

مراجع:

1. ASM handbook vol.16 machining
2. Advanced machining process of metallic materials theory ,modeling and application ,
Wit Grzesik ,Elsevier (از صفحه ۴۷ به بعد)
3. Machining technology –Machine tool & Operations
Helmi A. Youssef, Hassan El-Hofy, CRC Press (فصل ۱۱)

۴	مقدمه.....
۷	۱. ماشین کاری با جت ساینده (Abrasive jet machining- AJM).....
۷	کاربرد.....
۸	مزایا و محدودیتها.....
۱۰	۲. ماشین کاری با جت آب (water jet machining – WJM) ، ماشینکاری با جت ساینده آب (abrasive water jet machining - AWJM).....
۱۱	۳. ماشینکاری التراسونیک (UltraSonic Machining – USM).....
۱۲	مزایا و محدودیتها.....
۱۳	کاربرد.....
۱۴	تجهیزات.....
۱۵	۴. ماشین کاری شیمیایی (Chemical Machining – CM or CHM).....
۱۵	فرز کاری شیمیایی.....
۱۸	تجهیزات فرز کاری شیمیایی.....
۲۰	مزایا و محدودیتها.....
۲۰	ماشین کاری فتوشیمیایی.....
۲۱	تجهیزات ماشینکاری فوتوشیمیایی.....
۲۳	مزایا.....
۲۴	۵. ماشین کاری الکترو شیمیایی (ECM).....
۲۵	مزایا و محدودیتها.....
۲۶	کاربرد ها.....
۲۶	تجهیزات ECM.....
۳۱	۶. سنگ زنی الکتروشیمیایی (ECG).....
۳۲	مزایا و محدودیتها.....
۳۲	کاربردها.....
۳۴	۷. ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM).....
۳۵	مزایا و محدودیتها.....
۳۶	کاربرد ها.....
۳۶	تجهیزات.....
۴۱	۸. برش سیمی با تخلیه الکتریکی (Electrodischarge Wire Cutting) - وایر کات.....
۴۳	۹. ماشین کاری پرتو الکترونی EBM.....
۴۳	مزایا و محدودیتها.....
۴۴	کاربرد.....
۴۴	تجهیزات.....
۴۷	۱۰. ماشین کاری لیزر (Laser Beam Machining – LBM).....
۴۸	مزایا و محدودیتها.....
۴۸	انواع لیزر.....

مقدمه

روش های برداشت براده از قطعه

انواع روش های برداشت ماده از قطعه از قرار زیر است:

- | | |
|---|---------------|
| شکل دایروی: تراشکاری، بورینگ، سوراخکاری | } ۱- برش |
| سایر شکل ها: فرز، صفحه تراش، بروچ، اره، سوهان، دنده زنی و ... | |
| ابزار پیوسته: سنگ زنی، هونینگ | } ۲- سایش |
| ابزار بدون اتصال: پولیش، ماشینکاری اولتراسونیک و جت ساینده | |
| ماشینکاری شیمیایی | } ۳- غیر سنتی |
| ماشینکاری الکتروشیمیایی | |
| سنگ زنی الکتروشیمیایی | |
| ماشینکاری تخلیه الکتریکی | |
| ماشینکاری با لیزر | |
| ماشینکاری با اشعه الکترونی | |
| ماشینکاری هیدرو دینامیک و | |

روشهای تولید غیر صنعتی و تولید مخصوص از نیازهای پیچیده جهان صنعتی و با خلاقیت و اختراع های مربوطه به وجود آمده و رشد کرده اند. یکی از صنایع پیشرو در استفاده از روشهای جدید و خلاقانه هواپیما سازی است. از حدود ۶۰ سال پیش دمای کار موتور هواپیما ۱۱۰۰٪ و مقاومت بدنه آن در برابر هوا به علت افزایش سرعت پرنده های فلزی ۲۵۰۰٪ افزایش یافته است. برای به دست آوردن مقاومت کافی در این شرایط دشوار لازم است از مواد جدیدی نظیر کامپوزیتهای فلزی و کربنی، سرامیک ها و آلومینادها و همینطور پلیمرهای پیشرفته استفاده شود که هیچ کدام از این مواد قابلیت ماشینکاری ساده با روشهای سنتی ندارند. علت این امر موارد مختلفی نظیر سختی بالا، ترد بودن، خواص دمایی نامناسب، فعال بودن شیمیایی و ساختار غیر یکنواخت داخلی می باشد. در بسیاری از موارد تنها راه ماشینکاری این مواد استفاده از روش های غیر سنتی می باشد.

تعریف روش های غیر سنتی آسان نیست چرا که تنوع آنها بسیار زیاد است. اما عموماً روش های تولیدی که در ۵۰ سال اخیر با به کار بستن فرمهای متداول انرژی به شکل جدید یا با به کار بستن فرمهای جدید انرژی که قبلاً اسفاده نمی شده ماده را شکل می دهند، روشهای تولید غیر سنتی (یا تولید مخصوص) انگاشته می شوند.

از نقطه نظر منابع انرژی مورد استفاده انواع روشهای تولید عبارتند از: ۱- مکانیکی، ۲- الکتریکی، ۳- حرارتی، ۴- شیمیایی.

روش مکانیکی. در این روش معمولاً مستقیماً نیروی ساینده مکانیکی به قطعه اعمال می شود و بیشتر در مورد قطعاتی که سختی و تردی بالا و چگرمگی کم دارند استفاده می شود. معمولاً سرامیک ها و کامپوزیتهای این روش تولید می شوند چرا که برای استفاده از روش الکتریکی رسانایی ندارند و در مقابل حرارت نیز زود خراب می شوند.

روش الکتریکی. برای قطعات رسانای الکتریکی قابل استفاده است. قطعاتی که قابلیت ماشینکاری کمی داشته باشند. ضمناً برخی مواقع با وجود داشتن قابلیت ماشینکاری مناسب از روش الکتریکی به دلیل قابلیت ایجاد شکل های پیچیده در یک پاس و سایش کم ابزار استفاده می شود.

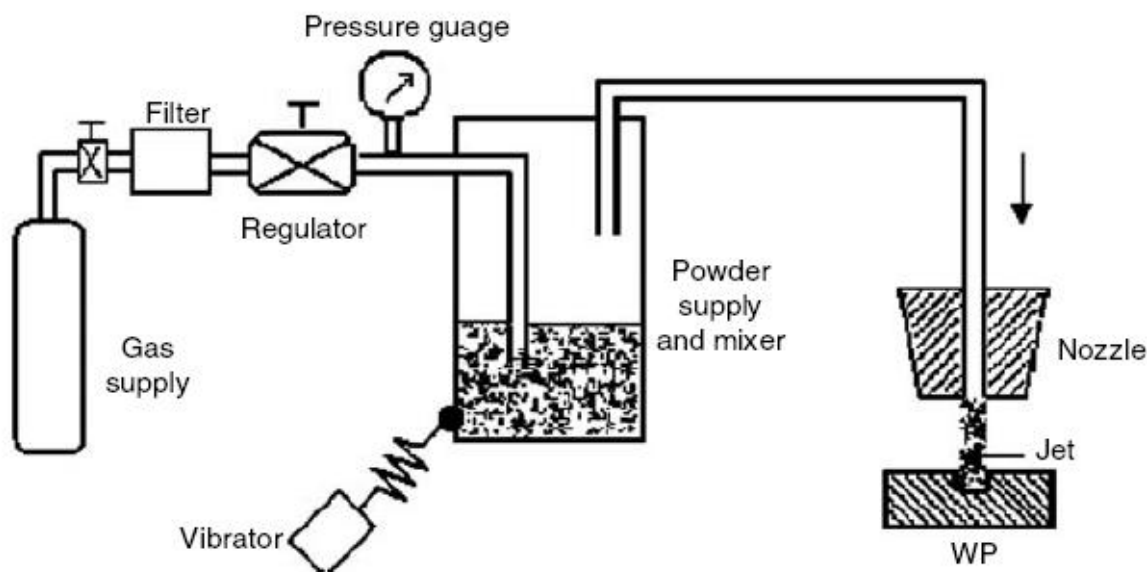
روش حرارتی. روش های تولید مخصوص با انرژی حرارتی از پر کاربرد ترین روش های تولید است. برای کاربردهای خاص و حساس باید دقت شود که منطقه متأثر از حرارت (HAZ) در قطعه ایجاد مشکل نکند.

روش شیمیایی. برای تولید انبوه مقرون به صرفه است. هر چند که گاهی برای تیراژ پایین و حتی تولید تکی هم استفاده می شود. در این روش هیچ نیرویی به قطعه کار وارد نمی شود.

تقریباً می توان گفت که روش های تولید مخصوص در قیاس با روش های سنتی محدودیت چندانی ندارد. به جز یک استثنا که آن هم نرخ پایینتر خروج ماده از قطعه می باشد.

۱. ماشین کاری با جت ساینده (Abrasive jet machining- AJM)

در این روش با استفاده از جریان سریع گازی که حاوی ذرات ساینده می باشد بخشهایی از قطعه برداشته می شود. تفاوت آن با روش سنتی سند بلاست (sand blast) در این است که قطر ذرات در این روش بسیار ریز تر است (بین ۱۰ تا ۱۵ میکرون).



شکل ۱-۱. تجهیزات ماشینکاری با جت ساینده

کاربرد

از روش جت ساینده معمولاً برای برش، تمیز کاری، زنگ زدایی، پلیسه گیری و حکاکی روی شیشه، سرامیک و مواد سخت استفاده می شود. برخی از موارد کاربرد این روش از قرار زیر است:

۱. سوراخ کاری و برش کاری قطعات کوچک شیشه سرامیک یا فلزات سخت
۲. حکاکی شماره قطعه روی قطعات فلزی و پلاستیکی
۳. پلیسه گیری قطعات فلزی و پلاستیکی
۴. مات کردن شیشه
۵. برش اشکال پیچیده بر روی مواد سخت و شکننده
۶. زنگ زدایی از روی سطوح فلزی

۷. پاک کردن لکه های فلزی از روی قطعات سرامیکی

۸. برش، پخ زنی و تمیز کردن قطعات الکترونیکی

۹. پاک کردن دوده و آلودگی از روی اسناد مهم و اشیاء تاریخی در موزه ها

در شکل ۱-۱ تجهیزات ماشینکاری با جت ساینده نشان داده شده است. حداقل فشار گاز در مخزن باید حدود ۷ بار باشد تا فشار ثابت ۵ بار در رگولاتور داشته باشیم. هوای فشرده یا نیتروژن، دی اکسید کربن یا هر گازی که از نظر صنعتی خنثی باشد، در این سیستم قابل استفاده است. گاز باید عاری از ذرات و روغن باشد بنابراین رطوبت زدا و فیلتر در سیستم مورد استفاده قرار می گیرد.

سرعت خروج ذرات از نازل تقریباً بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ متر بر ثانیه است. برای جلوگیری از آسیب های جانبی غبار مربوطه باید جمع آوری شود. نازل معمولاً از تنگستن کارباید ساخته می شود گرچه نازل های یاقوتی نیز استفاده می شود. دوام نازل های یاقوتی بیشتر است اما صرفاً با سوراخ گرد ارائه می شوند. ضمناً قیمت بالایی نیز دارند. استفاده از نازلهایی با سوراخ مستطیلی در برشهای دقیق میتواند مفید باشد. عمر نازل تنگستن کربایدی بسته به نوع ماده ساینده بین ۸ تا ۳۵ ساعت می باشد، عمر نازل یاقوتی به طور متوسط ۳۰۰ ساعت است.

باید در نظر گرفت که ماشینکاری با جت ساینده در مرتبه اول یک فرآیند پرداخت کاری و تمیزکاری است که نرخ باربرداری پایینی دارد. به عنوان مثال نرخ باربرداری بر روی شیشه می تواند حدود ۱۵ میلی متر مکعب بر دقیقه باشد. بر روی فلزات این سرعت بین ۱.۵ تا ۴ میلی متر مکعب بر دقیقه است.

مزایا و محدودیتها

برخی مزایای این روش عبارتند از:

۱. به علت جریان گازی سریع حرارت ایجاد شده به سرعت از قطعه خارج می شود (مناسب برای قطعات حساس به حرارت)

۲. به علت نیروهای کم اعمال شده به قطعه برای ماشینکاری قطعات شکننده مناسب است.

۳. برای مواد سخت قابل استفاده است.

۴. امکان دسترسی نازل به جاهایی از قطعه که دسترسی آسانی ندارند، وجود دارد.

انواع مواد استفاده شده به عنوان پودر ساینده عبارتند از: اکسید آلومینیوم، کاربید سیلیکون و ذرات شیشه. روش مشابه دیگری به نام ماشینکاری با جریان ساینده سیال (Abrasive Flow Machining – AFM) وجود دارد. در این روش مایعی با ویسکوزیته بالا به همراه مواد ساینده از طریق سیلندرهای خاص و با

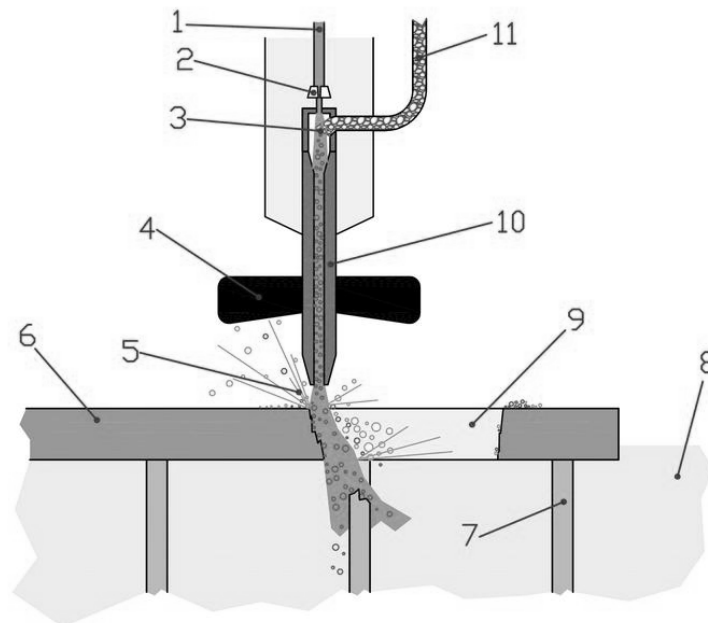
ماشینکاری با جت ساینده

استفاده از فیکسچرها و مجاری هدایت کننده به سمت مجاری و سطوح قطعه کار جریان پیدا کرده و براده برداری می کنند.

۲. ماشین کاری با جت آب (water jet machining - WJM) ، ماشینکاری با جت

ساینده آب (abrasive water jet machining - AWJM)

نام دیگر این روش ماشین کاری هیدرو دینامیک است (Hydrodynamic machining). در این روش از جت آب با سرعت بالا برای برش ماده استفاده می شود. ممکن است مواد ساینده به همراه آب استفاده شود که در این صورت برای برش مواد ضخیم تر و سخت تر نیز قابل استفاده خواهد بود. مکانیزم واترجت متشکل از یک پمپ دبی متغیر فشار بالا با جبران فشار و پاره ای مخازن ذخیره، شدت دهنده و چند شیر یک طرفه و کنترل جهت است که فشار آب را بالا برده و به سمت نازل می راند. آب با سرعت بسیار زیاد از نازل خارج شده و به قطعه برخورد می کند که عمل برش را انجام می دهد.

