت سیگنال به نویز کیفیت لبه ورودی سوراخ ۹۵
۴-۳ مدل رگرسیونی ۹۸
۴-۳-۱ مدل رگرسیونی مرتبه دوم نرخ برداشت مواد ۹۸
۴-۳-۲ مدل رگرسیونی مرتبه دوم سایش ابزار ۱۰۰
۴-۳-۳ مدل رگرسیونی مرتبه دوم کیفیت لبه ورودی سوراخ ۱۰۲

۴-۴ انجام آزمایش‌های تاییدیه و مقایسه با مدل‌های ریاضی رگرسیونی ۱۰۴
۵ تحلیل نتایج و بحث ۱۱۰
۵-۱ مقدمه ۱۱۰
۵-۲ تحلیل نرخ برداشت مواد ۱۱۱
۵-۳ تحلیل سایش ابزار ۱۱۵
۵-۴ تحلیل کیفیت لبه سوراخ ۱۱۹
۶ فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۲۸
۶-۱ مقدمه ۱۲۸
۶-۲ نتیجه گیری ۱۲۹
۶-۳ ارائه پیشنهاد برای پژوهش‌های آینده ۱۳۳
۷ ضمیمه ۱۳۵
۷-۱ طراحی آزمایش تاگوچی ۱۳۵
۷-۲ تجزیه و تحلیل داده‌ها ۱۳۸
۷-۲-۱ آزمون فرض ۱۳۹
۷-۲-۲ کاربرد p-value در آزمون فرض ۱۳۹
۷-۲-۳ تجزیه و تحلیل واریانس ۱۴۰
۷-۲-۴ تحلیل نسبت سیگنال به نویز (S/N) ۱۴۲
۷-۲-۵ مدل رگرسیون ۱۴۴
۸ منابع ..... أ

فصل اول: مقدمه

۱ فصل اول: مقدمه

۱-۱ پیشگفتار

میکرو ماشینکاری یک تاریخچه طولانی از زمان انقلاب صنعتی دارد. توسعه صنعت ساعت سازی، حکایت از اولین ماشینکاری در ابعاد ریزسازی دارد. تولید این قطعات کوچکتر از میلیمتر، نیاز به ماشین ابزارهای گوناگون ویژه داشت؛ ماشین تراش سویس، یک نمونه از این ماشین آلات است که این نیاز را برطرف کرد. نیاز بیشتر به قطعات میکرو باعث توسعه روش‌های میکرو ماشینکاری و پروسه‌های دیگر نظیر تکنیک‌های رسوب دهی ماده و همچنین متدهای وابسته به فوتولیتوگرافی شد. از قطعات میکرو بطور مستقیم در ساخت میکرو سیستم‌های الکترو مکانیکی استفاده می‌شود[۱]. در این فصل تکنولوژی ماشینکاری، میکرو ماشینکاری و انواع روش‌های آن را معرفی شده است و در ادامه کلیات پروژه بیان شده است.

۱-۲ تاریخچه ماشینکاری

قطعات ساخته شده توسط ریخته‌گری، آهنگری و فرآیندهای ورق‌کاری مختلف اغلب نیازمند عملیات ویژه‌ای قبل از آماده‌سازی برای استفاده و یا مونتاژ می‌باشند. در خیلی از کاربردهای مهندسی، قطعات به منظور کارکرد شایسته و قابل اعتماد در زمان استفاده از آنها باید قابل تعویض باشند؛ بنابراین کنترل ابعادی دقیق و صافی سطح قطعات در ساخت آن‌ها نیاز است، ماشین‌کاری شامل حذف برخی مواد از قطعه‌کار به منظور تولید یک هندسه خاص در درجه‌ای از صافی سطح و دقت ابعادی تعریف شده می‌باشد.

