

~~XXXXXXXXXX~~
ساخت و تولید
هنری عبدالهی
۸۱۵۲۰۲۵۲

۱

بسمه تعالی

درس تولید مخصوص
روش های پیشرفته ماشینکاری

دکتر مرتضی صادق عمل نیک

دانشگاه تبریز
دانشکده فنی - گروه مهندسی ساخت و تولید
ترم پائیز ۱۳۸۰

روش های پیشرفته ماشینکاری

انواع روش های تولید مخصوص

روش های تولید مخصوص جهت ماشینکاری یا براره براری

EC Machines (ECM) electro chemical machining روش الکتروشیمیایی

- Diesinking
- Grinding
- Drilling
- Honing
- Deburring

ED Machines (EDM) electro Discharge Machining روش ماشینکاری با برق

- Diesinking
- Grinding

ECS Machines (ECSM) electro chemical spark machining روش ماشینکاری با جرقه الکتریکی

Laser Beam machines (LBM) روش ماشینکاری با اشعه لیزر

Electron Beam machines (EBM) روش ماشینکاری با اشعه الکترونی (کاتدی)

Ion Beam Machines (IBM) روش ماشینکاری با اشعه یون

ULTRASONIC Machines (USM) روش ماشینکاری با امواج فراصوت

Plasma Beam machines (PBM) روش ماشینکاری با اشعه پلاسما

Water Jet Machining (WJM) روش ماشینکاری با جت آب

Abrasive water Jet Machining (AWJM) روش ماشینکاری با جت آب و برار ساینده

Chemical machining روش ماشینکاری با شیمیایی

electro chemical machining

Electro Discharge machining

جیمز اسمیتس (James Nasmyth) مخترع اولین ماشین ابزار است. ماشین انزاری برای صاف تراشی Shaping یا صاف تراشی دروازه ای Planing است که در شکل (۱-۲b) نشان داده شده است. با این وسیله توسط یک ابزار برشی می توان قطعه ای که معلم روی میز دستگاه بسته شده به میزان مورد نظر سطح آنرا صاف تراشی نمود و روی آن شیری ایجاد نمود. با ماشین ابزارهای مدرن از همین نوع می توان سطح صاف با زاویه دار را با یک ابزار برشی ماشین نمود و روی قطعه شکل های T. شکل T-slot ایجاد نمود و یا در اهداف قطعه بسیاری ایجاد نمود.

جیمز اسمیتس همین مخترع ماشین بنابر فورجینگ جهت آخذاری قطعات سنگین می باشد. سومین ماشین ابزار دریل است که (بوسیله ابزار منته) می توان در قطعه کار سوراخ های ایجاد نمود. شکل (۱-۴) این وسیله را نشان میدهد.

چهارمین ماشین ابزار، ماشین فرز است که توسط ولایت ف Whitney در سال ۱۸۱۸ میلادی ابداع شد. در این فرایند با برداشتن تراشه از قطعه کاری که در جهت عمود بر محور چرخش به سمت ابزار تراش چرخان تغذیه می شود، به تدریج سطح جدیدی ایجاد می گردد. در بعضی از ماشین ها قطعه کار ثابت است و ابزار تراش به سمت آن تغذیه می شود. در این فرایند ابزار چند لبه استفاده می شود. بنابراین نرخ بار برداری بالا می باشد. غالباً سطح مورد نظر با یک نا عبور کار با تیغه ایجاد می گردد و سطح پرداخت فرس ایجاد می نماید. اولین ماشین فرز بود در سال ۱۸۶۲ توسط ج. ر. براون J. R. Brown به بازار عرضه شد.