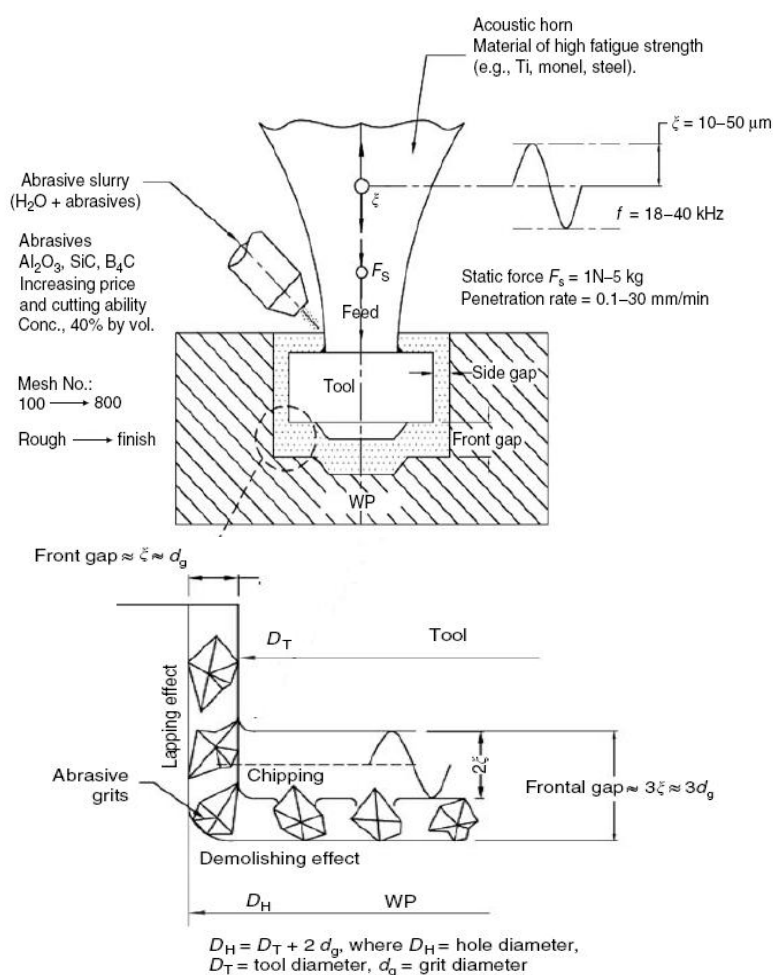


شکل ۱-۲. تجهیزات ماشینکاری با جت آب

پارامترهای قابل تنظیم در این روش ماشینکاری عبارتند از فشار، جریان و قطر نازل، فاصله نازل تا قطعه، سرعت جابه جایی و نوع ماده ساینده. شکل ۱-۲ این فرآیند را به طور شماتیک به تصویر کشیده است.

۳. ماشینکاری التراسونیک (UltraSonic Machining – USM)

با استفاده از این روش امکان ایجاد سوراخ و حفره در مواد ترد، فارغ از اینکه رسانا یا غیر رسانا باشند میسر است. ابزاری که در راستای محوری با فرکانس ۱۸ تا ۴۰ کیلوهرتز نوسان دارد (آستانه شنوایی انسان ۱۶ کیلوهرتز است) برای این کار استفاده می‌شود. ذرات ساینده کاربید سیلیسیم و کاربید بر (SiC , B_4C) به طور مداوم در حد فاصل بین ابزار نوسان کننده و قطعه کار تغذیه می‌شود. شکل مکمل ابزار توسط ذرات ساینده بر روی قطعه ایجاد می‌شود. به علاوه یک فشار ثابت همواره از ناحیه ابزار به منطقه وارد می‌شود. بسته به اندازه نوک ابزار این فشار ممکن است بین ۱ تا چند ده نیوتن باشد. فشار استاتیک برای حفظ پیشروی ابزار لازم است.



شکل ۳-۱. ابزار ماشینکاری التراسونیک در حین ماشینکاری

شکل ۱-۳ وضعیت ابزارنسبت به قطعه در حین این ماشینکاری را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل آمده دامنه نوسان $\xi = 10 \sim 50 \mu m$ ، فرکانس نوسان $f = 18 \sim 40 \text{ KHz}$ و نیروی استاتیک $F_s = 1 \sim 50$ نیوتن می‌باشد. سرعت نفوذ ابزار در این روش بین ۰.۱ تا ۳۰ میلیمتر بر دقیقه می‌باشد.

مهم است که جنس ابزار قابلیت ماشینکاری خوبی داشته باشد تا به راحتی به شکل دلخواه در آید، ضمناً در مقابل بار گذاری خستگی باید استحکام کافی داشته باشد.

نرخ باربرداری در این روش با افزایش تعداد ضربه‌ها در واحد زمان (فرکانس نوسان) افزایش می‌یابد. ضمناً دقت فرآیند نتیجه کوچک بودن دامنه نوسان است. سر ابزار که معمولاً از جنس خیلی سخت ساخته نمی‌شود، در معرض سایش قرار دارد. این سایش ممکن است منجر به کاهش دقت شود. با توجه به اینکه در ماشینکاری التراسونیک ابزار همزمان نوسان محوری و حرکت رو به پایین محوری دارد، کاربرد آن محدود به ایجاد سوراخ‌ها و حفره‌های گرد و متقارن نمی‌باشد.

مزایا و محدودیتها

از جمله مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. اشکال پیچیده روی جنس های سخت رسانا یا غیررسانا می‌توان براده برداری کرد.
۲. دقت ابعادی و کیفیت سطح بالا
۳. به علت اینکه ابزار دوران ندارد محدود به سوراخ‌های گرد نیست.
۴. در حیطه ماشینکاری قطعات غیر رسانا هیچ رقیبی از نظر دقت، کیفیت سطح و نرخ باربرداری در میان روشهای تولید غیر سنتی ندارد.
۵. چون دمای قطعه کار بالا نمی‌رود به همین دلیل تغییری در خواص فیزیکی و ریزساختار ایجاد نمی‌شود

در مقابل این روش محدودیتهایی نیز دارد که برخی از آنها از قرار زیرند:

۱. در ماشین کاری اجسام رسانا در مقایسه با ECM و EDM نرخ براده برداری کمتری دارد.
۲. امکان ماشین کاری حفره‌هایی با پهنای بیش از ۲۵ تا ۳۰ میلی متر را ندارد.
۳. در ماشین کاری مواد رسانا مثل فولادها و کاربایدها سایش بخش جانبی و جلویی ابزار بالا است. سایش جانبی موجب کاهش دقت حفر ها و سوراخ ها می‌شود.
۴. هر کاری نیاز به ابزار مخصوص خود را دارد ، که باعث افزایش هزینه فرآیند می‌شود.

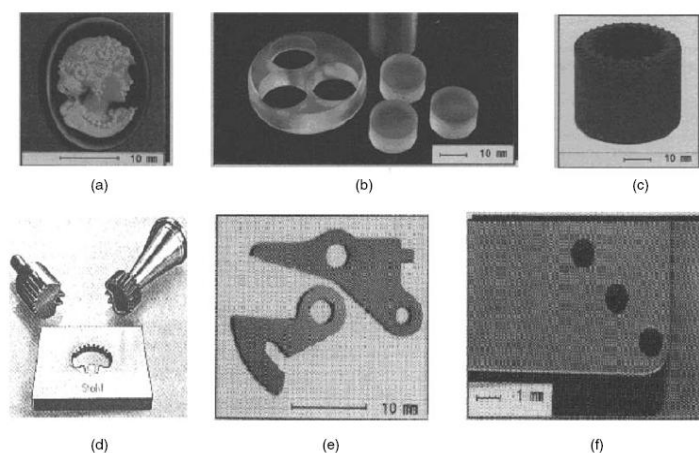
۵. در ماشین کاری سوراخ راه به در باید زیر قطعه یک پد گذاشته شود تا منجر به شکست نشود. در غیر این صورت باید دامنه نوسان و نیروی کم شود.
۶. در سوراخ ته بسته امکان ایجاد گوشه های تیز انتهای سوراخ وجود ندارد.
۷. گل ساینده باید متناوب تعویض شود تا ذرات ساییده شده از محیط خارج شود (این امر باعث افزایش هزینه فرآیند می شود).

کاربرد

باید در نظر گرفت که ماشینکاری التراسونیک بیشتر برای ایجاد سوراخ ها و حفره هایی با عمق کم در مواد سخت، به شرطی که سطح مقطع ماشینکاری از ۱۰ سانتی متر مربع تجاوز نکند به کار می رود، برخی از کاربردهای ماشینکاری التراسونیک از قرار زیر است:

۱. تولید قالب های شکل دهی از جنس فولاد سخت شده و کاربید زینتر شده.
۲. تولید قالب (دوزه) های کشش سیم، نازل های جت ماشین کاری از جنس یاقوت و کاربید.
۳. برش مواد سخت و ترد مثل شیشه، سرامیک، کاربید.
۴. حکاکی و نقش زنی روی قطعات سخت
۵. انواع سوراخکاری
۶. رزوه زنی دز سرامیک ها با چرخش ابزار یا قطعه

شکل ۲-۳ برخی قطعات تولید شده به وسیله ماشینکاری التراسونیک را نشان می دهد.

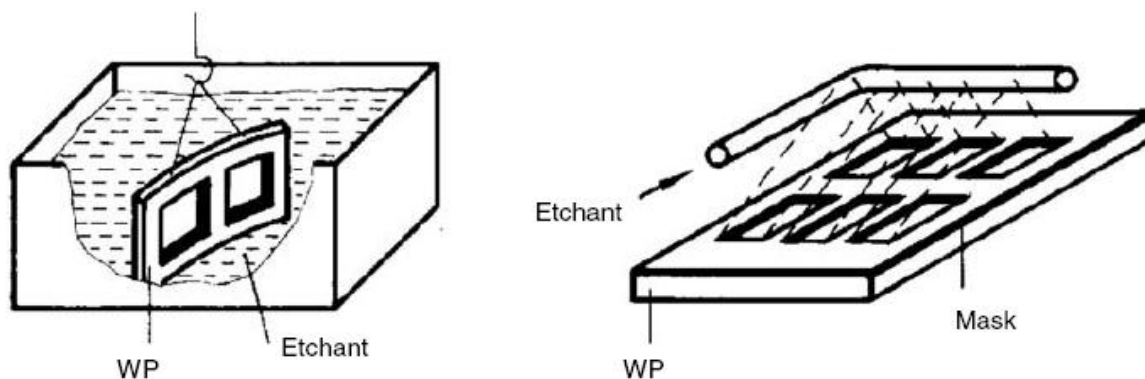


شکل ۲-۳. برخی قطعات تولید شده به وسیله ماشینکاری التراسونیک

ادامه مباحث ماشینکاری التراسونیک

۴. ماشین کاری شیمیایی (Chemical Machining – CM or CHM)

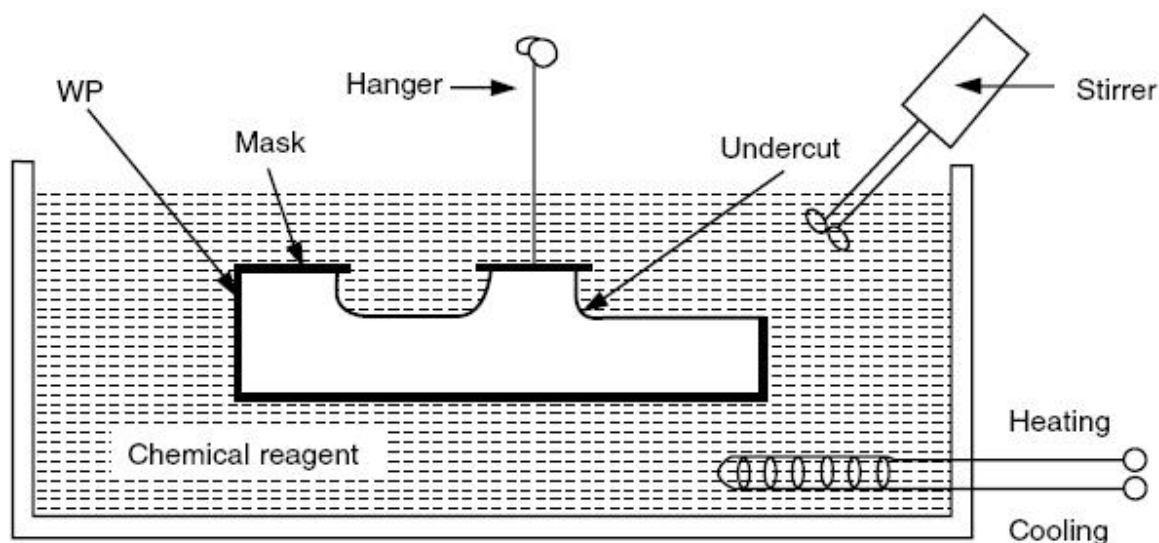
شاید این نوع ماشین کاری قدیمی ترین نوع ماشین کاری غیر سنتی باشد. نام دیگر آن حکاکی شیمیایی یا chemical Etching می باشد. این روش مبتنی بر انحلال شیمیایی کنترل شده ماده قطعه کار در محلول حکاکی است. امروزه این روش بیشتر در تولید حفره های کم عمق در قطعات مختلف مستقل از سختی آنها به کار می رود. ماشین کاری شیمیایی مشتمل بر دو دسته اصلی فرز کاری شیمیایی (CH-Milling or Chemical milling) و ماشین کاری فتو شیمیایی (Photo chemical machining - PCM) می باشد، نام دیگر روش اخیر حکاکی افشانه (Spray Etching) می باشد. شکل ۴-۱ نمای ماتیکی از این دو روش است.



شکل ۴-۱. دو روش متداول ماشینکاری شیمیایی، راست ماشینکاری فوتوشیمیایی، چپ فرزکاری شیمیایی

فرز کاری شیمیایی

این روش در صنایع هواپیما سازی و هوا فضا از اهمیت ویژه ای برخوردار است. از این روش برای کاهش ضخامت موضعی ورق های بدنه هواپیما یا موشک با هدف افزایش نسبت استحکام به وزن (stiffness to weight ratio) استفاده می شود. همینطور در صنایع فلزی برای ایجاد وب و ریب (web, rib) در قطعات فرج، فرم و ریخته گری استفاده می شود. شکل ۴-۲ به صورت شماتیک این فرآیند را نشان می دهد.



شکل ۴-۲. فرزکاری شیمیایی

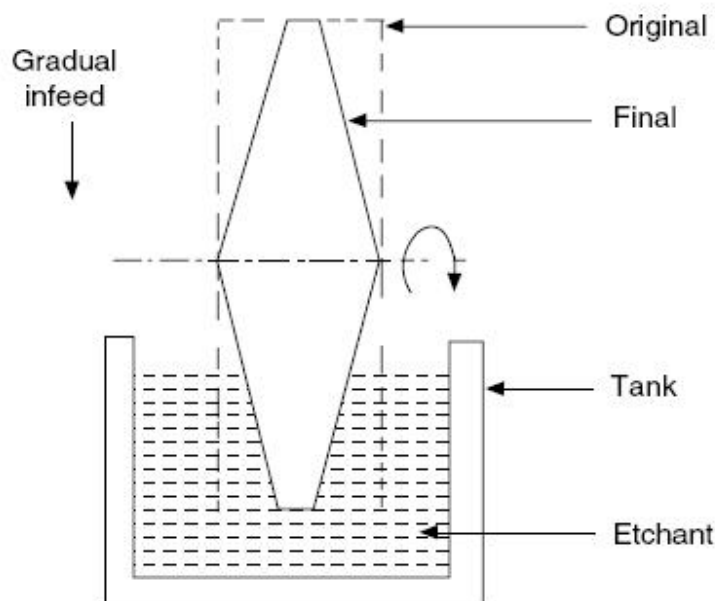
همچنین در بسیاری از از مواقع برای بهبود وضعیت سطوح استفاده می شود (شکل ۴-۳) نظیر:

- برداشتن اکسید تیتانیوم از قطعات فرج شده تیتانیوم و قطعات شکل دهی شده با روش های سوپر پلاستیک
- حذف سطوح دی کربوریزه شده از قطعات فرج شده در فولاد های کم کربن.
- برداشتن Recast layer (لایه رسوب از روی قطعات تولید شده به وسیله EBM
- برداشتن پلیسه (Burr) از قطعات با شکل به هم پیچیده، ماشین کاری شده با روش های سنتی



شکل ۴-۳. پرداخت سطوح به وسیله ماشینکاری شیمیایی

در فرز کاری شیمیایی یک پوشش محافظ (ماسک) قسمت هایی از ماده را که قرار نیست، در محلول خورده شود می پوشاند. این روش برای ایجاد حفره (Pocket) و کنترل استفاده می شود همینطور برخی کاربردهای خاص از این روش بر گرفته شده است (شکل ۴-۴) و شامل مراحل زیر است:

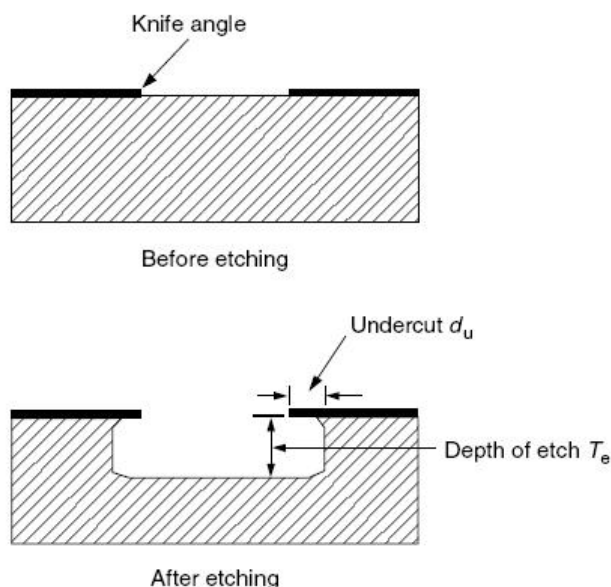


شکل ۴-۴ تولید قطعات دیسکی با مقطع خاص با روشی برگرفته از فرزکاری شیمیایی

۱. آماده سازی سطح قطعه با تمیز کردن با روش های مکانیکی و شیمیایی تا چسبندگی مناسب بین ماسک و قطعه وجود داشته باشد.
۲. پوشاندن سطح با لایه قابل چسباندن که به سطح می چسبد و در مقابل خوردگی شیمیایی مقاوم است.
۳. خراش ماسک با استفاده از شابلون مخصوص تا مناطقی که باید حکاکی شود در معرض محلول قرار گیرد. جنس ماسک بستگی به ابعاد قطعه، مقدار قطعات و رزولوشن جزئیات دارد.
۴. پس از حکاکی، قطعه شسته شده و ماسک با روشهایی دستی، مکانیکی یا شیمیایی پرداخته می شود.
۵. قطعه توسط آب دیو نیزه شسته می شود.