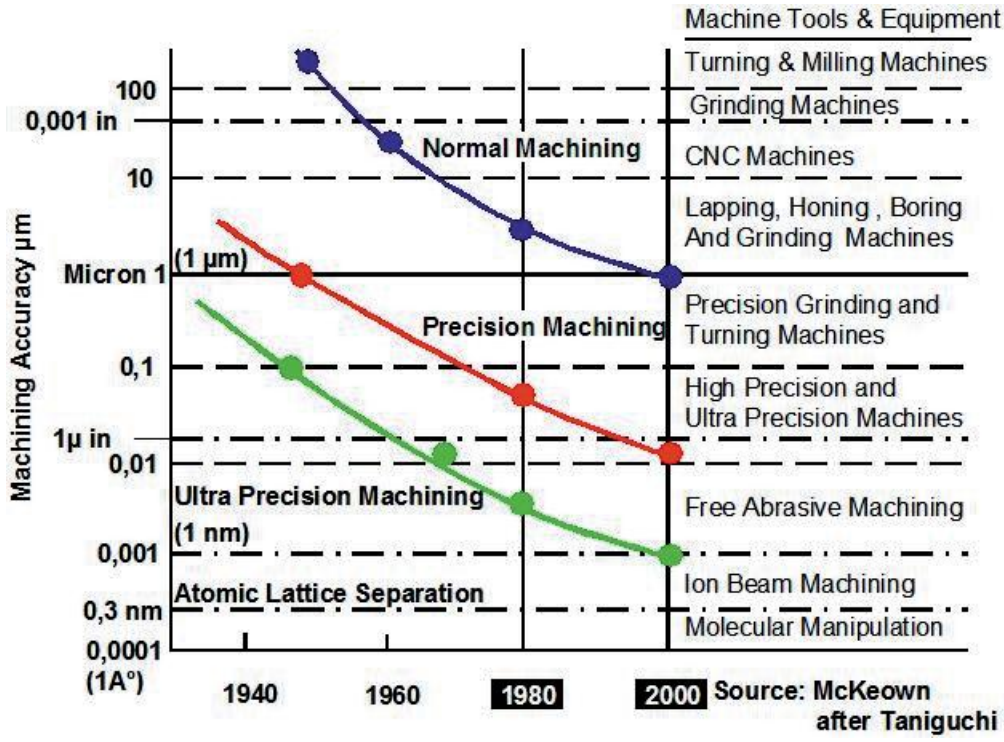
از زمان‌های دورتر روش‌های برشکاری مواد با استفاده از ابزارهای دستی ساخته شده از استخوان، سنگ و یا چوب انجام شده است. بعداً ابزارهای دستی از مواد اولیه مثل آهن، برنز ساخته شد که در یک دوره تقریبا یک میلیون ساله مورد استفاده قرار می‌گرفت. در واقع در قرن هفدهم، ابزارها با روش‌های اولیه بصورت دستی و یا حرکت مکانیکی ساخته می‌شدند، اسلحه‌ها، کشتی‌ها و لوازم و ابزارهای ابتدایی مورد مصرف روزانه با این روش‌ها ساخته شده بودند. با معرفی آب، بخار و بعداً الکتریسیته بعنوان منبع مفید انرژی تمایل به تولید ماشین ابزار قویتر افزایش یافت بطوریکه به سرعت جایگزین ابزارهای متحرک دستی در خیلی از کاربردها شدند.

بر اساس این پیشرفت و در کنار توسعه متالورژی آلیاژ آهن بعنوان مواد ابزار برشکاری، انواع ماشین ابزار جدید صنعتی همچون ماشین پیچ بری، ماشین ورق کاری و شکل دهی، ماشین سوراخ‌کاری با دریل مارپیچ، ماشین فرزکاری، ماشین سنگ زنی، اره‌های نواری، تراشکاری مخروطی در قرن نوزدهم و هجدهم بوجود آمد.

با وجود این پیشرفت‌ها، ماشین ابزار سنتی بر این اصل استوار است که ابزار باید از جنسی سخت تر از قطعه‌کار باشد. در مدت ماشینکاری توسط روش‌های سنتی، یک نقشه از طرح نهایی قطعه به اپراتور داده می‌شود، او استراتژی ماشینکاری، انتخاب ماشین، ابزارها، سرعت‌ها و پیشروی‌ها را تعیین می‌کند.