در شکل (۱-۵) یک نمونه از عملیات فرزکاری نشان داده شده است. یحیی بن ماشین ابزار در اواخر قرن ۱۹ به بازار عرضه شد و آن ماشین رنگ زنی است که در شکل (۱-۶) نشان داده شده است. تشکیل تراشه به وسیله لبه ای برنده ذرات یا دانه های ساینده چرخ دور است که دور می زند. با این فرایند می توان با برداشتن مقدار بسیار کمی براده از سطح فرس، نرمترین و صاف ترین سطح را ایجاد نمود و از دیدن آن لپینگ (Lapping) یا صیقل کاری می باشد. در صیقل کاری پرداخت ماشین سطح به وسیله دانه های ساینده که در سطح یک ماده نرم (کدر چرخ صیقل) مخلوط در ارت انجام می شود. دانه های ساینده مقدار کمی

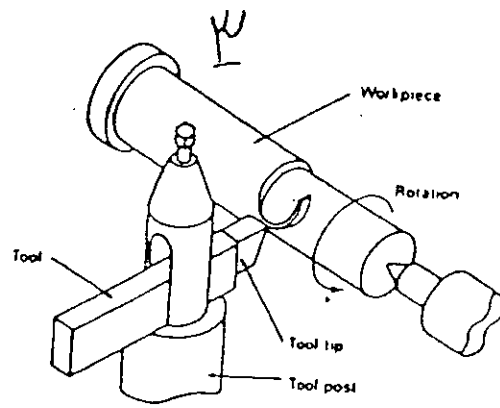
دانشگاه تهران - ریس الکترولیتیک (ECM)

دانشگاه تهران از طریق الکترولیتیک کیت از روش حایب سفید است که مواد را
اتم به اتم از سطح قطعه کار جدا می کنند. ECM یک فرایند الکترولیتی می باشد که مواد از سطح
قطعه کار بر روی حلال شدن الکترولیتیک جدا می شوند. قطعه کار معمولاً به قطب مثبت و ابزار به قطب منفی
در این سیستم وصل می شود.

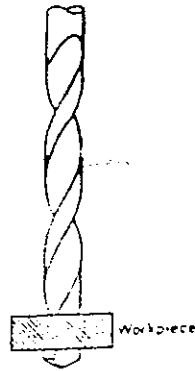
گوسف Gusseff در سال ۱۹۲۹ برای اولین بار این فرایند را شبیه زنی و ابداع نمود
اما اولین توسعه و صنعت آن در سال ۱۹۵۰ شروع شده. زمانی که تلاش می شد با استفاده از
فرایند ECM آلیاژهای سخت و مقاوم در برابر فرسایش را شکل بدهند، و دانشمندی نامیده امروزه از
فرایند ECM در صنایع مختلف در خودروسازی، صنایع دریایی، فضایی، پزشکی و غیره استفاده
می شود.

الکترو لیتیک فرایند شیمیایی است که در ECM انجام می آید، لیکن مثال و آن جدا کردن
الکترو لیتیک بین دو حایب (فلز که در یک محلول الکترولیت غوطه وراند برقرار شود) الکترولیتیک (۱۲۴)
تشکیل می شود. از الکترولیت جهت پرورش دادن فلزات استفاده می شود. فلزی را که می خواهند
پرورش دهند یا کبکری نمایند به قطب منفی و فلزی را که از جنس پرورش مورد نظر می باشد به قطب
مثبت وصل الکتریکی می کنند. چگالی (دانسیته) جریان الکتریکی در حدود 2 A/cm^2 آمپر
در سطح متر مربع برقرار می کنند. ضخامت پرورش به ندرت ۲ میلی از $10 \mu\text{m}$ میکرو متر خواهد رسید.
از عمل حل شدن فلز که به قطب مثبت (آند) متصل است در برداشت الکترولیت (electropolishing) استفاده
می شود.