در فرزکاری شیمیایی عمق حکاکی با زمان قرار گیری در محلول کنترل می شود. باید در نظر گرفت که محلول های شیمیایی بسیار خورنده هستند و باید احتیاط لازم در حین کار کردن و حمل نقل آنها صورت پذیرد. بخارات و گازهای متصاعد شده در اثر واکنش شیمیایی باید در راستای پیشگیری های محیطی کنترل شود. معمولاً محلول در حین فرآیند با استفاده از ابزار مخصوص هم زده می شود. دمای متداول برای فرآیند بین ۳۷ تا ۸۵ درجه سانتی گراد بوده و باید با تolerانس $\pm 5^\circ$ کنترل شود تا خوردگی به صورت یکنواخت انجام شود. در دماها و غلظت محلول بالا نرخ براده برداری نیز بالاتر است.

هنگامی که از ماسک برای ماشینکاری استفاده می شود، باید توجه شود که برداشت ماده هم به سمت داخل قطعه و هم به سمت جانبی (زیر ماسک) اتفاقی می افتد. یک فاکتور مهم در این زمینه EF (Etching factor) یا فاکتور حکاکی که نسبت برداشت جانبی (undercut - d_u) به عمق حکاکی (T_e) است (شکل ۴-۵).



شکل ۴-۵. برش جانبی و فاکتور حکاکی

$$EF = \frac{d_u}{T_e}$$

در عمق حدود ۱.۵ میلی متر این نسبت ۱:۱ است. در عمق های بیشتر ممکن است تا ۱:۳ کاهش پیدا کند.

تجهیزات فرزکاری شیمیایی

ماسک: معمولاً مواد سنتزی و یا مواد پایه لاستیکی برای این منظور استفاده می شود. این مواد باید خصوصیات زیر را داشته باشد:

- استحکام کافی برای جابه جایی و کار کردن دوششان داشته باشند.
- نسبت به مواد شیمیایی غیر فعال باشند.
- مقاوت کافی در برابر گرمای ایجاد شده در اثر واکنش شیمیایی را داشته باشند.
- به خوبی به سطح قطعه بچسبند.
- به راحتی خراشیده شوند.
- پس از فرایند به راحتی از ماده جدا شوند.

در بسیاری از مواقع چند لایه ماسک استفاده می شود تا مقاومت در برابر نفوذ ماده خورنده افزایش یافته و از خلل و فرج ناخواسته روی قطعه جلوگیری شود.

گاهی به جای چسباندن یک لایه و جدا کردن بخشهای لازم از اسپری کردن ماسک بر روی قطعه از روی یک توری طرح دار ابریشمی استفاده می شود، در این روش امکان ایجاد طرحهای ظریفتری وجود دارد. اما باید توجه داشت که این پوششها به خاطر نازک و ظریف بودن امکان تحمل زمان های طولانی و ایجاد حفره هایی عمیق را ندارد. از جمله جنس هایی مورد استفاده عبارتند از PVC ، PET ، لاستیک بوتیل ، لاستیک آکریلونیتریل و...

تِلرانس ماسکهای مختلف ، با روش هایی تولید مختلف از حدود ± 15 تا ± 180 میکرون می باشد. البته باید دقت کرد تِلرانس تولید قطعه به عمق حکاکی و جنس قطعه نیز ارتباط دارد، به عنوان مثال قطعات مسی تِلرانس های بسته تر و قطعات آلومینیومی تِلرانسهای بازتری می دهند.

محلول های خورنده (Echant): این خورنده ها، محلولهای غلیظ اسیدی یا آلكالاین هستند که ترکیب شیمیایی و دمای آنها در یک محدوده مشخص حفظ می شود. قابلیت واکنش با مواد قطعات را دارند که منجر به به تشکیل نمک های فلزی می شود که در حلال حل می شوند.

برای قطعات شیشه ای یا ژرمانیوم از حلال $\text{HF} + \text{HNO}_3$ یا HF استفاده می شود که برای تنگستن نیز استفاده می شود. برای قطعات آلومینیوم از FeCl_3 و ترکیب اسید نیتریک و اسید کلریدریک استفاده می شود. از کلرید آهن با غظت بالاتر می توان برای قطعات فولادی و مس و فولاد ضد زنگ و قلع و نیکل نیز استفاده کرد. از اسید نیتریک و کلرید مس CuCl_2 نیز استفاده می شود. یک حلال خوب باید خواص زیر را داشته باشد:

- پرداخت سطح خوب قطعه
- یکنواختی بار برداری
- کنترل حمله انتخابی و بین دانه ای (Selective & Intergranular Attack (IGA)
- هزینه کم و در دسترس بودن
- امکان بازیابی یا خنثی کردن و دفع ضایعات
- غیر سمی بودن

ابزار خراش ماسک: متداولترین وسیله برای برش ماسک چاقویی مخصوص این کار است. برای قطعات بزرگ ممکن است از لیزر نیز استفاده شود.

مزایا و محدودیت ها

برخی از مزایای فرزکاری شیمیایی عبارتند از:

۱. امکان کاهش وزن قطعات فاکتور پیچیده که، روش هایی سنتی به سختی ماشین کاری می شوند.
۲. چند قطعه به طور همزمان قابل ماشین کاری است.
۳. بهره وری با برداشت بار همزمان از تمام سطوح افزایش می یابد.
۴. عدم تشکیل پلیسه
۵. عدم ایجاد تنش در قطعه و در نتیجه کاهش تاب برداشتن و امکان ماشین کاری قطعات پیچیده .
۶. سرمایه اولیه نسبتاً کم و هزینه ابزار مصرفی کم
۷. قابلیت اعمال سریع تغییرات و طراحی در اجزا
۸. عدم نیاز به اپراتور و مهارت بالا
۹. خرابی کم قطعات

در مقابل محدودیت هایی نیز بدر این روش وجود دارد که پاره ای از آنها عبارتند از:

۱. عملاً فقط برشهایی با عمق کم ممکن است.
۲. جابه جایی و دور ریختن حلال ممکن است دردسر ساز شود.
۳. پوشش دهی، خراش و برداشتن رویه کار زمان گیر، تکراری و خسته کننده ای است.
۴. در صورت تشکیل، عیوب سطحی تکرار می شود.
۵. برای حصول بهترین نتیجه سطوحی که از نظر متالورژی همگن باشد مورد نیاز است.
۶. قطعات ریخته گری حاوی خلل و فرج پس از فرآیند سطوح ناهم سطح ایجاد می کنند.
۷. قسمت های جوشکاری شده با نرخ متناوب از فلز پایه خورده می شود.

با حلال تازه بسته به شرایط کاری (غلظت و دما) نرخ حکاکی بین ۲۰ تا ۴۰ میکرون بر دقیقه متفاوت است. معمولاً برای مواد سخت نرخ بار برداری بیشتر از مواد نرم است.

ماشین کاری فتوشیمیایی

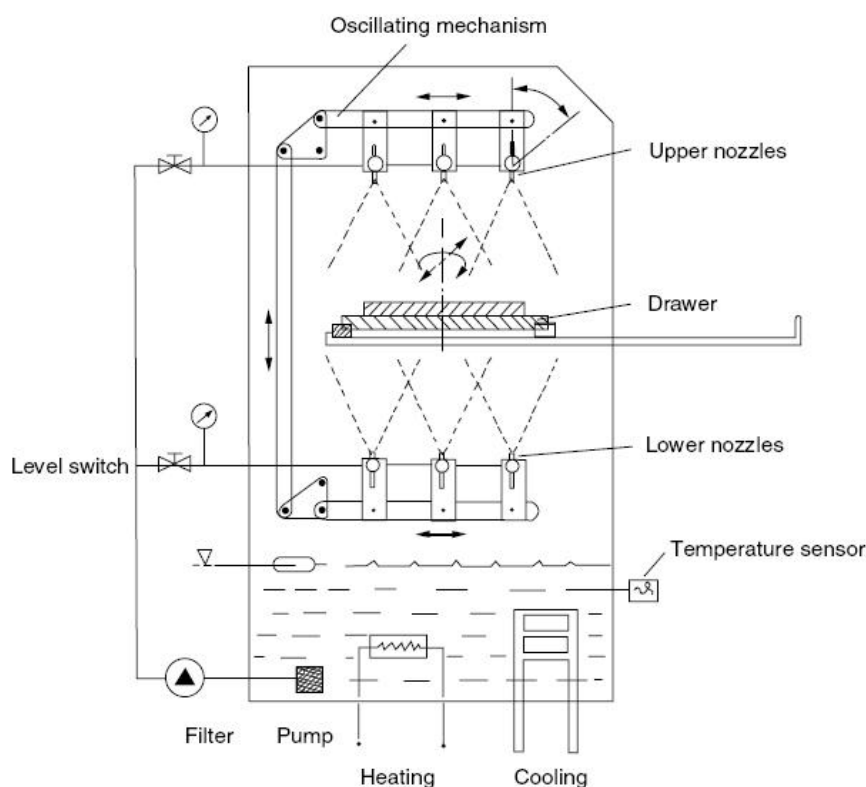
این روش حالتی منشعب از فرزکاری شیمیایی است با این تفاوت که ماسک محافظ با تکنیک فوتوگرافیک بر قطعه اعمال می شود. هر دو روش در این زمینه که ماده تحت خوردگی شیمیایی قرار می گیرد مشابه هستند.

ماشینکاری شیمیایی

روش فرزکاری شیمیایی معمولاً برای قطعات سه بعدی که از روشهایی نظیر فورج و ریخته گری و... تولید شده استفاده می شود. در مقابل روش PCM یک روش ایده آل برای ماشین کاری و ایجاد طرحهای دقیق بر روی فویل از ضخامت حدود ۰.۰۱ تا ۱.۵ میلی متر است. بنابر این روش PCM یک جایگزین برای سوراخ کاری ورق به وسیله پرس های مکانیکی است.

یک تفاوت عمده دیگر بین دو روش این است که در فرزکاری شیمیایی عمق حفره توسط زمان باقی ماندن قطعه در حلال کنترل می شود اما در PCM توسط زمان اسپری شدن حلال بر قطعه. با توجه به اینکه حلال اسپری می شود، نرخ بار برداری بالاتر و کیفیت بهتری بدست می آید. گفته شده است که نرخ PCM بین ۵ تا ۱۰ برابر بیش از CH-Milling است. البته در PCM تجهیزات گرانشیمی برای اسپری کردن حلال خورنده در دمای بالا با فشار بالا بکار می رود.

تجهیزات ماشینکاری فوتوشیمیایی

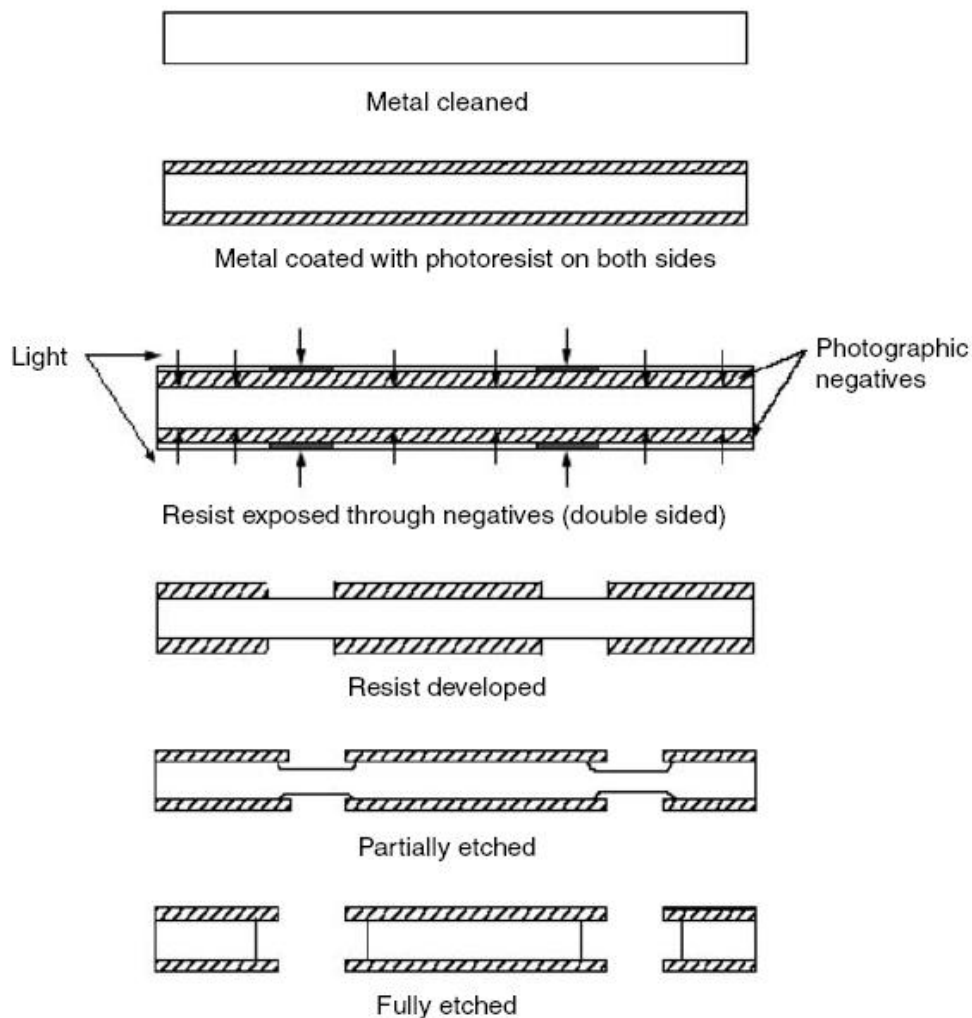


شکل ۴-۶. تجهیزات ماشینکاری فوتوشیمیایی

بخش های مختلف دستگاه PCM از قرار زیر است:

- سیستم نازل بالا و پایین
- سیستم کانوایر چند سرعتی برای قطعه
- یک واحد برای خشک کردن قطعه با آب و خشک کردن آن با هوای داغ
- یک واحد برای اندازه گیری و کنترل چگالی و غلظت حلال
- واحدی برای ارزیابی و بازیابی قطعه

شکل ۴-۶ تجهیزات این فرآیند را نشان می دهد.



شکل ۴-۷. مراحل ماشینکاری فوتوشیمیایی

مراحل انجام PCM از قرار زیر است (شکل ۴-۷):

۱. شکل قطعه مورد نظر که به عنوان Photo tool در نظر گرفته می شود، با CAD تهیه می شود.

۲. دو نگاتیو تصویری به اندازه شکل واقعی تهیه می شود.
۳. ورق فلزی تمیز شده و با لایه ای از فوتورزیست (یک امولسیون حساس به نور) پوشانده می شود، زمان کافی برای خشک شدن تا فوتورزیست به سطح بچسبید و در حین حکاکی از آن محافظت کند.
۴. دو نگاتیو مربوطه بالا و پایین ورق قرار داده می شود و در خلاء تحت نور UV قرار میگیرد. پوششدر قسمت هایی که تحت نور بوده می شود و با اعمال یک محلول دیگر به عنوان ظاهر کننده از قسمت های دیگر حذف می شود.
۵. با استفاده از آب با فشار بالا ورق شکسته با فشار بالا ورق شکسته می شود تا مناطقی که فوتورزیست نرم روی آن مانده کاملاً شسته شود سپس قطعه با آب دیونیزه شسته شده و با استفاده از گاز نیتروژن خشک می شود.
۶. ورق تحت سپر هایی خورنده از بالا و پایین قرار می گیرد. این امر باعث می شود که حکاکی از بالا و پایین انجام شده و under cut کاهش یابد، ضمناً زمان ماشین کاری کاهش یافته و قطعه و دیواره های صاف تری نیز تولی می شود.
۷. پس از این مرحله فوتورزیست سخت شده برداشته می شود و قطعه شسته می شود.