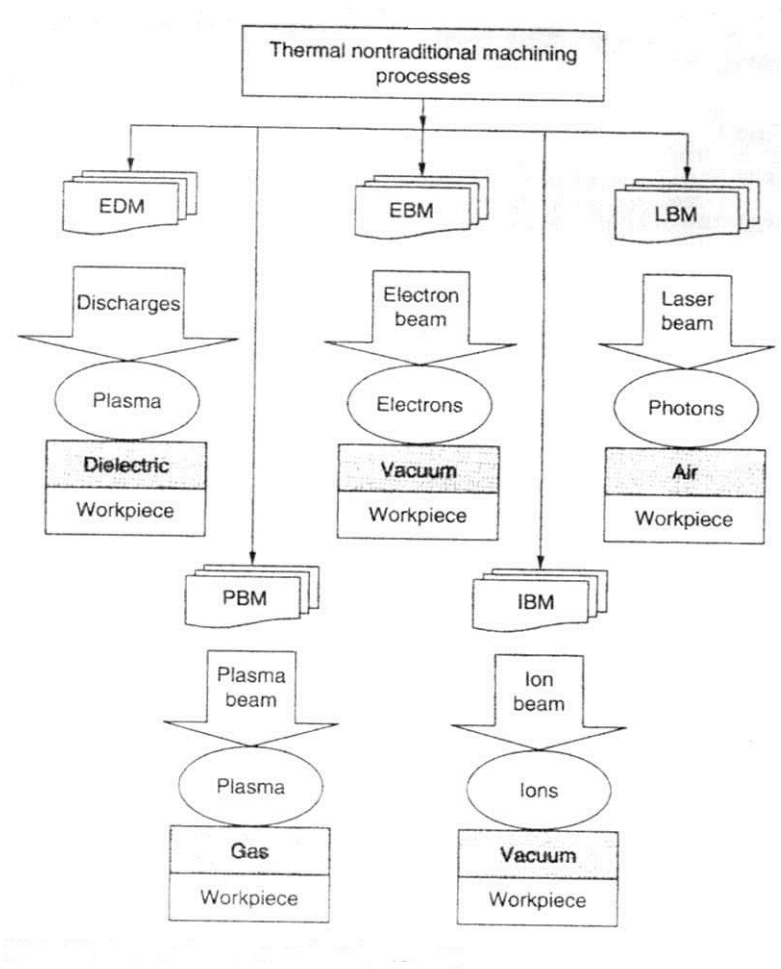
اپراتورهای ماهر نیز در برخی موقعیت‌ها در کنترل کیفی دقت ابعادی و صافی سطح قطعات عملکرد راضی کننده‌ای نداشته‌اند. بیشتر توسعه‌ها برای ماشین‌های سنتی بر اساس تکنولوژی کپی برداری، طراحی با کامپیوتر و مکانیزم اتوماتیک بوده است که نیاز به کارگر کاهش یافته و درنتیجه دقت تولید افزایش یافته است.

معرفی تکنولوژی کنترل عددی (NC) در سال ۱۹۵۳ درهای وسیعی ار کنترل عددی کامپیوتر (CNC) و کنترل عددی مستقیم (DNC) بر روی ماشینکاری مرکزی که تولید دقیق و یکنواخت در حال افزایش بود گشود. پیشرفت‌ها در فرآیندهای ماشینکاری و ماشین ابزارها در ۵۰ سال گذشته، بعلت پیشرفت سریع در الکتریسیته و صنایع کامپیوتری بوده است. طراحی هوشمندانه ماشین ابزارهای سنتی قادر ساخته است که شکل های پیچیده‌ای با دقت ابعادی ۱± میکرومتر تولید شود. همانطور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است بیشتر توسعه های اخیر در ماشینکاری سنتی شامل دقت سوراخ‌ها، سنگ زنی و ماشین‌های فوق دقیق است که سطح دقت ۱± میکرومتر توسط آن‌ها ممکن است[۲].