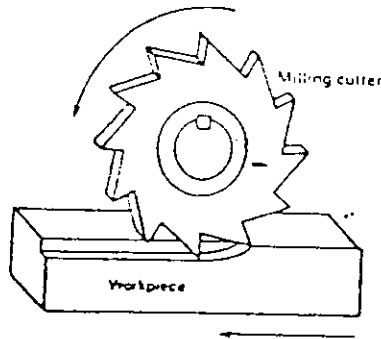
رزیشن (۲-۲) یک روش برداشت کار الکتریکی نشان داده شده است. همانقدر که در شکل دیده
می شود قطعه ای که بایه برداشت شود به قطب مثبت (آند) در سلول الکترولیت وصل می شود. وقتی
جریان الکتریکی برقرار می شود تا زمانی که سطح قطعه از قطعه جدا و در محلول حل می شود و سطح قطعه
صاف و برداشت خواهد شد. چگالی جریان مورد استفاده در برداشت کاری حدود 1 A/cm^2 آمپر
تا 10 A/cm^2 است و میزان بار برداری از سطح نامحلول قطعه حدود $10 \mu\text{m}$ میکرو متر می باشد. در این روش
قطعه کار در وضعیت آند درون الکترولیت قرار می دهند و برای تکمیل مدار برقی یک کاتد در آنجا قرار می دهند.
نسبت عمل آبکاری شکلون تقاطع نامحلول در چشمه روی قطعه کنده و در نتیجه سطح بسیار صاف و متعین ایجاد
می شود. از این فرایند جهت ایجاد سطح آینه ای (بسیار در می شود. در این فرایند در آماده سازی نمونه های فلزی در
میتیل کاری قطعات و درته های فولاد زینت و قطعاتی که در دشواری جلاکاری می شوند استفاده می شود.



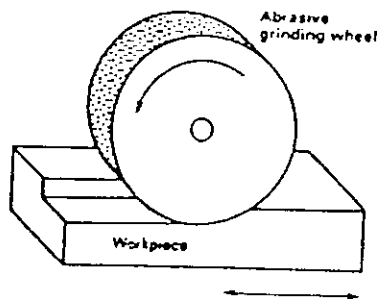
شکل (۱-۳) یک عدول تراشکاری



شکل (۱-۴) عمل دریل کاری با سته

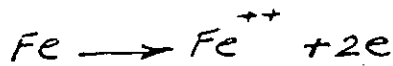


شکل (۱-۵) عمل فرزکاری (فلس نشان دهنده جهت حرکت می باشد)

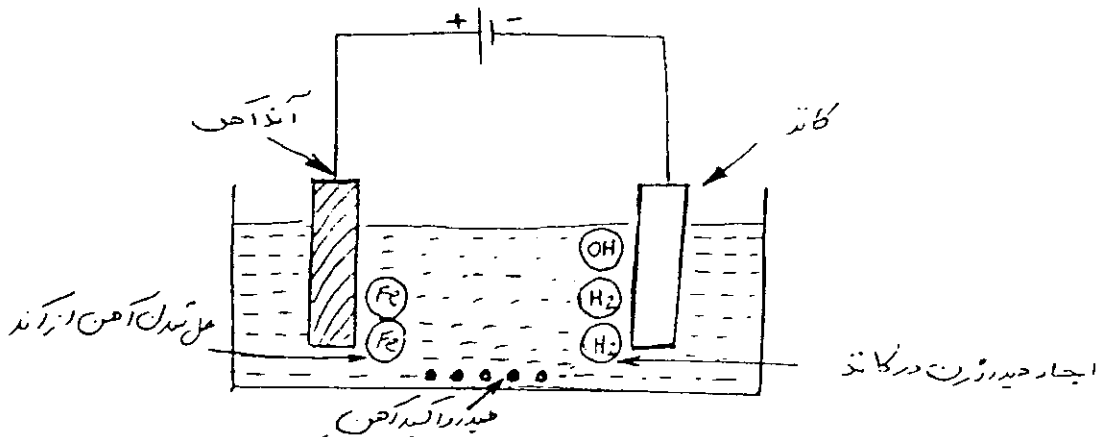
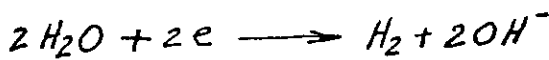