مزایا

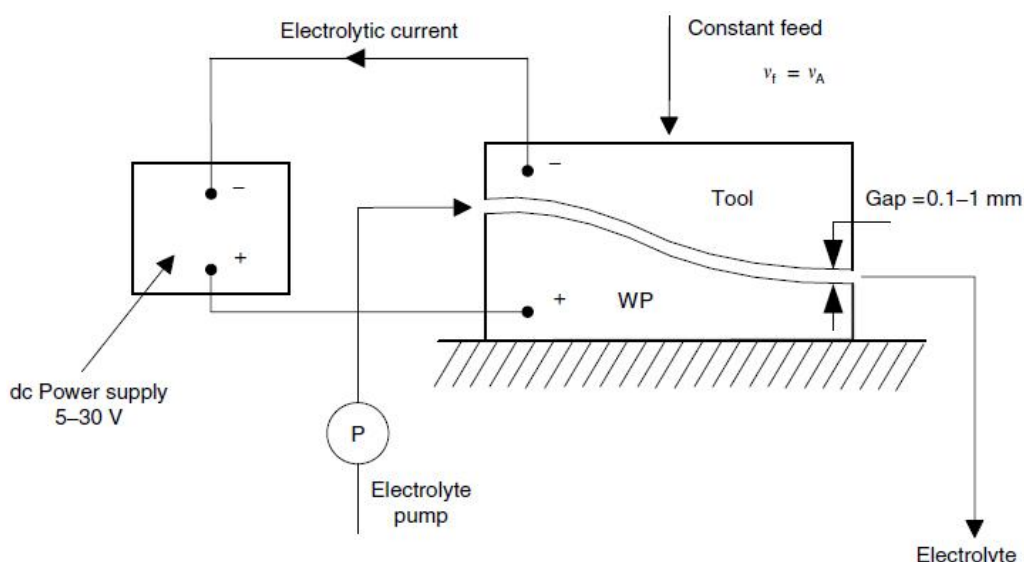
علاوه بر مزایایی ذکر شده در فرزکاری شیمیایی مزایای زیر را می توان برای ماشینکاری فوتوشیمیایی نام برد:

۱. دقت و نرخ بالاتر حکاکی
۲. چون طرح توسط فوتو گرافیک ایجاد می شود به راحتی قابل ذخیره کردن و باز تولید است.
۳. زمان تولید نسبتاً کم
۴. اشکال پیچیده و قطعات شکننده بدون تاب برداشتن و شکستن این روش قابل انجام است.

۵. ماشین کاری الکتروشیمیایی (ECM)

ECM یکی از موثرترین روشهایی ماشینکاری غیرسنتی می باشد. در این فرآیند بار برداری از قطعه براساس انحلال آندی توسط اصل الکترولیز فارادی کنترل می شود. بر این اساس نرخ تجزیه آندی (تخلیه ماده) در سلول ماشین کاری مستقیماً متناسب است با جریان مستقیم الکترولیز و معادل شیمیایی (ϵ) جنس آند ($\epsilon = \frac{\text{وزن اتمی}}{\text{والانس}}$). در سلول ماشین کاری قطعه کار به آند متصل شده و ابزار به کاتد با مقدار ولتاژ ۵ تا ۳۰ ولت متصل می شود. هم ابزار و هم قطعه کار باید رسانای الکتریکی باشند. فاصله میان الکترودها (ابزار و قطعه کار) بین ۰.۱ تا ۱ میلی متر می باشد که یک الکترولیت (مثل NaCl, KCl, یا NaNO_3) به سرعت در این گپ پمپ می شود تا محصول الکترولیز (اصطلاحاً لجن) را از محل خارج کند.

بسته به اندازه گپ جریان الکتریکی با چگالی بالا ($20 \sim 800 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$) عبور داده می شود که منجر به نرخ بالای انحلال آندی می شود. شکل حفره ایجاد شده در قطعه مادگی شکل ابزار می باشد. ابزار به صورت محوری به قطعه کار با نرخ پیشروی V_f بین ۰.۵ تا ۱۰ میلی متر بر دقیقه نزدیک می شود. نرخ انحلال آندی V_A خود را تنظیم میکند تا با نرخ پیشروی برابر باشد ($V_f = V_A$). این خاصیت هماهنگی یا خود تنظیمی ECM فرآیند را کنترل و کارکرد آن را پایدار می نماید. بنابراین در حین فرآیند ضخامت گپ یک مقدار ثابت می ماند که به آن گپ پایدار می گویند. شکل ۵-۱ شمای کلی این فرآیند ماشینکاری غیر سنتی را نشان می دهد.



شکل ۵-۱. فرآیند ماشینکاری الکتروشیمیایی

از جمله مزایای ماشینکاری الکتروشیمیایی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. سطوح سه بعدی با پرفیل های پیچیده به آسانی در یک عملیات یگانه مستقل از سختی و استحکام ماده قابل حصول است.
۲. نرخ ماشین کاری بالا ECM در جریان های بالا (از اکثر روشهای سنتی و غیر سنتی) بالاتر است
۳. خوردگی ابزار وجود ندارد، بنابراین امکان تکرار پذیری تولید وجود دارد.
۴. آسیب حرارتی یا HAZ در منطقه بوجود نمی آید.
۵. کیفیت سطح و دقت بالا همزمان با نرخ بار برداری (MRR) بالا قابل دسترسی است.
۶. نیاز به نیروی بالا و مهارت نیروی کار بالایی وجود ندارد.
۷. سطوح تولید شده با ECM بدون پلیسه و عاری از تنش هستند.

مانند سایر روشها این روش نیز دارای محدودیتهای خاصی است که برخی از آنها در زیر آمده است:

۱. مواد غیر رسانا غیر قابل ماشین کاری نیستند.
۲. عدم امکان ماشینکاری لبه های تیز داخلی یا خارجی با شعاع کمتر از ۰.۲ میلیمتر
۳. ماشین و تجهیزات جانبی آن تحت اثر خوردگی و زنگ زدگی قرار دارند. مخصوصاً وقتی الکترولیت های خورنده نظیر NaCl استفاده می شود. البته می‌توان الکترولیت کمتر خورنده ای مثل NaNO_3 استفاده کرد که قیمت بالاتری دارد.
۴. حد دوام قطعات تولید شده با ECM بین ۱۵~۱۰ درصد افت می کند. در این صورت پس از ECM توصیه می شود با عملیات Shot peening استحکام خستگی بازیابی شود.
۵. توان مخصوص (توان مصرف شده به ازای واحد حجم بار خارج شده) در ECM به طرز قابل ملاحظه‌ای بالاتر از روشهای سنتی است.
۶. ممکن است کانال‌های کاویتاسیون ایجاد شود که کیفیت سطح را تحت الشعاع قرار می‌دهد.
۷. پمپ کردن الکترولیت با فشار بالا در فاصله نازک بین ابزار و قطعه کار فشار هیدرودینامیک زیادی به قطعه کار و ابزار وارد می کند که در نتیجه لازم است ماشین دارای ساختار مستحکم و صلبی باشد.
۸. لازم است اجزای ماشین بلافاصله بعد از ماشین کاری تمیز شده و روغن زده شود.
۹. در صورتی که هیدروژن تولید شده در حین فرآیند با رعایت ایمنی خارج نشود امکان انفجار وجود دارد.

۱۰. ممکن است به علت وجود اکسیدها یا مانده قطعه در الکترولیت بین ابزار و قطعه کار جرقه زده شود که منجر به آسیب سطحی ابزار و قطعه و کاهش کیفیت سطح میشود. همینطور به دلیل برخورد ابزار به قطعه و ایجاد اتصال کوتاه ممکن است آسیب های سطحی به وجود آید.

کاربردها

ECM در کاربردهای وسیع صنعتی از ایجاد حفره (Cavity Sinking) تا پلیسه گیری استفاده شده است. با تغییر فرآیند در تراشکاری، شیار زنی، سوراخ کاری و ایجاد پروفیل نیز استفاده می شود.

استفاده مرکب از ECM به همراه روشهای پرداخت کاری سنتی روشهای بسیار پیشرفته سنگ زنی، هونینگ و سوپر فینیش با کمک فرآیند الکترو شیمیایی را پدید آورده است.

با این روش تنوع بالایی از جنس ها قابل فرآوری است که مستقل از سختی و استحکام و فقط وابسته به رسانایی الکتریکی آنهاست. نرخ باربرداری مخصوصاً برای قطعات دشوار برای ماشین کاری سنتی بالاست.

قطعات شکننده که با روشهای دیگری به راحتی قابل ماشین کاری نیستند با این روش به آسانی تولید می شوند. این اصل اصل که ابزار خورده نمی شود یک مزیت در مورد دقت و تکرار پذیری این روش است. به علاوه مقدار زیادی از قطعات بدون نیاز به تعویض ابزار قابل ماشین کاری است. بنابراین ECM یک روش ایده آل در تولید انبوه قطعات، اشکال پیچیده و سختی بالا است. به هر صورت در حوزه قطعات رسانا ECM و EDM رقابت تنگاتنگی دارند، در برخی موارد ECM به علت نداشتن تنش های حرارتی و HAZ جاذبه بیشتری دارد. این خاصیت در ماشین کاری قالب های سختکاری و تمپر شده مفید است.

تجهیزات ECM

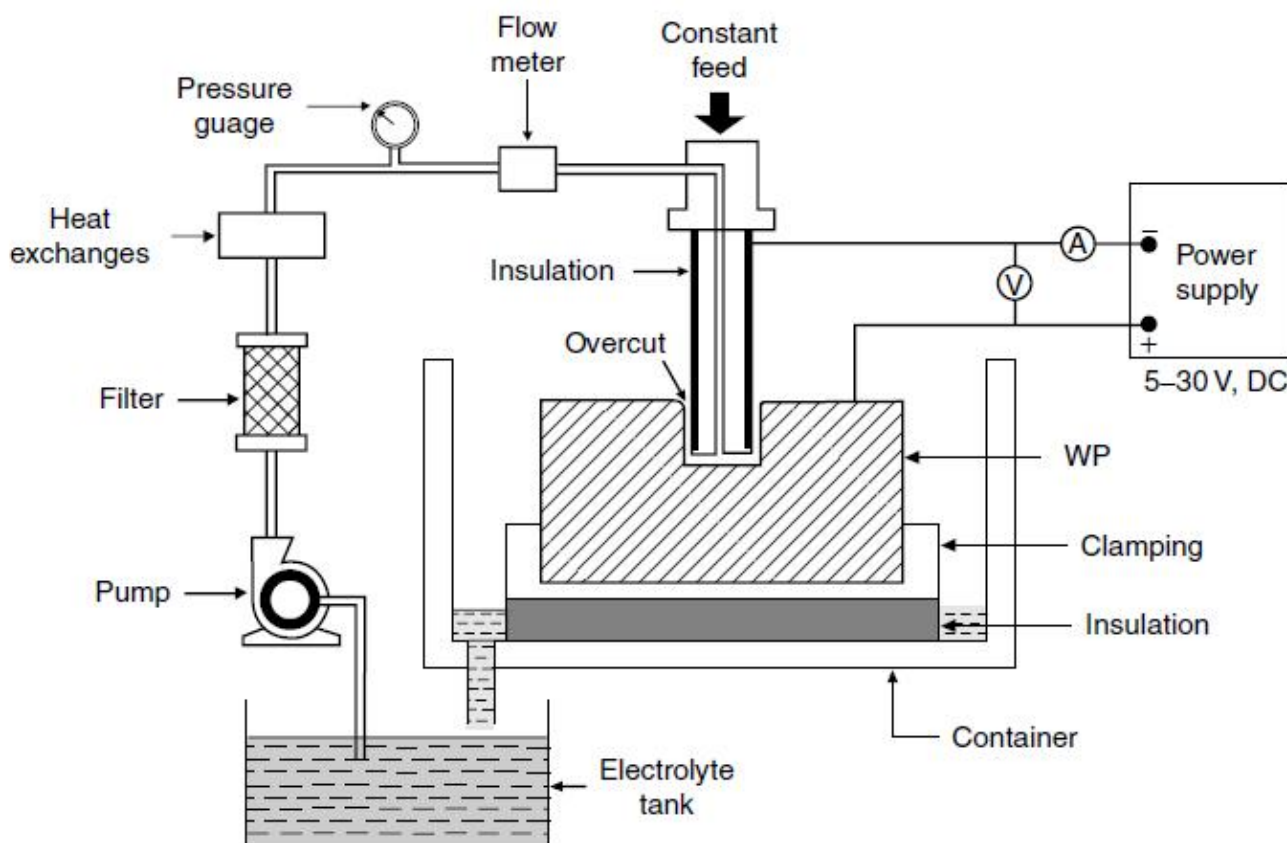
تجهیزات فرآیند الکتروشیمیایی در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. سه جز اصلی در این فرآیند عبارتند از ابزار، الکترولیت، قطعه کار

ابزار. جنس ابزار باید قابلیت ماشین کاری، استحکام مناسب، استحکام خوردگی بالا، رسانایی الکتریکی و حرارتی بالا داشته باشد. ابزارهای ECM معمولاً از مس، برنج، فولاد ضد زنگ ۳۱۶ ساخته نمی شوند. فولاد های کربنی به دلیل مقاومت کم به خوردگی توصیه نمی شود.

ابزار نباید دقیقاً تصویر آینه ای حفره مورد نیاز در قطعه باشد. ابعاد آن باید متفاوت از اندازه های نامی حفره باشد تا امکان overcut را بدهد. طراحی ابزار باید به گونه ای باشد که اجازه جریان الکترولیت با نرخی که حرارت به اندازه ای منتقل شود که از جوشیدن آن جلوگیری شود را بدهد. برای ایجاد سطح مناسب ماشین کاری شده

ماشینکاری الکتروشیمیایی

طراحی ابزار باید به گونه ای باشد که اجازه جریان یکنواخت و خطی در تمام ناحیه ماشین کاری را داده و از ایجاد گره و گرداب جلوگیری شود. در تولید قطعات پیچیده طراح ناچار است چند بار آزمایش‌هایی با همان شرایط ماشین کاری ترتیب دهد تا با توجه به نتایج بدست آمده و مورد نیاز طراحی ابزار را تغییر دهد.



شکل ۵-۲. تجهیزات ماشینکاری الکتروشیمیایی

قطعه کار. هیچ محدودیتی در جنس قطعه کار به جز رسانا بودن وجود ندارد. به علاوه باید در نظر گرفت که کربن در فرآیند الکتروشیمیایی غیر فعال است. بنابراین چدن خاکستری که حاوی کربن آزاد است، با این روش به خوبی ماشینکاری نمی شود.

الکتrolیت. الکتrolیت ها محلول نمک غیر ارگانیک نارسنایی نظیر NaNO_3 , KCl , NaCl یا مخلوطی از آنها. کارکردهای اصلی الکتrolیت از قرار زیر است:

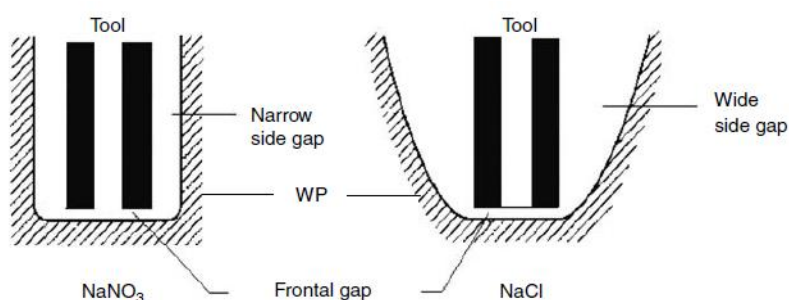
۱. کامل کردن مدار الکتریکی بین ابزار و قطعه کار
۲. فراهم کردن شرایط مطلوب و واکنش شیمیایی و انحلال آندی
۳. خارج کردن گرمای به وجود آمده در حین واکنش های شیمیایی

۴. خارج کردن پس ماند های واکنش (لجن) از فاصله ماشین کاری

بنابر این الکترولیت موثر و کارا باید خواص زیر را داشته باشند:

۱. رسانایی الکتریکی بالا برای عبور جریان
۲. لزجت (ویسکوزیته) پایین، امکان عبور از فاصله بسار کم الکترود و قطعه و فراهم کند.
۳. ظرفیت ویژه گرمایی بالا و رسانایی الکتریکی بالا تا گرمایی ایجاد شده از محیط خارج کند
۴. ممانعت از ایجاد لایه غیر فعال روی سطح قطعه کار
۵. پایداری شیمیایی بالا
۶. کارایی جریان بالا و نیاز به توان کم برای پیش راندن
۷. غیر سمی و غیر خورنده بودن نسبت به اجزاء ماشین
۸. ارزان و در دسترس بودن

همچنین الکترولیت ها نقش مهمی در کنترل ابعاد دارند. به عنوان مثال با NaNO_3 نرخ باربرداری بالاتری در فاصله کم ماشین کاری که چگالی جریان و کارایی جریان بالاتری دارد به دست می آید. در مقابل با NaCl نرخ بار برداری پایین در گپ زیاد باعث می شود که ابعاد به خوبی کنترل شود (شکل ۵-۳). روش تغذیه الکترولیت در فاصله ماشین کاری بستگی به نوع ماشین کاری، هندسه قطعه، دقت مورد نیاز و صافی سطح لازم دارد. به طور معمول شرایط الکترولیت در فاصله ماشینکاری از این قرار است: دما ۹۰ تا ۱۱۰ درجه سانتی گراد، فشار ۱۰ تا ۲۰ بار و سرعت خطی ۲۰ تا ۲۵ متر بر ثانیه.