شکل-۱دقت‌های ماشینکاری[۲]

در قرن نوزدهم و بیستم پدیده‌های فیزیکی کشف شد که در هنگام اختراع این ماشین‌ها ناشناخته بودند. در برخی از موارد اصول این پدیده‌ها در ایجاد یک روش کاملا جدید ماشینکاری که بر اساس براده برداری مرسوم نبود به کار رفته است. از سوی دیگراین اصول فیزیکی کشف شده برای غلبه بر مشکلات صنعتی جدید مثل ماشینکاری مواد و آلیاژهای جدیدی که طبیعتاً ماشینکاری آنها با ماشین ابزارهای مرسوم مشکل است به کار می‌رود. در سال ۱۹۸۶ موادی سخت تر، چقرمه تر، با استحکام بیشتر و تا حد زیادی خصوصیات مکانیکی، شیمیایی و گرمایی مواد مهندسی بهبود یافته، مثل آلیاژهای استحکام بالا، مقاوم در برابر حرارت، کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، سرامیکها، استلیت‌ها (آلیاژهای پایه کبالت) و کاربیدها برای تولید معرفی شد. خواص مکانیکی این مواد وهزینه بالای ماشینکاری سرامیک‌ها و کامپوزیت‌ها، مانع سختی در برابرماشینکاری آنها با روش مرسوم است؛ بنابراین روشهای ماشینکاری مختلفی که تحت تأثیر استحکام مکانیکی نباشد مورد توجه قرار گرفت. کاربرد این روش‌های جدید تحت تأثیرعوامل دیگری مثل رسانایی گرمایی و الکتریکی جنس قطعه کار، دمای ذوب و معادل الکتروشیمیایی آن است. علاوه بر ماشینکاری قطعات خیلی سخت، مواد جدید اغلب باید به شکلهای پیچیده‌ای و در اکثر موارد با ساختار استحکام کم و اجزاء میکرومکانیک با تلرانس کم و کیفیت سطح خوب؛ ماشینکاری شوند و این کار توسط روشهای مرسوم ممکن نیست. روش‌های پیشرفته‌ای ارائه شده که شکل‌های پیچیده را بدون مشکل خاصی به راحتی ماشینکاری می‌کند. این روش‌های جدید یک نقش قابل توجه ای در هوافضا، اتومبیل، ابزارسازی، قالب سازی و صنایع ساخت قالب ایفا می‌کنند. ماشینکاری غیرسنتی گرمایی درشکل ۱-۲ مطابق نوع فعالیت ماشینکاری که سبب حذف مواد از قطعه کار می‌شوند طبقه بندی شده‌اند[۲].

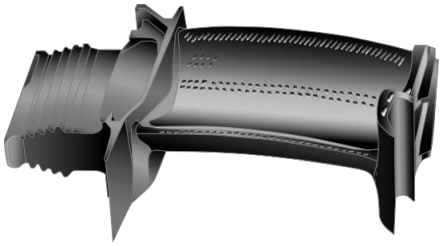


شکل-۲ فرآیندهای غیرسنتی گرمایی [۲]

۱-۳ میکرو ماشینکاری

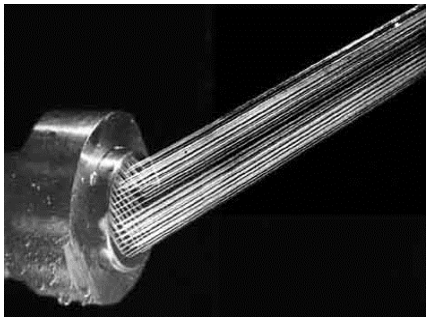
تولید در اندازه کوچک، تکنولوژی برای تولید اجزاء و قطعات مینیاتوری است. ساخت میکرو و نانو قطعات، کلیدی به منظور توسعه صنایع مدرن در اکثر کشورها است. درحال حاضر، استفاده از میکرو اجزاء و قطعات مینیاتوری ساخته شده از فلزات، پلیمرها، سرامیک‌ها، کامپوزیت‌ها و مواد پیشرفته در محیط های مختلف علمی و صنعتی به دلیل خصوصیات ویژه آنها و با کاربردهایی در زمینه هوافضا، اتومبیل، پزشکی و بیولوژی، الکترونیک، ارتباطات، محیط زیست و صنایع دفاعی رو به افزایش است[۳]. مینیاتورسازی سیستم میکروسازی است که افزایش مراقبت های بهداشتی، کیفیت زندگی و رشد اقتصادی را وعده می‌دهد و در برنامه‌های کاربردی مانند کانال‌های میکرو برای آزمایشگاه بر روی تراشه،