شکل (۱-۶) عمل سنگ زنی (فلس نشان دهنده جهت حرکت)

در این روش ECM مانند پرداخت کاری الکترولیتی، فرایند حل شدن قطعه کاری به قطب مثبت (آند) وصل شده در مقابل الکترولیت می باشد. در این فرایند چندین عکس العمل می تواند اتفاق بیفتد. معنای مثال در شکل (۲-۳) عکس العمل آند حل شدن آهن (Iron) در الکترولیت معبر است

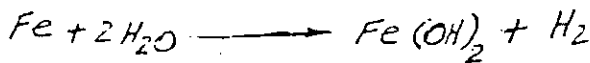


در کاتد، عکس العمل معبر است ایجاد گاز هیدروژن H_2 و یون های (OH) هیدروکسید hydroxy می باشد.

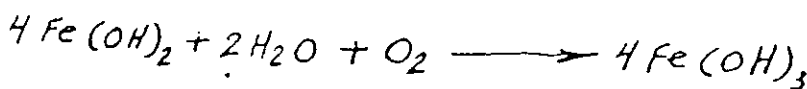


شکل (۲-۳) عکس العمل و اتفاقات دو الکترود در محلول الکترولیت در ECM

نتیجه عکس العمل های الکتروشیمیایی این است که یون های فلزی (آهن) با یون های هیدروکسید hydroxy ترکیب می شود و هیدروکسید فلزی را بصورت زیر بصورتی آورد.



حقیقت هیدروکسید فلزی ممکن است به آب و اکسیژن ترکیب شود و نتواند هیدروکسید فلزی نماید



در دو الکترود (آند و کاتد) عکس العمل دیگری اتفاق نمی افتد.

کاربرد و شمار تولید مخصوص در مقایسه با روش سنتی

- ۱- افزایش بهره‌وری (Productivity) از طریق
الف: کاهش تعداد عملیات لازم برای تولید یک قطعه
ب: انضمام سریع ترکیب عمل معین نسبت به روش سنتی
- ۲- افزایش کیفیت تولید به دلیل
الف: شکل هندسی قطعه
ب: کاهش اثرات منفرجه بر ضامن قطعه کار در طول زمان ماشینکاری
ج: تقویت بعضی اثرات مفید در قطعه کار
- ۳- کاهش تعداد قطعات تولیدی در سنده لازم نظیر کیفیت
- ۴- افزایش قابلیت تکرار

افزایش بهره‌وری
 افزایش کیفیت تولید
 کاهش تعداد قطعات در سنده
 افزایش قابلیت تکرار

حائضه و علل کاربرد فرآیندهای تولید مخصوص

در سه ده گذشته به علت افزایش رقابت‌های بین‌المللی و تقاضای مشتری تحولات بسیار وسیعی در تکنولوژی‌های جدید طراحی و ساخت پیش‌آوردن و این تغییرات در سطح همین بالایی مطرح شده و با سرعت بیشتری در آن‌ها ادامه خواهد یافت. صحبتان صنعت لیت رقیب مجبورند خود را با اهداف و اصول زیر مجزایانند:

- ۱- بالا بردن کیفیت محصولات (بالا بردن کیفیت و دقت در شکل‌دهی، طراحی و سطح ماشینکاری و نیز نظم)
 - ۲- کاهش هزینه‌های ساخت (کاهش هزینه‌های قالب، تولید و نصب ابزار، آماده‌سازی ماشین و تنظیم قطعه و نیز کاهش هزینه‌های
 - ۳- کوتاه کردن طول مدت طراحی و ساخت (با استفاده از تکنولوژی‌های CAM, CAD, CIM و نیز روش‌های
 - ۴- دادن پاسخ فله‌ای و دردت به تغییرات تکنولوژیکی و بازار جهانی
 - ۵- بالا بردن سرعت تولید (تولید کوتاه کردن زمان لازم جهت تهیه نقشه، ساخت قالب و تولید و نیز
- تهیه ابزار و تنظیم و آماده‌سازی ماشین، تنظیم قطعه کار و زمان ماشینکاری می‌باشد. معنای مذکور کار یکبار بر هر قطعه تولیدی است به انضمام می‌شود)