شکل ۳-۵. اثر نوع الکترولیت بر دقت ابعادی حفره ایجاد شده به روش ماشینکاری الکتروشیمیایی

معمولاً یک تامین کننده توان DC و ماشین EC تجهیزات اصلی این فرآیند در نظر گرفته می شوند. تامین کننده توان باید ظرفیت کافی برای تامین جریان بین ۵۰ تا ۴۰۰۰۰ آمپر داشته باشد (بسته به نوع و ظرفیت

ماشینکاری الکتروشیمیایی

ماشین (ولتاژ اعمال بین ۵ تا ۳۰ ولت متداول است. ضمناً باید دارای محافظ اتصال کوتاه باشند تا از اثرات فاجعه بار اتصال کوتاه بین الکترودها جلوگیری شود.

ماشین الکتروشیمیایی باید استحکام کافی برای مقاومت در برابر فشار هیدرو دینامیک الکترولیت بین ابزار و قطعه را داشته باشد. یک مکانیزم سروو برای کنترل پیشروی ابزار لازم است، به نحوی که تعادلی بین پیشروی و نرخ انحلال آندی بدست آید. نرخ جریان عبور مانیتوری می شود و در صورت افزایش آنی پیشروی متوقف می شود.

بر خلاف ماشین ابزارهای سنتی، ماشینهای ECM با استفاده از مواد غیر فلزی در مقابل خوردگی شیمیایی محافظت می شوند. برای بدست آوردن استحکام کافی استفاده از مواد فلزی با پوشش غیر فلزی در ساختار ماشین توصیه می شود.

برای حذف خطر خوردگی سایر ماشین آلات، ماشین های ECM باید به خوبی در اتاق جداگانه ای در کارگاه ایزوله شوند. واحد تغذیه الکترولیت با نرخ تعیین شده، فشار و دمای مورد نیاز از دیگر بخشهای ماشین است. همینطور تجهیزات لازم برای فیلتر کردن الکترولیت، کنترل دما و خارج کردن پس ماند (لجن) نیز در این بخش تعبیه می شود.

در فرآیند ECM نرخ باربرداری فارغ از سختی یا استحکام ماده صرفاً وابسته به تعویض یونها می باشد. معمولاً نرخ باربرداری ۱.۵ سانتی متر مکعب به ازای هر ۱۰۰۰ آمپر به دست می آید. نرخ نفوذی در حدود ۲.۵ میلی متر بر دقیقه برای فولادها و کاربیدها مقدار متداولی است.

یک خصوصیت منحصر به فرد ECM در بین همه روشهای سنتی و غیر سنتی این است که با افزایش نرخ بار برداری (در نتیجه افزایش چگالی جریان) دقت ابعادی و کیفیت سطح بهبود بیشتری می یابد.

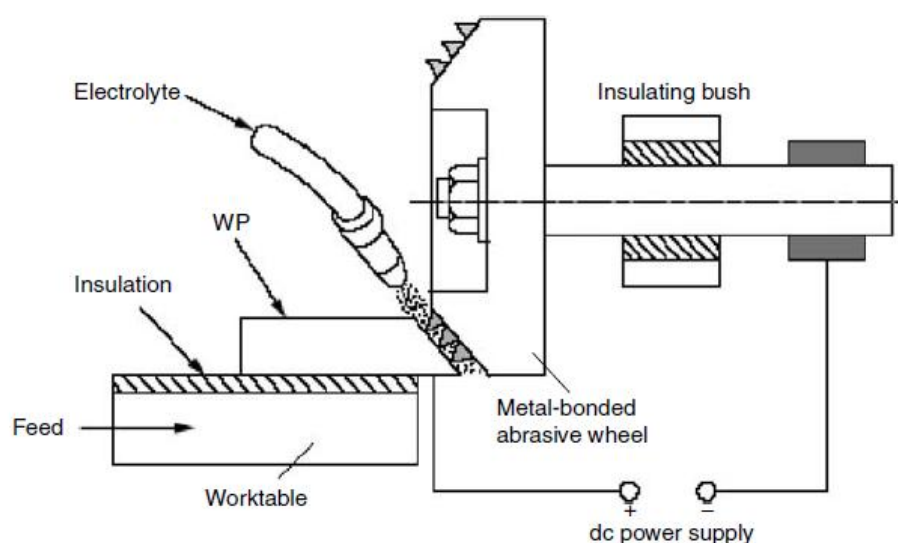
یک مسئله اصلی در ECM، overcut یا بار برداری جانبی می باشد که باعث کاهش دقت می شود. به طور کلی فاصله جانبی توسط مجموعه ای از پارامترها کنترل می شود که در بین آنها نوع الکترولیت و نوع جریان آن بیشترین نقش را داد. بسیار مهم است که فاصله جانبی کوچکی داشته باشیم چرا که تolerانس حاصله وابستگی مستقیم به پهنای گپ دارد، به طور معمول تolerانس حاصله از ECM حدود ± 0.13 میلی متر می باشد. اما با کنترل مناسب پارامترها امکان حصول تolerانس ± 0.025 میلی متر نیز موجود است. ماشین کاری شعاعهای داخلی کمتر از ۰.۸ میلی متر دشوار است. به طور معمول overcut (برش جانبی) ۰.۵ میلی متر و مخروطی بودن ۱

میکرون به ازای هر میلی متر متداول است. به طور معمول کیفیت سطح $Ra = 0.2 \sim 1 \mu$ در ECM به دست می آید که با افزایش نرخ بار برداری زبری سطح در این بازه کمتر می شود.

هزینه اصلی ابزار به سبب آماده سازی اولیه آن می باشد که پر خرج و و زمان بر است. معمولاً باید با سعی و خطا و چندین بار اصلاح ساخته شود مگر با شکل های ساده. این قابلیت ECM که با یک فرآیند کل حفره را می توان ساخت، آن را روشی بسار کارا تبدیل کرده است. اما هزینه بالایی ابزار برای اشکال پیچیده باید در نظر گرفته شود.

۶. سنگ زنی الکتروشیمیایی (ECG)

این روش یکی از فرآیندهای هیبریدی است که در آن فلز با ترکیب انحلال الکتروشیمیایی و سایش مکانیکی برداشته می شود. تجهیزات مورد استفاده در ECG مشابه سنگ زنی سنتی است به غیر اینکه چرخ سنگ یا ذرات ساینده نظیر الماس با چسب فلزی است. چرخ سنگ از طریق اسپیندل به قطب منفی منبع تغذیه DC وصل می شود و قطعه به قطب مثبت.



شکل ۶-۱. شمای سنگ زنی الکتروشیمیایی

جریان الکترولیت معمولاً NaNO_3 می باشد که در جهت چرخش سنگ ها فاصله ماشین کاری تغذیه می شود. حرکت خطی سنگ بین ۲۵ تا ۳۵ متر بر ثانیه می باشد. ساینده در چرخ سنگ همواره غیر رسانا است. بنابراین این ذرات نقش جدا کننده الکترودها و ایجاد فاصله ماشینکاری ($12-80\mu\text{m}$) را بازی می کنند. همچنین ذرات ساینده نقش خارج کردن پس ماند واکنش و ذرات ساییده شده از قطعه کار را بازی می کنند. بنابراین برداشت ماده از قطعه کار به سبب عبور جریان ($100-300\frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$) از فاصله ماشین کاری انجام می شود و این نرخ تجزیه به سبب خاصیت سنگ زنی ذرات ساینده افزایش می یابد. به طور معمول در یک فرآیند ECG ۹۵٪ خروج ماده از طریق انحلال شیمیایی و تنها ۵٪ توسط سایش مکانیکی انجام می شود. در نتیجه نیاز به به درس کردن سنگ از بین می رود و یا حداقل تا حد زیادی کاسته می شود.

کاهش آسیب حرارتی، اعوجاج، پلیسه و تنش پسماند در ECG مزایایی بسیار مهمی هستند مخصوصاً زمانی که با نرخ بالای براده برداری و سایش بسیار کم سنگ ترکیب می شوند. به همین دلیل این روش با موفقیت بسیار بالا در تیز کاری ابزارهای براده برداری، دوزه ها و پانجهای فولادی پر استحکام به کار گرفته شده است.

مزایا و محدودیتها

مزایایی این روش نسبت به روش سنگ زنی سنتی عبارتند از:

۱. افزایش MRR به سبب اثر الکترو شیمیایی
۲. کاهش سایش ابزار و هزینه های درس کردن
۳. کاهش ریسک آسیب حرارتی و اعوجاج
۴. نبود پلیسه
۵. کاهش فشار چرخ و در نتیجه افزایش دقت

اما به هر حال ECG محدودیت های ذیل را نیز دارد (نسبت به سنگ زنی سنتی).

۱. سرمایه گذاری اولیه بیشتر
۲. محدود به قطعات رسانایی الکتریکی
۳. خطرات به سبب وجود الکترولیت با طبیعت خورنده، به همین دلیل NaNO_3 با خورندگی کمتر مورد استفاده قرار می گیرد.
۴. نیاز به فیلتر کردن و دور ریختن الکترولیت

کاربردها

برخی از کاربردهای متداول ECG از قرار زیر هستند:

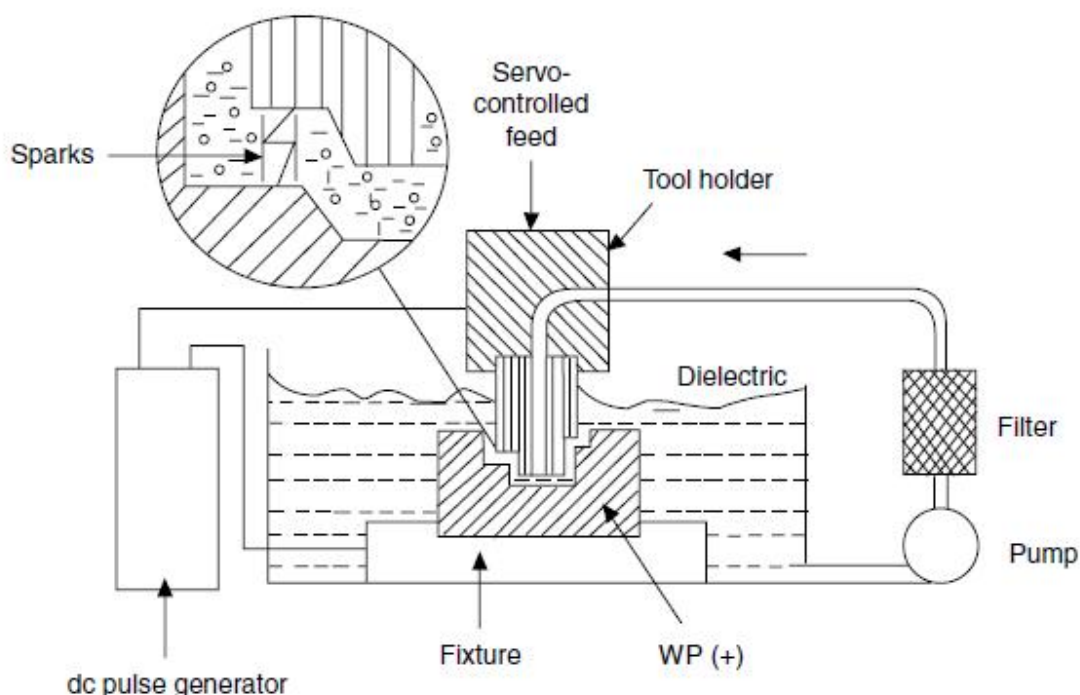
۱. تیز کاری ابزار براده برداری کاربایدی با به کار بستن ECG حدود ۷۵٪ کاهش هزینه در ابزار سنگ و ۵۰٪ کاهش هزینه در نیروی انسانی
 ۲. سنگ زنی قطعات شکننده نظیر کامپوزیت های لانه زنبوری، لوله های جدار نازک و سوزن های تزریق پزشکی
- امروزه ماشین های ECG با قابلیت NC موجود هستند که باعث افزایش دقت، تکرار پذیری و کارایی می شود. در عمل نرخ برداری $1 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}.100A}$ مقدار واقع بینانه ای است. صافی سطح ۰.۲ تا ۰.۶ میکرون به آسانی قابل حصول

سنگ زنی الکتروشیمیایی

است، هر قدر سختی ماده قطعه بالاتر باشد صافی سطح بالاتری قابل حصول است، تفرانس حاصله از فرآیند در حد $10\mu\text{m}$ می باشد، در صورتی که نیاز به تفرانس بسته تر باشد می توان بیشتر ماده را با ECG برداشت و در پاس نهایی بین ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون با سنگ زنی سنتی برداشت، نیازی به تعویض ماشین نیست فقط کافی است جریان الکتریکی را قطع کرد و در همان ماشین با همان امکانات یک پاس سنگ زنی سنتی انجام داد.

۷. ماشین کاری تخلیه الکتریکی (EDM)

از بین روشهای ماشین کاری غیر سنتی هیچ یک مقبولیت و گستردگی EDM را نیافته‌اند. این نکته معروف است که وقتی دو سیم جریان الکتریکی تماس پیدا می کنند جرقه ای به وجود می آید. این پدیده در سال ۱۷۹۰ توسط Pristly کشف شد. اما تا دهه ۱۹۴۰ که اولین فرآیند ماشین کاری بر این اساس در روسیه بنا نهاده شد، از آن استفاده نشده است، اساس این نوع ماشین کاری جرقه بین ابزار فرم داده شده و قطعه کار است (اسپارک هم نامیده می شود).



شکل ۷-۱. شمای کلی فرآیند ماشینکاری تخلیه الکتریکی

ابزار و قطعه کار که فاصله کمی به اندازه ۱۰ میکرون تا ۰.۵ میلی متر دارند در یک مایع نارسانای الکتریکی غوطه ور می شوند (شکل ۷-۱)، وقتی اختلاف پتانسیل کافی بین دو الکترود (ابزار و قطعه کار) به وجود آمد، دی الکتریک بین قطعه و ابزار به صورت موضعی یونیزه شده و یک جرقه گذرا بین الکترودها در داخل دی الکتریک به وجود می آید، که در نزدیکترین قسمت بین ابزار و قطعه کار است، هر جرقه با توان حرارتی در حدوده $10 \frac{KW}{mm^2}$ قادر است بخشی از الکترود و قطعه کار را ذوب یا تبخیر کند (یک منطقه کوچک). بخشی از کل انرژی توسط ابزار جذب می شود که باعث فرسایش آن می شود، با رعایت پارامترهایی صحیح می توان این بخش را در حدوده ۱٪ کل انرژی کاهش داد. تبخیر آنی دی الکتریک منجر به تشکیل یک حباب با فشار زیاد می شود که به

شکل شعاعی گسترش می یابد. در عین حال بخشی از فلز قطعه کار خارج می شود که منجر به تشکیل خالهایی کوچک روی قطعه می شود و گلوبولهای فلزی در دی الکتریک غوطه ور می شود.

لجن سیاه رنگی از ذرات کربنی حاصل از هیدروکربنهای دی الکتریک در گپ ماشینکاری به وجود می آید و در کل دی الکتریک بر اثر انرژی انفجار جرقه پخش می شود، بلافاصله پس از جرقه، دی الکتریک موجود دیونیزه (بر عکس یونیزه) می شود و مجدداً به عنوان عایق موثری در فرآیند عمل می کند، تخلیه خازن که با نرخی در حدود ۰.۵ تا ۵۰۰ کیلو هرتز تکرار می شود، ولتاژی در حدود ۵۰ تا ۳۸۰ ولت و جریانی از ۰.۱ تا ۵۰۰ آمپر دارد.