شکل آلیاژ حافظه استنت، کانال‌های گرافیت، سلول سوختی، محرک‌ها و سنسورهای خیلی کوچک، دستگاه‌های پزشکی، میکرو ربات و کپسول‌هایی که برای یک دوره درمانی وارد بدن انسان می کنند، میکرو سوراخ‌ها در پره توربین به منظور خنک سازی، میکرو سوراخ در تولید نخ مصنوعی، میکرو سوراخ در نازل انژکتور و میکرو شیار به منظور ایجاد ترکی در آزمایش‌های علمی شکست ارائه خواهد داد.

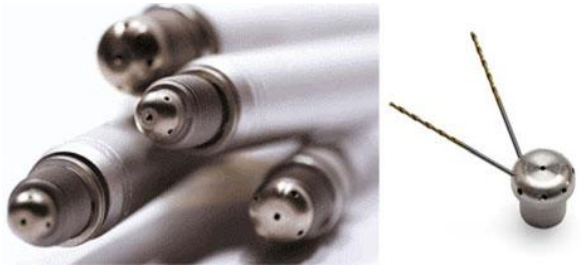


شکل -۳ میکرو سوراخ در پره توربین

شکل-۴ میکرو قالب



شکل-۵ میکرو سوراخ در نخ مصنوعی

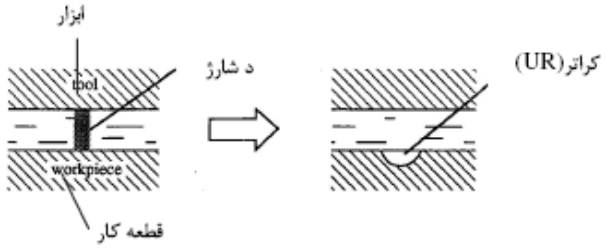


شکل -۶ میکرو سوراخ در نازل انژکتور

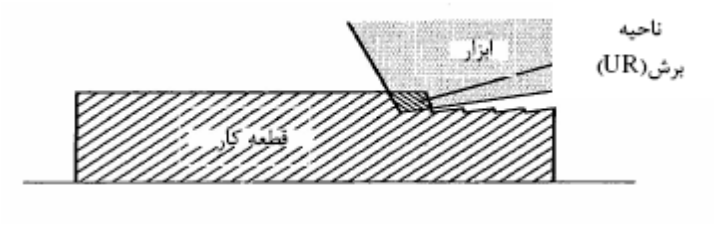
عبارت میکرو ماشینکاری از حذف مواد در ابعاد خیلی کوچک که محدوده آن از چندین میکرون تا یک میلی متر است گرفته شده است. همچنین، بعنوان یک عبارت فنی، به معنای مقدار کوچک ماشینکاری است که نمی توان بطور مستقیم از تکنیک های معمولی بدست آورد، تعریف می‌شود[۴].

یکی از مسائل مهم در ماشین کاری دقیق، واحد جداسازی می‌باشد. واحد جداسازی، حجم یا توده‌ای سه بعدی است که از قطعه کار بر طبق واحد ماشین کاری جدا می‌شود. بعنوان مثال، EDM را در نظر بگیرید. اختلاف بین اندازه قطعه کار قبل و بعد از تخلیه الکتریکی، یک حفره، بعنوان واحد جداسازی شناخته می‌شود (شکل ۱-۴)، هنگامی که پروسه پیوسته است مانند تراشکاری، واحد جداسازی دو بعدی بیشتر مفید است. در چنین موردی محدوده هاشور زده در شکل ۱-۵، به عنوان واحد جداسازی شناخته

می‌شود. یک واحد جداسازی هرچه کوچکتر برای ماشین کاری دقیق و بخصوص میکروماشین کاری، مطلوب است. واحد جداسازی کوچک همچنین از لحاظ نیروهای ماشین کاری مهم می‌باشد. در پروسه های مکانیکی هنگامی که واحد جداسازی بزرگتر می‌شود، نیروهای ماشین کاری هم افزایش پیدا می‌کنند[۱].