رنگر دو معادله $V = IR$ و $R = \frac{h\rho}{A}$ را با هم ترکیب کنیم، رابطه زیر بین

مدول چگالی جریان J و پتانسیل V در سطح مورد نظر جهت ماسینگاری A افت ولت V و پتانسیل V نامیده بین دو الکترود $h(\text{Gap})$ در هدایت الکترولیت K بدست می آید.

$$J = \frac{I}{A} = \frac{K_e V}{h}$$

در ECM غالباً از چگالی جریان بین $0.05 - 10 \text{ A/cm}^2$ آمپر در سانتی متر مربع استفاده می کنند، اما بیشتر از 5.0 A/cm^2 استفاده می شود. همچنین در عمل غالباً از ولتاژی بین 10 تا 20.7 V استفاده

می شود. اگر هدایت الکترولیت $K_e = 0.2 \text{ cm}^{-1}$ اهم در سانتی متر و افت ولت $V = 10.7$ ولت

و چگالی جریان مورد استفاده $J = 5.0 \text{ A/cm}^2$ باشد فاصله بین دو الکترود $h = 0.4 \text{ mm}$.

میلی متر می شود. جهت ماسینگاری دقیق قطع لازم است اندازه دقیق فاصله بین دو الکترود اندازه مشخص و قویاً ثابت باشد. این فاصله توسط حرکت مکانیکی یک الکتروود مثلاً کاتد در جهت الکتروود

موجب ثابت نگه داشتن فاصله بین دو الکترود می شود. در صورتی که فاصله بین دو الکترود

0.4 mm میل می کند، میزان پیشروی کاتد حدوداً 0.1 mm/s میسر در زمانه نیازی باشد.

جمع شدن ذرات جدا شده از قطعه در بین فاصله کوچک بین دو الکترود موجب بر خوردن اتصال

کاتد بین دو الکترود خواهد شد. جهت جلوگیری از این مسئله مانع الکترولیت تحت فشار بین دو

الکترود می آید می شود؛ اما مواد جدا شده از قطعه کاتد در الکترولیت را از منطقه ماسینگاری دور می آید.

عبور جریان الکتریسیته از داخل الکترولیت موجب افزایش هدایت الکتریکی و تشکیل گاز هیدروژن

در اطراف کاتد موجب کاهش هدایت الکتریکی الکترولیت می شود. همچنین الکترولیت کاتد

که توسط عبور بین دو الکترود پاشیده می شود موجب افزایش درجه حرارت الکترولیت می شود.

دول داشتن یک نیزم کنترل درجه حرارت موجب می شود که درجه حرارت الکترولیت در فاصله بین

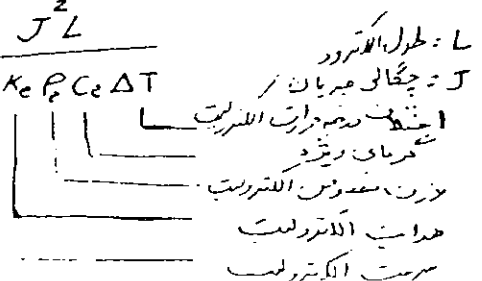
دو الکترود بالا نرود و درجه حرارت خود را در اثر عبور جریان الکتریکی از داخل الکترولیت درجه

حرارت الکترولیت به اندازه ΔT بالا رود و طول فاصله بین دو الکترود Δx باشد، با استفاده از