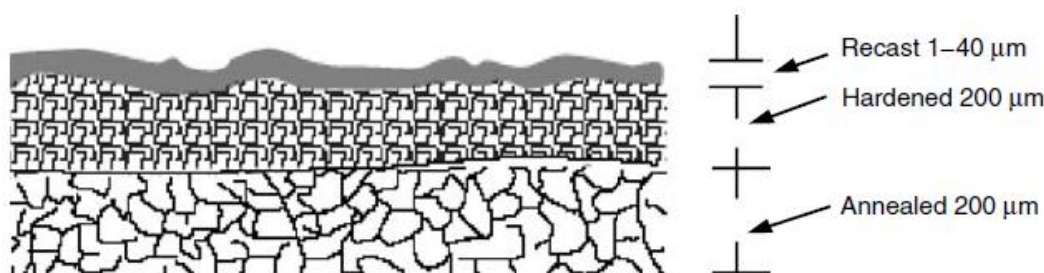
مزایا و محدودیتها

EDM دارای مزایای زیر می باشد:

۱. بدون توجه به سختی و چقرمگی قابل استفاده برای ماشین کاری فلزات، آلیاژها و کاربیدهاست.
۲. به دلیل عدم تماس بین ابزار و قطعه کار، قطعاتی با اشکال پیچیده و شکننده قابل ماشینکاری است.
۳. فرآیند به طور وسیعی برای ایجاد حفره و پروفایل هایی با اشکال پیچیده و دقت بالا در قطعات فوق سخت استفاده می شود.
۴. فرآیند هیچ نوع براده یا پلیسه ای در لبه ها باقی نمی گذارد.
۵. الکتروودهای EDM را می توان از جنس هایی که ماشینکاری آنها سهل است تولید کرد. این مسأله بر دقت سوراخ ها و حفره های به وجود آمده تأثیر مثبت دارد.

به هر صورت محدودیت ها زیر برای این فرایند در نظر گرفته می شود:

۱. برای قطعاتی که رسانایی کم داشته باشند قابل استفاده نیست.
۲. قطعات تولید شده توسط EDM دارای منطقه HAZ هستند (شکل ۷-۲) که دارای ترک هایی ریز مویی و خواص پایین ضربه پذیری می باشد برای رفع این مشکل پس از EDM می توان فرآیندهایی دیگر نظیر CHM یا shot peening و نظیر آن را اعمال کرد. مخصوصاً اگر قطعه تحت بارگذاری خستگی باشد، حتماً باید این مشکل را رفع کرد.
۳. گوشه ها و لبه های تیز با این روش قابل حصول نیست.
۴. انرژی مخصوص این فرآیند بالاست.
۵. در مقایسه با ماشین کاری سنتی نرخ بار برداری پایین است.



شکل ۷-۲. منطقه متأثر از حرارت در ماشینکاری تخلیه الکتریکی

کاربردها

EDM در بسیاری از موارد کاربرد ویژه‌ای یافته است، نظیر تولید حفره قالب هایی برای قطعات بدنه خودرو با دقت بالا. ۸۰ تا ۹۰ درصد کارهایی که با EDM انجام می شود تولید ست‌های ابزار و قالب‌های ریخته‌گری، فرج، اکستروژن و ... است. ماشین‌کاری سوراخ‌های باریک، شیارها و ایجاد بافت (Texture) و فرزکاری نیز از کاربردهایی متداول این فرآیند هستند.

نوع اول ماشین‌هایی براساس EDM، ماشین‌هایی تولید حفره ED sinking Machining می باشد. اکثر ماشین‌ها از نوع RAM می‌باشد که کله ماشین‌ها توسط یک سیلندر هیدرولیک جا به جا می شود. در EDM، فاصله بین الکترودها (ابزار و قطعه) بسیار حساس است و باید در محدوده خاصی حفظ شود، بنابراین مکانیزم پیشروی سروو مکانیزم است که به طور خودکار فاصله را حفظ می کند. سیگنال ورودی مکانیزم سروو از اختلاف بین سطح ولتاژ اولیه و ولتاژ واقعی گپ انتخاب می شود. این ولتاژ تقویت شده و ابزار توسط مکانیزم هیدرولیک پیشروی می‌کند.

تجهیزات

در شکل ۷-۳ تجهیزات مورد استفاده در فرآیند ماشینکاری با تخلیه الکتریکی آورده شده است.

مایع دی الکتریک

چهار وظیفه اصلی برای مایه دی الکتریک در نظر گرفته می شود:

۱. به عنوان مایع جدا کننده ابزار و قطعه
۲. هادی جرقه در کانال پلاسما
۳. محیط خنک کننده

۴. و خارج کننده ضایعات ناشی از جرقه

یک مایع دی الکتریک باید خصوصیات زیر را داشته باشد:

۱. ویسکوزیته کم برای تامین خاصیت خارج کننده ضایعات

۲. گرمای پنهان بالا

۳. خاصیت دی الکتریک مناسب، به عنوان مثال $180V/25\mu m$

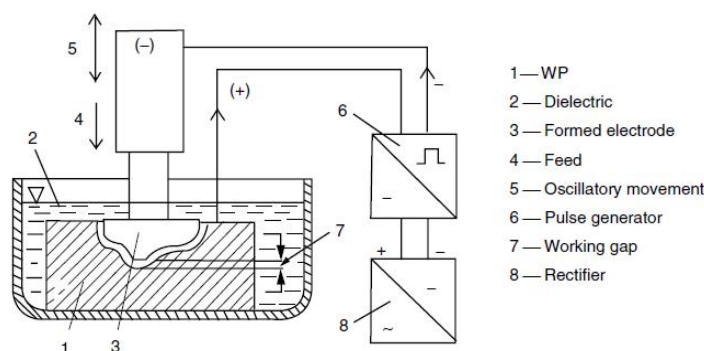
۴. یونیزاسیون سریع در پتانسیل ۴۰ تا ۳۰۰ ولت و در ادامه دیونیزاسیون سریع

۵. غیر سمی بودن

۶. غیر خورنده بودن

۷. ارزان بودن

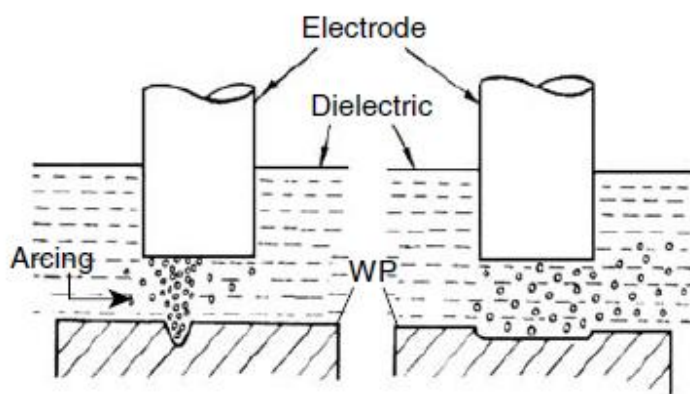
به طور معمول از هیدرو کربن ها برای مایع دی الکتریک استفاده می شود، هر چند که از آب دیونیزه نیز ممکن است در کاربردهایی خاص استفاده شود. برخی ترکیبات دیگر نظیر آب و گلیسرین به همراه روغن تری اتیلن برای کاهش خوردگی ابزار و افزایش نرخ بار برداری موثرند.



شکل ۳-۷. تجهیزات ماشینکاری تخلیه الکتریکی

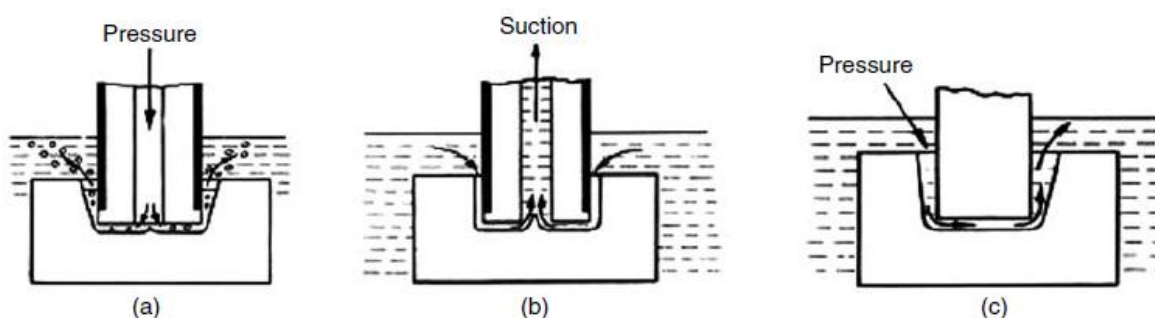
روشهایی تخلیه دی الکتریک

تخلیه دی الکتریک در EDM از اهمیت اساسی برخوردار است. در ابتدا، دی الکتریک تازه و تمیز دارای خاصیت بالایی عایق بودن می باشد. اما با انجام فرآیند و آلوده شدن به پس ماندهای جرقه این خاصیت کاهش می یابد.



شکل ۴-۷. تجمع ذرات بین دو الکترود و ایجاد قوس الکتریکی

در صورتی که ذرات از یک مقدار معین بین ابزار و قطعه بیشتر باشد باشند تشکیل پلی می دهند که قوس ار آن می شود و به ابزار و قطعه آسیب می رساند (شکل ۴-۷). سه روش اصلی تخلیه دی الکتریک وجود دارد (شکل ۵-۷):



شکل ۵-۷. روشهای تخلیه دی الکتریک

۱. تزریق که در آن یک مخروط خفیف در کنار قطعه به سبب جرقه های جانبی به دلیل عبور ذرات ایجاد می شود.
۲. مکش که به وسیله آن از مخروط جانبی احتراز می شود.
۳. تخلیه جانبی که باعث ایجاد مخروط در بخش خروجی دی الکتریک می شود

انواع مدارهای منبع تغذیه:

وظیفه منبع تغذیه تأمین ولتاژ کافی برای ایجاد جرقه به طور متناوب می باشد. دو نوع اصلی ژنراتور در این مدارها استفاده می شود، مدارهایی متفاوت خازنی RC و مدارهایی پالس ژنراتور ترانزیستوری

ابزار (الکتروُد) EDM

در ماشین کاری تخلیه الکتریکی برای ایجاد حفره، عموماً الکتروُد ها گرانیقیمت ترین بخش فرآیند هستند. ساخت ابزار، سایش آن و درست کردن مجدد (redressing) باید به دقت مد نظر قرار داده شود تا بهترین ماده برای تنظیم خاص ماشینکاری تخلیه الکتریکی انتخاب شود. ماده ایده آل برای الکتروُد ها باید رسانایی الکتریکی بالا و نقطه ذوب بالا داشته و به سادگی ساخته شود و همینطور به اندازه کافی استحکام داشته باشد تا فرآیند EDM را بدون تغییر شکل تحمل کند.

بیشترین الکتروُد های EDM از گرافیت ساخته می شود اما برنج، مس، آلیاژ مس و تنگستن نیز استفاده می شود. الکتروُد ها با شکل دهی ریخته گری متالوژی پودر و در موارد ماشینکاری ساخته می شوند. خوردگی ابزار EDM مسأله مهمی است که دقت ابعادی و هندسی ماشین کاری را تحت الشعاع قرار می دهد. این عامل رابطه عکس با نقطه ذوب ماده الکتروُد دارد که هر چقدر بالاتر باشد سایش کمتری در ابزار رخ می دهد.

بنابراین الکتروُد های گرافیتی بیشترین مقاومت را در برابر خوردگی را دارند. چرا که گرافیت بالاتر دمای ذوب را در بین مواد شناخته شده دارد (3600°C). به علاوه هزینه نسبتاً کمی دارد و به سهولت ساخته می شود. تنگستن و آلیاژهای آن پس از گرافیت بالاترین دمای ذوب را دارا است (3400°C)، ماده بعدی از نظر دمای ذوب مولیبدن است. اما باید در نظر داشت که این مواد گرانیقیمت بوده و ساخت ابزار با آنها دشوار می باشد. در بعضی شرایط ممکن است با معکوس کردن پلار تیه خوردگی ابزار را کاهش داد که البته این مسأله بستگی به ترکیب جنس ابزار و قطعه دارد.

جدول ۷-۱. پلار تیه های مناسب برای تخلیه بدون سایش

جنس قطعه کار	جنس الکتروُد		
	گرافیت	مس	مس-تنگستن
فولاد	SR	S	S
مس	R	R	R
کاربید	R	SR	SR
آلومینیوم	S	S	S
آلیاژهای پایه نیکل	SR	S	S

S: straight polarity w/p (+)

P: reverse polarity w/p (-)

در شرایط خاصی می توان خوردگی ابزار را به صفر رساند، این شرایط ماشینکاری تخلیه الکتریکی بدون سایش می نامیم. EDM بدون سایش نیازمند پالس ژنراتور و تجهیزات با قابلیت زیر است:

۱. پلار تیه معکوس ابزار
۲. فرکانس پایین پالس بین ۰.۴ تا ۲۰ کیلو هرتز. عموماً تا حدود 2 KHZ پیشنهاد می شود.
۳. ابزار از جنس گرافیت، مس، مس/تنگستن یا نقره تنگستن
۴. جریان تخلیه الکتریکی بالا
۵. کنترل بین سرور مکانیزم
۶. ولتاژ تغذیه کمتر از ۸۰ ولت
۷. دمای دی الکتریک کمتر از 40° سانتی گراد و جریان دی الکتریک با فشار کم
۸. در جریان دی الکتریک نباید ذرات در جایی باقی بمانند.

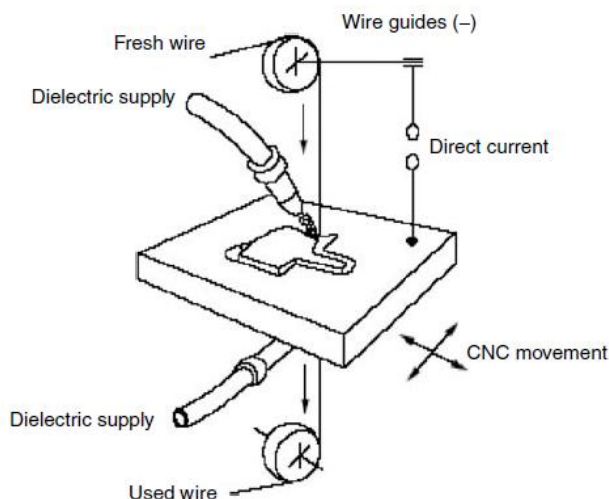
EDM در قیاس با روشهایی ماشین کاری سنتی، روشی با سرعت کم محسوب می شود. سطحی مات و بدون جلا و دارای حفره های ریز و ترک ها و گشودگی هایی که در جهت های مختلف به صورت رندم توزیع شده اند، تولید می کند نرخ بار برداری بین ۰.۱ تا ۶۰۰ میلیمتر مکعب می باشد. در EDM رابطه مستقیمی بین نرخ بار برداری و زبری سطح وجود دارد. نرخ بار برداری بالا سطحی زبر و خشن تولید می کند که در مقابل بار گذاری خستگی استحکام کمی دارد. ضمناً لایه رسوبی (recast) نیز باقی می ماند که در صورت نیاز باید در پاس پرداخت که با نرخ کم بار برداری انجام می شود برداشته شود.

نرخ بار برداری علاوه بر وابستگی به جنس قطعه به پارامترهای فرآیند نظیر شرایط پالس (ولتاژ، جریان و زمان)، جنس و پلار تیه ابزار (الکتروود) و دی الکتریک نیز بستگی دارد.

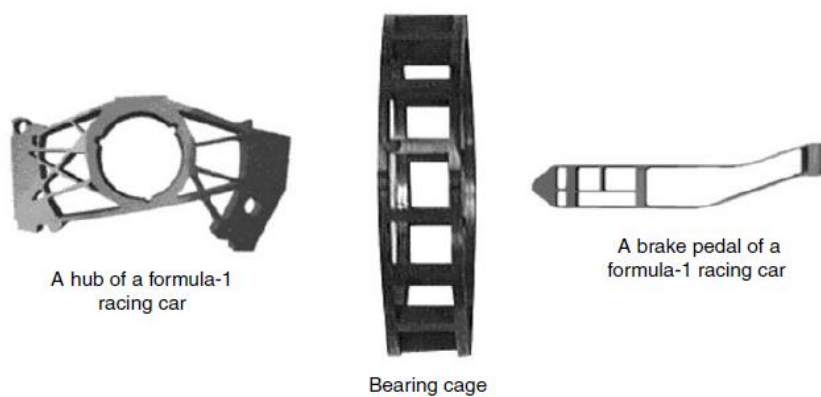
در EDM اندازه حفره ایجاد شده به دلیل جرقه های جانبی بزرگتر از اندازه ابزار است، که باید در طراحی ابزار در نظر گرفته شود.