شکل **.Error! No text of specified style in document.**-۷ واحد جداسازی در EDM [۱]



شکل ۸ واحد جداسازی در تراشکاری [۱]

قطعات بسیار کوچک دقیق که از مواد مهندسی گوناگون ساخته شده اند، نقش کلیدی در توسعه طیف گسترده‌ای از قطعات ایفا می‌کنند. خیلی از قطعات نوآورانه نیازمند کارایی بالاتر با کاهش اندازه قابل توجه هستند. خیلی از محدودیت کارهای مربوط به قطعات میکرو ماشینکاری، مخصوصا در بررسی و آزمایش، بدست آمده است. از آنجایی که قطعات میکرو می‌تواند شکننده و در مشاهده و کنترل دستی مشکل‌ساز باشند، ابزار دقیق و بسته بندی مخصوص مورد نیاز است. در برخی موارد، میکرو قطعات خصوصیات بررسی و کنترل درون ساختارشان گنجانده شده است که ممکن است نیازمند به حذف در بعد از فرآیند باشد. در حالی که خیلی از محققین روی میکرو مونتاژ شده ها کار کرده‌اند، بیشتر کار مربوط به قطعاتی با هندسه مسطح بر اساس تکنیک‌های فرآیند نیمه هادی صورت می گیرد. مونتاژ

قطعات 3D هنوز به اندازه کافی مورد بررسی قرار نگرفته است. علاوه بر این، تست میکرو قطعات و سیستم ها نیاز به یک درک مختصر و مفید در رفتار در مقیاس میکرو می باشد.

اجزای مینیاتوری مصرف انرژی کمتر و انتقال حرارت بیشتری را از نرخ سطح به حجم بسیار بالایی می‌توانند ارائه بدهند. برای تولید این اجزاء، ساخت در مقیاس میکرو از فرآیند برداشت مواد مکانیکی به روش مینیاتورسازی استفاده شده است که دارای یک مزیت منحصر به فرد در ساخت اجزای 3D (سه بعدی) با استفاده از انواع مواد مهندسی است. انگیزه برای میکرو ماشینکاری مکانیکی از انتقال دانش دامنه ماشینکاری ماکرو به دامنه ماشینکاری میکرو بدست آمده است؛ اما چالش ها و محدودیت‌هایی در میکرو ماشینکاری وجود دارد و از مقیاس گذاری ساده به منظور مدلسازی پدیده فرآیند میکرو ماشینکاری نمی‌توان استفاده کرد[۵].

روش های پرکاربرد میکرو ماشینکاری و تکنولوژی‌های ساخت قطعات در ابعاد میکرو شامل پروسه های مختلف می‌باشد که می‌توان در چهار گروه دسته بندی کرد:

۱- روش‌های ماشینکاری مکانیکی مانند میکرو فرزکاری، میکرو تراشکاری، میکرو سوراخکاری

۲- میکرو ماشینکاری مدرن مانند میکرو ماشینکاری تخلیه الکتریکی، سنگ زنی با تخلیه الکتریکی و سیم، میکرو ماشینکاری لیزر، میکرو ماشینکاری مافوق صوت، میکرو ماشینکاری اشعه یونی

۳- تکنیک های رسوب دهی ماده مانند رسوب دهی بخار شیمیایی به کمک لیزر، استریو لیتوگرافی ماورا بنفش، اچ کردن، میکرو ماشینکاری شیمیایی

۴- LIGA[1] (که از یک کلمه آلمانی گرفته شده) و دیگر متدهای وابسته به فوتولیتوگرافی

پروسه های اول و دوم با بهره گیری از ابزارهای کنترل شده ثابت که توانسته پروفیل های خاص از شکل های سه بعدی سطح و مسیر ابزار به خوبی تعریف شده بدست آورد. این روش حذف مواد توسط مقدار کمتر از دهم نانومتر که برای خیلی کاربردهای میکروماشین کاری قابل قبول است. برای دقت

[1] **Li**thographie **Ga**blvanoformung