قانون اول دالان نوشت

$$\Delta T = \frac{J^2 \Delta x}{K_e \rho C_e U}$$

$$U = \frac{J^2 L}{K_e \rho C_e \Delta T}$$



۱

بسمه تعالی

درس تولید مخصوص
روش های پیشرفته ماشینکاری

ماشینکاری به روش الکتروشیمیایی Electrochemical Machining

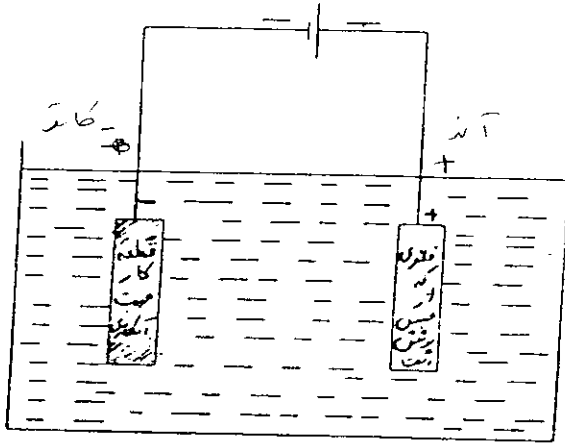
دکتر مرتضی صادق عمل نیک

دانشگاه تبریز
دانشکده فنی - گروه مهندسی ساخت و تولید
ترم پائیز ۱۳۸۰

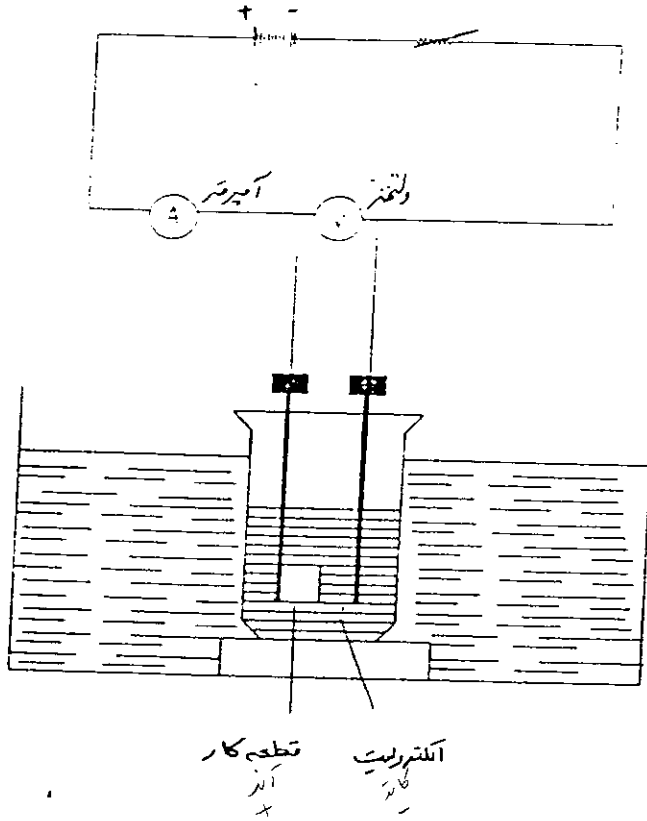
در این فرایند انرژی الکتریکی به همراه عکس العمل شیمیایی سرچشم می شود که مراد از روی قطع کار است به آنم جدا شود و بداخل محلول الکترولیت رفته و از محل بار برای توسط فن الکترولیت دور شود. در این فرایند انفصال بین ابزار و قطعه کار توسط سرومکانیزم کنترل می شود. جدا کردن بار برای زمانی است که فاصله بین دو الکترود کم باشد. تفاوت بین دو الکترود غالباً بین 0.074 mm میلی متر تا 7.6 mm میلی متر است. میزان نرخ براده برداری را از نقطه شروع می توان با استفاده از قانون فاراد $Faraday's$ بدست آورد. میزان بار برداری در این حالت بستگی به پارامترهای زیادی دارد که در شکل () نشان داده شده است. همچنین کلیم پارامترهای سیستم با استفاده از تکنیک (object oriented technique) که در سیستم سیم کشی که توسط اریکسون در انگلستان مطرح شده در شکل () آورده شده است. همانطور که نشان داده شده است میزان بار برداری بستگی به پارامترهایی مانند

- σ - دانسیته جریان یا چگالی جریان
- κ - هدایت الکترولیت (هدایت الکترولیت)
- v - ولتاژ کاری
- شکل الکترود
- h - فاصله بین دو الکترود. Distance between two electrodes.