۸. برش سیمی با تخلیه الکتریکی (Electrodischarge Wire Cutting) - وایر کات

این متد، روش تغییر یافته EDM و مشابه برش کانتور به وسیله اره نواری است. یک سیم که به طور پیوسته در یک مسیر از پیش تعیین شده حرکت میکند، قطعه را به وسیله جرقه های تخلیه الکتریکی که مثل دندانه های اره عمل می کند می برد (شکل ۸-۱).



شکل ۸-۱. فرآیند وایرکات



شکل ۸-۲. برخی قطعات تولید شده به وسیله وایرکات

وایرکات برای برش ورقهایی تا پهنای 300mm برای ساخت انواع پانچ، ابزار، صفحات مشبک (شکل ۸-۲) و قالب های اکستروژن از جنسهای سخت ابزاری مناسب است.

در ماشین کاری وایرکات فقط از پالس ژنراتورهایی استفاده می شود که زمان پالس و حداکثر جریان متغیرهای اصلی کنترلی انرژی جرقه هستند. وایرکات های پیشرفته با ژنراتورهای پالسی مدرن ایزوپالس تجهیز می شود، که متغیرهایی که در بالا گفته شد به همراه زمان خاموشی و فرکانس جرقه به طور مستقل قابل تنظیم هستند. با توجه به محدودیت سیم، جریان به ندرت از 30A تجاوز می کند. اختلاف بین ابزار (سیم) و قطعه کار معمولاً بین ۵۰ تا ۶۰ ولت تنظیم می شود. با توجه به اینکه خوردگی سیم از اهمیت زیادی برخوردار نیست، پلاریته منفی در وایرکات همواره به سیم اختصاص داده می شود استفاده از سیم ضخیم تر امکان داشتن انرژی بیشتر جرقه و در نتیجه نرخ برش سریعتر را می دهد.

تخلیه دی الکتریک و جریان آن در وایرکات از اهمیت فوق العاده برخوردار است. نازل های دی الکتریک باید تا حد امکان نزدیک به گپ کاری باشند. تغییر ضخامت در برش عمدتاً مشکل زا است چرا که جریان یکنواخت دی الکتریک را دشوار می کند، نتیجه اولیه عدم تخلیه و جریان مناسب دی الکتریک قطع شدن سیم است که می توان با کاهش زمان روشن بودن جرقه این مشکل را کاهش داد که البته منجر به کاهش نرخ برش می شود.

معمولاً همواره از آب دیونیزه به عنوان دی الکتریک استفاده می شود که به خاطر ویسکوزیته کم آن در شرایط دشوار وایرکات برای جریان در گپ های کوچک مناسب است. گاهی برخی افزودنیها به عنوان ضد رنگ یا لغزنده کردن دی الکتریک اضافه می شود. تنظیم دما برای یکنواختی کار از اهمیت زیادی برخوردار است و همینطور فیلتر کردن خوب دی الکتریک، در صورت باقی ماندن ذرات در دی الکتریک منجر به ایجاد قوس و پاره شدن سیم می شود.

معمولترین جنس مورد استفاده به عنوان سیم برنج است. چرا که نیازمندیهای فرآیند را برآورده می کند. استحکام کششی مناسب، رسانایی الکتریکی بالا، قابلیت تولید در تolerانس های دقیق مطلوب، در برخی از موارد از سیم هایی چند لایه استفاده می شود که سرعت برش بالاتری نسبت به برنج دارند اما گرانتز هستند یک مثال برای این سیمها «فولاد، مس، گرافیت» است. که فولاد استحکام کششی لازم را تامین می کند، مس هدایت الکتریکی و گرافیت در لایه خارجی امکان برش با سرعت بالاتر را فراهم می کند قطر سیم های استفاده شده بین ۵ تا ۳۰۰ میکرون است و سرعت حرکت سیم بین ۰.۲ تا ۹ متر بر دقیقه می باشد.

معمولاً در وایرکات سرعت براساس سطح مقطع برش بر واحد زمان داده می شود. به عنوان مثال برای ورق فولاد ابزار به ضخامت ۵۰ میلی متر سرعت $18000 \frac{\text{mm}^2}{\text{h}}$ برای آلومینوم به ضخامت 150mm سرعت $45000 \frac{\text{mm}^2}{\text{h}}$ بر ساعت متداول است. این دو نرخ به ترتیب سرعت برش خطی ای در حدود ۶ میلی متر بر دقیقه و ۵ میلی متر بر دقیقه به دست می دهد.

۹. ماشین کاری پرتو الکترونی EBM

اولین نمونه دستگاه اشعه الکترونی در سال ۱۹۵۸ در آلمان ساخته شد و برای جوشکاری مورد استفاده قرار گرفت. این تکنولوژی جدید به سرعت در صنایع مختلف به کاربردهای دیگر نظیر ماشین کاری و سخت کاری سطحی گسترش یافته است.

EBM یک روش حرارتی ماشینکاری غیر سنتی است که از یک اشعه پرتو الکترونی که با چگالی بسیار بالا بر سطح قطعه متمرکز می شود، استفاده می کند. این اشعه منجر به ذوب و تبخیر سریع ماده می شود. پتانسیل بالایی در حد 120 kv برای شتاب دادن به الکترونها در حد ۵۰ تا ۸۰ درصد سرعت نور استفاده می شود. تداخل اشعه با قطعه منجر به ایجاد اشعه X خطرناک می شود، در نتیجه پوشش های ایمنی و آموزش های سطح بالایی پرسنل مورد نیاز است. EBM برای ماشین کاری قطعات رسانا و غیر رسانا استفاده می شود. خواص ماده نظیر چگالی، رسانایی الکتریکی و حرارتی، بازتاب و نقطه ذوب عموماً محدودیتی در استفاده از EBM ایجاد نمی کند. بیشترین کاربرد EBM سوراخ کاری سوراخ های کوچک ۰.۰۵ تا ۱ میلی متر با دقت بالا و قابلیت اتوماسیون بالاست.

مزایا و محدودیتها

مزایای این روش عبارتند از:

۱. سوراخ کاری سوراخ هایی ظریف با سرعت بالا (۴۰۰۰ سوراخ در ثانیه) قابل انجام است.
۲. ماشینکاری هر ماده فارغ از خصوصیات آن.
۳. میکرو ماشین کاری با سرعت بالا اقتصادی تر از EDM و ECM
۴. دقت و تکرار پذیری موقعیت سوراخ در حدود ± 0.1 میلی متر و قطر سوراخ در ± 5.0 قطر
۵. پارامترهای سوراخ کاری به راحتی قابل تغییر هستند (در حین ماشین کاری) حتی از یک سطر به سطر دیگر
۶. بهترین پرداخت سطح در مقایسه با روش های دیگر را ایجاد می کند.
۷. امکان اتوماسیون و کار آمده بالا
۸. زوایایی تیز به راحتی قابل حصول است.

محدودیتهای EBM از قرار زیرند:

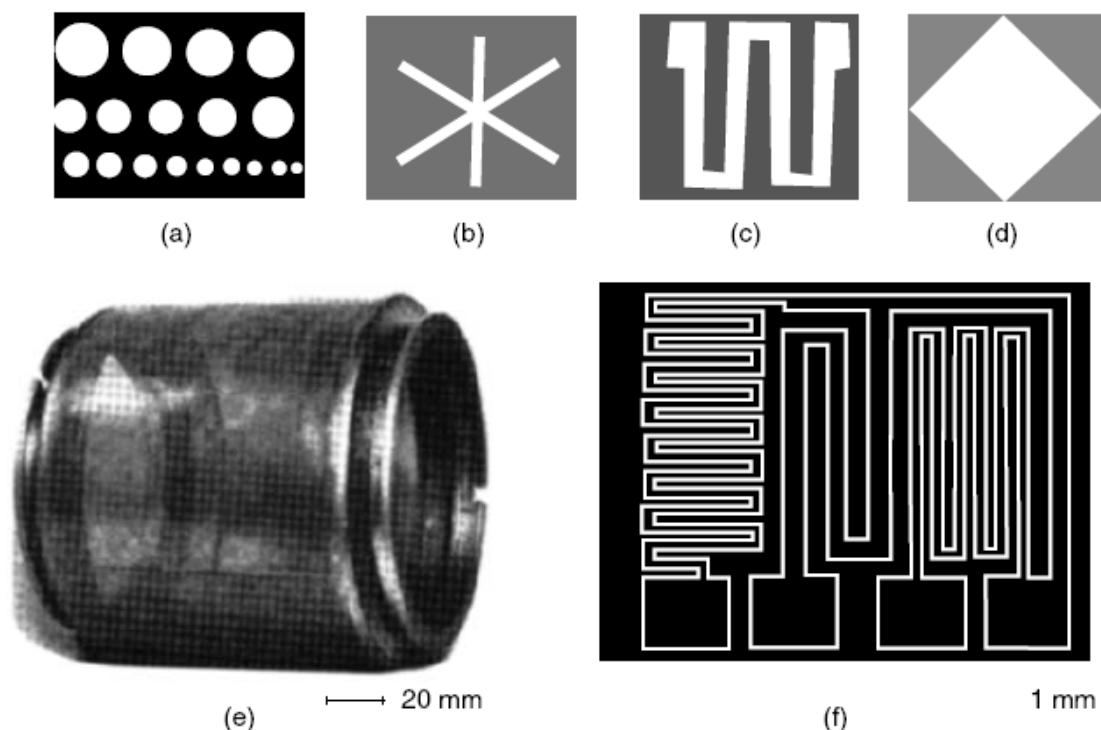
۱. سرمایه گذاری اولیه برای تجهیزات بالاست.
۲. از دست دادن زمان برای تخلیه محفظه ماشینکاری
۳. وجود منطقه HAZ و لایه سرباز نازک

۴. نیاز به ماده کمکی زیری

۵. نیاز به پرسنل با تجربه و آموزش دیده برای کار با CNC و خطرات اشعه X

کاربرد

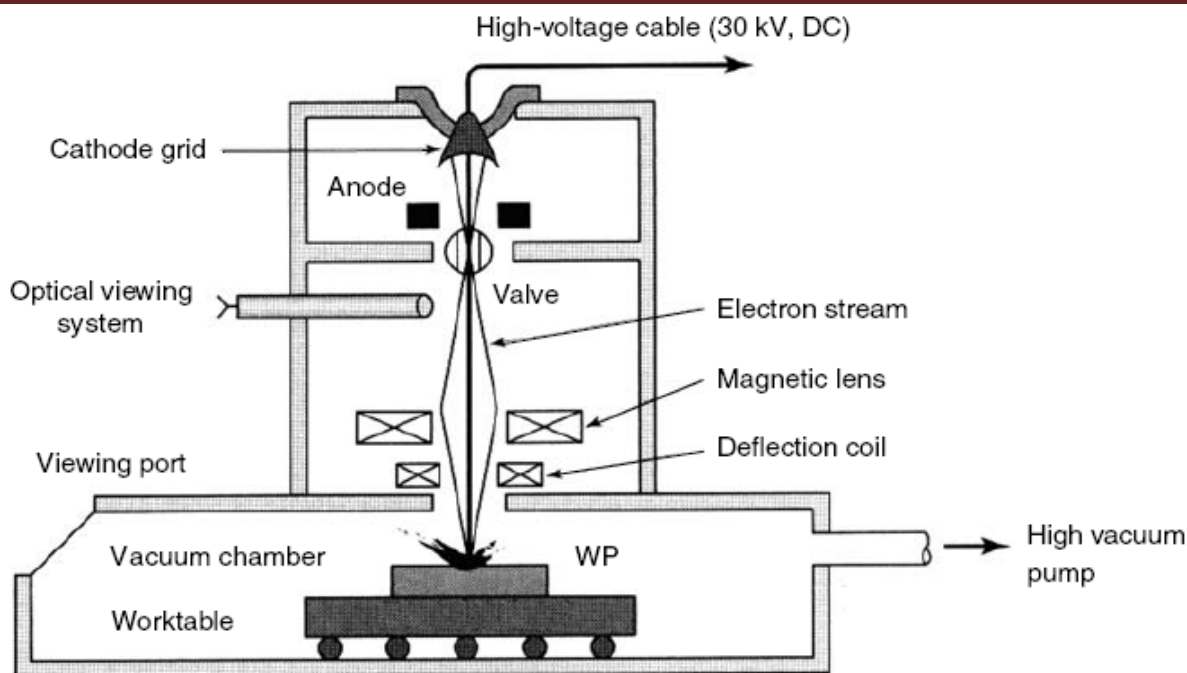
معمولاً EBM فقط برای سوراخ کاری و برش استفاده می شود. سوراخ کاری با این روش زمانی که باید تعداد زیادی از سوراخ ایجاد شود و یا سوراخ ها به دلیل پیچیدگی هندسی یا سختی ماده، به راحتی قابل ایجاد نیستند، مزایای زیادی دارد. در صنایع نساجی و شیمیایی از EBM برای سوراخکاری فیلترها و طرحهای توری استفاده می شود. شکل ۹-۱ برخی از قطعاتی که با این روش ساخته می شوند را نشان داده است.



شکل ۹-۱. برخی از قطعاتی که با ماشینکاری پرتو الکترونی ساخته می شوند

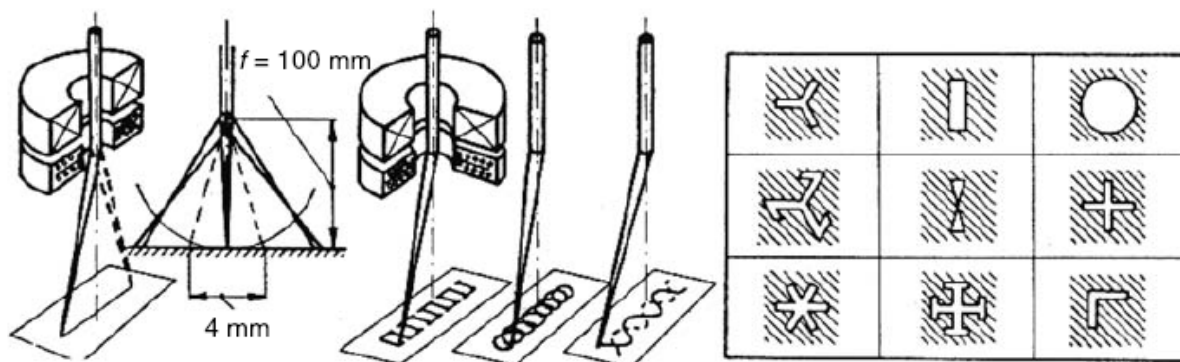
تجهیزات

در شکل ۹-۲ تجهیزات EBM نشان داده شده است. الکترونها از یک المنت داغ تنگستنی آزاد می شوند. ولتاژ بالایی در حدود 120 kv لازم است تا الکترونها از کاتد شتاب بگیرند و به سمت آند حرکت کنند و حرکت خود را در خلا به سمت قطعه کار ادامه دهند. پس از آن یک لنز مغناطیسی برای متمرکز کردن اشعه در منطقه به قطر ۱۲ تا ۲۵ میکرون به کار گرفته می شود.



شکل ۹-۲. تجهیزات مورد استفاده در ماشینکاری پرتو الکترونی

پس از آن یک کوپل هادی برای منحرف کردن دلخواه اشعه در زاویه کمتر از ۵ دقیقه استفاده می شود (برای افزایش وسعت منطقه ماشین کاری). با استفاده از انحراف اشعه می توان بدون جابه جا کردن قطعه کار اشکال استاندارد را بدست آورد (شکل ۹-۳). در حین طی مسیر، اشعه سرعت و دایروی بودن مقطع خطوط از دست می دهد. برای سوراخ کاری اشعه به شکل پالسی و به ازای هر سوراخ یک پالس استفاده می شود.



شکل ۹-۳. انحراف پرتو برای ایجاد شکل های استاندارد بدون جابه جا کردن قطعه

دلایل اینکه محفظه ماشین کاری باید از هوا تخلیه شده باشد، از قرار زیرند:

- جلوگیری از اکسیداسیون المنت های حرارتی
- جلوگیری از برخورد الکترون با سنگین N_2 و O_2 از دست رفتن انرژی جنبشی آنها
- تخلیه آلودگی بخارات فلزی و ذرات معلق

پارامتر های فرآیند عبارتند از:

- چگالی و خواص گرمایی قطعه (شکل گرمایی مخصوص، هدایت الکتریکی و نقطه ذوب)
- ولتاژ شتاب دهنده
- جریان اشعه الکتریکی
- انرژی پالس
- فرکانس پالس
- قطر منطقه اثر
- سرعت حرکت قطعه

میتوان از رابطه زیر برای محاسبه سرعت حرکت قطعه استفاده کرد.

t_1 : ضخامت ورق (m)

d_f : قطر دایره فوکوس اشعه (m)

C_d : ضریب نفوذ حرارتی (m^2/s)

θ_m : دمای ذوب قطعه ($^{\circ}C$)

P_e : توان پرتو الکترونی $(\frac{N.m}{s})$

K_t : هدایت الکتریکی $(\frac{N}{s^{\circ}C})$

ρ : چگالی جنس قطعه $(\frac{Kg}{m^3})$

پارامتر مشخص کننده کارایی EBM نرخ برداشت حجمی ماده است که حداکثر به مقدار $(0.1 \text{ Cm}^3/\text{min})$ می رسد. با افزایش انرژی پالس (شدت توان) نرخ برداشت حجمی ماده افزایش می یابد.

۱۰. ماشین کاری لیزر (Laser Beam Machining – LBM)

پس از عصر الکتروسیسته، عصر فوتون آغاز شد. از اوایل دهه ۱۹۶۰ فوتون های بی بار به جای الکترون هایی حامل بار منفی جایگزین شده اند و به عنوان ابزاری دلیزیر در صنعت به کار رفته اند. امروزه لیزر در همه بخشی هایی زندگی مدرن ارتباطات تا جراحی چشم و ماشین کاری کاربرد دارد. کاربرد هتی اولیه در جوش کاری در دهه ۱۹۷۰ شروع شد. سپس از دهه ۱۹۸۰ LBM به سرعت پیشرفت خود را آغاز کرد. Laser مخفف کلمه Light amplification by stimulated Emission of Radiation است.

به معنی «تقویت نور با نشر تحریک شده تابش» می باشد. در واقع یک پرتو تک رنگ و هم فاز نور در بازه مرئی یا نامرئی است. LBM یک روش بسیار کارا برای ماشین کاری انواع مواد مستقل از خواص فیزیکی و مکانیکی آنها است. برای برش مواد سخت و نرم بسیاری کاربرد دارد. از قبیل فولادها، آلیاژهای ریخته گری، سرامیک ها، تنگستن، تیتانیوم، نیکل، CBN، الماس، پلاستیک ها، پارچه، آلومینا، چرم، چوب، کاغذ، لاستیک، حتی شیشه به شرطی که سطح آن با مواد جاذب تابش نظیر کربن پوشش داده شود. به هر حال ماشینکاری موادی نظیر AL, CU, Ag, Au به سبب رسانایی بالا و بازتاب نور در دسر ساز است. اما لیزرهای YAG پیشرفته با تقویت قابلیت فوکوس، پس از عملیات سطحی نظیر اکسیداسیون یا افزایش زبری این مواد، قابلیت برش آنها را دارند.

لیزر در صنایع ظریف نظیر ساخت ساعت و همینطور در صنایع سنگین فلزکاری قابل استفاده است. رمز این کاربردهای وسیع در امکان تنظیم توان لیزر به مقدار مورد نیاز می باشد. می توان توانی در حدود 10^{12} W/min^2 بدون هیچ مشکلی با اشعه لیزری به قطعه اعمال کرد.

می توان بلوک سیلندر خودرو را از آلومینیوم ساخته و یک لایه نازک داخل سیلندر را توسط ماشین لیزر سخت کرد. بدین ترتیب از وزن موتور به مقدار قابل ملاحظه ای کاسته می شود. مزیت قابل توجه لیزر به ماشین کاری با اشعه الکترونی عدم نیاز به ایجاد خلاء در محیط ماشین کاری می باشد چرا که لیزر از مواد ترنسپرنت (شفاف) عبور می کند (مثل هوا، گاز، خلاء یا حتی گاهی مایعات).

یک محدودیت عمده سوراخ کاری لیزری این است که ایجاد سوراخ های گرد و مستقیم نمیکند، و برای حل این مشکل می توان از چرخش قطعه در حین سوراخ کاری استفاده کرد. مخروطی با زاویه (تانژانت) حدود ۱/۲۰ به وجود می آید. همینطور لیزر باعث به وجود آمدن منطقه HAZ شده و سطوح عملیات حرارتی شده را نیز تحت تاثیر قرار می دهد.

سرمایه اولیه بالا و راندمان پایین (در حدود ۱٪) مانع استفاده از لیزر به عنوان رقیبی برای ماشین کاری سنتی می شود. حتماً باید موارد احتیاطی در حین ماشین کاری رعایت شود. حتی لیزر های کم توان در حد 1w به

آسانی به سیستم بینایی آسیب می رسانند. در حین کار کردن با لیزر باید از عینکهای محافظ مخصوص استفاده شده و افراد متفرقه از محوطه ماشین کاری خارج باشند.

مزایا و محدودیتها

مزایایی لیزر از قرار زیر است:

۱. بازه وسیعی از انواع مواد فلزی و غیر فلزی قابل ماشین کاری با لیزر است.
۲. به دلیل عدم تماس مکانیکی، تغییر شکل در قطعه نداریم و همینطور بحث سایش ابزار مطرح نیست.
۳. کلمپ قطعه به سهولت انجام می پذیرد.
۴. اشعه لیزری را می توان به تنهایی یا با جدا سازی چند قطعه به طور همزمان استفاده کرد.
۵. امکان دسترسی به بخشهایی داخلی که به ماشین کاری سنتی میسر نیست، در این روش وجود دارد.
۶. امکان ایجاد سوراخهای بسیار ریز در مواردی که قابلیت ماشین کاری پایینی دارند.
۷. به راحتی می توان خصوصیات اشعه را کنترل کرد تا قابل استفاده در شرایط خاص ماشین کاری باشد.
۸. نیازی به ایجاد خلاء (که بسیار زمان گیر است) بر خلاف EBM نیست.
۹. می توان سوراخ هایی با زاویه نسبت به سطح (مثلاً 10° ایجاد کرد).
۱۰. اتوماسیون فرایند به راحتی انجام میشود.
۱۱. هزینه فرآیند بسیار پایین است.
۱۲. در مقایسه با بسیاری از روشهایی NTMP حرارتی HAZ در لیزر کوچکتر است.

موارد زیر از جمله محدودیت های ماشینکاری با لیزر است:

۱. سرمایه گذاری اولیه برای تجهیزات بالا است.
۲. فرآیند خطرناک است.
۳. سوراخهای کور با عمق دقیق به سختی قابل دستیابی است.
۴. لیزر ایجاد سوراخهای مخروطی می کند.
۵. سوراخهای ایجاد شده، دقت هندسی و ابعادی محدودی دارند و کیفیت سطح آنها پایین است.
۶. امکان حذف HAZ وجود ندارد.
۷. راندمان فرآیند پایین است و به عنوان روشی برای خروج عمده ماده از قطعه کار در نظر گرفته نمی شود.
۸. در سوراخ کاری ضخامت نمی تواند بیش از ۵۰ میلی متر باشد.

انواع لیزر

لیزر یک شعاع با چگالی با توان بالاست که به سطح قطعه فوکوس می شود. بسته به طول موج، شعاع لیزر وارد تعامل از نوع پیرولیتی (حرارتی) یا فتولیتی با قطعه کار می شود.

در لیزر پیرولیتی خروج ماده از طریق ذوب و تبخیر همزمان ماده انجام می‌شود. این لیزر بیشتر در کاربردهایی نظیر برش، سوراخکاری، جوشکاری و سخت‌کاری سطحی استفاده می‌شود.

نرخ خروج ماده وابسته به قطعه کار و ضخامت آن و خواص فیزیکی و اپتیک آن نظیر ظرفیت گرمایی، گرمای نهان ذوب و تبخیر، و بازتاب سطحی می‌باشد. قابلیت ماشین کاری مواد با کاهش عوامل ذکر شده، افزایش می‌یابد. عامل مهم دیگر در نرخ بار برداری خصوصیات اشعه مخصوصاً چگالی توان است.

در لیزرهای فوتولیتیک، ماده به شکل حرارتی خارج نمی‌شود، بلکه تابش لیزر باعث تضعیف و شکست پیوند شیمیایی بین مولکول‌های ماده می‌شود (زمانی که انرژی پیوند از انرژی فوتون کمتر باشد). انرژی فوتون در اشعه به طور معکوس وابسته به طول موج می‌باشد، به عنوان مثال لیزر فلئورین اشعه با طول موج بسیار کوتاه $\lambda = 157 \text{ nm}$ است، بنابراین فوتون دارای انرژی بالای 7.43 eV ($1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$) می‌باشد. در مقابل لیزر CO_2 یک لیزر مادون قرمز است که طول موج ($\lambda = 10600 \text{ nm}$) دارد و انرژی فوتون آن پایین 0.12 eV می‌باشد. بنابراین با لیزر فلئورین می‌توان برخی پلاستیک‌ها و تفلون‌ها را به شکل فوتولیتیک ماشین کاری کرد، چرا که انرژی فوتون آن بیش از انرژی پیوند مولکولی در این مواد است. در خروج ماده به شکل فوتولیتیک سه مرحله ضروری است.

۱. فوتون‌های با طول موج کوتاه بر روی سطح ماده جذب می‌شود.
۲. پیوند شیمیایی بین مولکول‌ها گسسته می‌شود.
۳. مواد حاصل به صورت محصولات گازی ناشی از واکنش یا ذرات ریز از محل خارج می‌شود.

لیزرهای صنعتی. عموماً لیزرهای صنعتی از انواع لیزرهای حالت جامد نظیر نئودیمیم:یتریوم آلومنیوم گارنت (لعل) (Nd:YAG)، نئودیمیم:شیشه (Nd:Glass) و یاقوت، و لیزرهای CO_2 ، Excimer، He/Ne هستند. در صنایع فلزی از چهار نوع CO_2 ، Nd:YAG ، Nd:Glass و Excimer استفاده می‌شود.

و از بین اینها CO_2 و YAG کاربرد بیشتری دارند.

در اکثر مواقع از یک موقع از یک لیزر می‌توان برای کاربردهای برش، جوشکاری و ماشین‌کاری و عملیات سطحی استفاده کرد. فقط کافی است خصوصیات اشعه لیزر تغییر داد نظیر چگالی توان، قطر همگرایی و زمان پالس. در ادامه به طور خلاصه لیزرهای صنعتی توضیح داده میشود:

لیزر CO_2 :

در این نوع لیزرها ماده فعال گاز CO_2 است. به هر حال ترکیبی از گاز ($\text{CO}_2 : \text{N}_2 : \text{He} = 0.8 : 1.7$) استفاده می‌شود. هلیوم نقش خنک کننده، محفظه گاز را دارد. لیزرهای CO_2 دارای زول موج بالایی

هستند. (10600 nm) بار برداری در اثر واکنش حرارتی با قطعه صورت می گیرد. این لیزرها نسبت عمق به قطر بالاتری نسبت به انواع دیگر به دست می دهند. لیزرهای CO₂ در دو نوع «جریان محوری CO₂» و «جریان جانبی CO₂» هستند. نوع اول امکان تابش پالسی و پیوسته را می دهد. نوع دوم فقط تابش پیوسته با انرژی بالا را میسر می سازد.

لیزر Nd:YAG

این نوع لیزرها از یک تک کریستال YAG به همراه ۱٪ نئودیوم به عنوان ماده تقویت کننده نور تشکیل شده اند. این لیزر جمع و جور و اقتصادی است، طول موج آن ($\lambda = 1060nm$) است و امکان کاربرد پالسی و پیوسته را دارد. راندمان نسبتاً بالایی دارد و امکان فرکانس پالس بالایی را نیز می دهد.

لیزر Nd:Glass

این نوع از یک میله شیشه ای با ۲~۶٪ نئودیوم است و همان طول موج Nd:YAG را دارد. صرفاً امکان کاربرد در حالت پالسی را دارد و فرکانس پالسی پایینی دارد (۲ تا ۶ پالس بر ثانیه). بیشتر برای سوراخ کاری و جوشکاری استفاده می شود.

لیزر Excimer

از انواع لیزرهای پالسی می باشند که در محدود نور ماوراء بنفش UV فعالیت می کنند. Excimer مخفف ترکیب Excited dimmer است. اشعه از جرقه الکتریکی در یک مخلوط گازی پر فشار که یکی از انواع هالوژن ها نظیر F و Cl و دیگری از گروه های خنثی نظیر Ar, Xe, Kr می باشد، ایجاد می شود. طول موج این نوع لیزرها ۳۵۱ تا ۱۵۷ نانومتر بسته به ترکیب دو گانه گازها می باشد. خروجی توان این نوع لیزرها کم است و به همین دلیل بیشتر به صورت فوتولیتیک بر ماده اثر می کنند. در ماشین کاری پلاستیک ها کارایی قابل ملاحظه ای دارند.

انواع فرآیند LBM :

۱. سوراخ کاری (Drilling):

الف- پراکشن (سوراخ های ریز و دقیق) بیشتر روش پالسی و با Nd:YAG

ب- تریپنیک (trepanning) سوراخ های نسبتاً بزرگ توسط CO₂ و Nd:YAG به دو روش پالسی و پیوسته (نیاز به سوراخ ریز اولیه دارد)

۲. برش (Cutting):

در حالت پالسی یا پیوسته بیشتر با CO₂ اما با Nd:YAG هم می‌شود.

۳. مارکینگ (Marking):

از دو روش پالسی یا پیوسته با لیزرهای CO₂ اما Nd:YAG هم می‌شود.

۴. برش لیزر با کمک گاز:

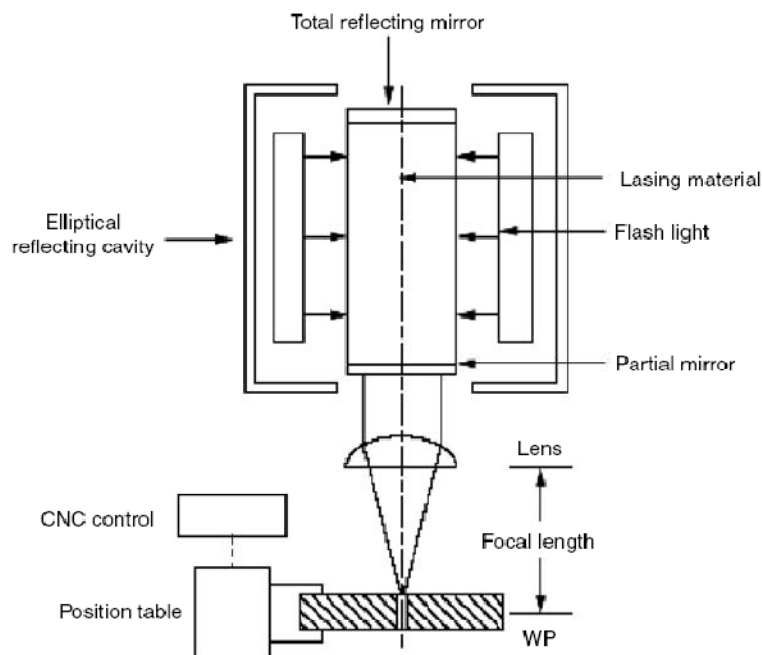
در این روش یک نازل جت گاز (هوا، O₂، N₂، Ar یا He) هم محور با اشعه لیزر به قطعه اعمال می‌شود. گاز سه نوع کمک به فرآیند می‌کند.

الف- خروج بهتر مواد مذاب و بخارات فلزی از محل

ب- (در صورت استفاده از O₂) امکان اکسیداسیون موقعیت ماشینکاری و در نتیجه کاهش بازتاب و جذب بیشتر انرژی لیزر

ج- (در صورت استفاده از O₂) فراهم آوردن محیط مناسب برای واکنش های گرما زار در نتیجه تامین ۸۰٪ انرژی لازم برای فرآیند از همین طریق و نهایتاً افزایش کارایی برش.

برای فولادها و بیشتر فلزات از O₂ استفاده می‌شود. هنگامی که سطحی عاری از اکسید مورد نیاز باشد، از گازهای خنثی استفاده می‌شود. همینطور گازهای خنثی قابلیت جوشکاری را هم افزایش می‌دهند.



شکل ۱۰-۱. شمای فرآیند و تجهیزات مورد استفاده در ماشینکاری به وسیله لیزر

تجهیزات:

تجهیزات LBM متشکل است از ماده Lasing، سیستم بازتابی، لنز همگرا کننده و منبع نوری. ماده Lasing می تواند گاز یا جامد باشد. سیستم بازتاب کننده ای شامل یک تمام آینه در بالا و یک نیم آینه در پایین در خروجی لیزر است که پس از رسیدن به مقدار انرژی کافی نور را از خود عبور می دهد. لنز یا عدسی نور را بر سطح قطعه متمرکز میکند و با حرکت قطعه شکل مورد نیاز آن ایجاد می شود (شکل ۱۰-۱).