سرعت متعادل و ثابت تغذیه ابزار به طرف قطعه کار متناسب با پارامترهای فوق الذکر و نرخ بار برداری فلز (metal removal rate) قطعه کاری باشد. در چنین فرایندی می توان سخت ترس و سخت تروی آلیاژها و فلزات را با اشکال پیچیده مانند نرم ترین فلزات و آلیاژها ماشینکاری نمود. و همان سطح بسیار خوبی بدست آورد.



شکل (۲-۱) سلول الکترولیتیک که بر اساس دسی (آکسجی)



شکل (۲-۲) سلول الکترولیتیک جهت برافش و پهن‌سازی

عناصر اصلی فرایند ماشینکاری از طریق الکترولیت عبارتند از:

- ۱- مقطع کار
- ۲- سیستم جریان و کنترل الکترولیت
- ۳- الکتروود ابزار
- ۴- انتقال هذرات
- ۵- پارامترهای ماشین

مقطع کار

مبدأ اساسی قانون کاراده، فرایند ECM، میزان بار برداری نسبت مستقیم به جریان الکتریکی که از ابزار الکترولیت مقطع کار عبور میکند، و میزان اتسی مقطع کار و طول زمان ماشینکاری دارد. همچنین نسبت معکوس با تعداد الکتروودالانس محلول در مین (Z) و ناست کاراده (f) دارد.

سیستم جریان و کنترل الکترولیت

فرایند ماشینکاری ECM، میزان بار برداری رابطه مستقیم با نوع الکترولیت، غلظت (Concentration) و درجه حرارت الکترولیت در سرجع یا شش بین دو الکترود دارد. الکترولیت حتماً باید قبل از پیمایش از ویالتهر عبور کرده و براده های جدا شده از قطع خیزب میلتر شود. همچنین جهت کنترل حرارت الکتریکی درجه حرارت الکترولیت باید دقیقاً کنترل شود. اختلاف درجه حرارت دو الکترود (ابزار و مقطع کار) و الکترولیت و انتقال حرارتی که ایجاد می شود روی هدایت الکتریکی و نیزه الکترولیت σ specific conductivity اثر منفی دارد. سیستم جریان و کنترل الکترولیت شامل پارامترهای مانند پدپایز (توسط پمپ)، فشار (نشت) و دردی (تولید الکترولیت) و فشار الکترولیت در سرجع برکت به تانک (outlet)، نرخ جریان الکترولیت flow rate، حرارت و

درجه حرارت الکترولیت، کنترل فشار است هد کردن هیدروکسید Hydroxide از رفتن

در ماشینکاری از طریق ECM جهت رسیدن به نتایج مشخص مواد اضافی به الکترولیت اضافه می نمایند که به آن additives می گویند. استفاده از این مواد اضافی و کار برد آن در زیر مشخص شده است

جهت ترک کردن کامل مقطع کار از مواد surface-active agents (استفاده می شود)

جهت صاف شدن سطح بهتر و مبراق تر از مواد surface finish improver

جهت محدود کردن ذرات فلزهای غیر فلزی Passiv Film در سرجع الکتریکی از بعضی قطعات از مواد Activator

جهت نابود کردن مسلول الکترولیت از مواد special agents استفاده می شود

در این مرحله دو مسئله را می‌توان بررسی نمود:

۱. پرونده آند از ظرفیت الکتروشیمیایی تشکیل شده است، میزان حل شدن (یا استینکاری شدن) فلز مبتنی بر قانون الکترولیز فاراده (Faraday's Law of electrolysis)، وزن اتمی فلز (A)

الکترووالانس (Z) (تعداد الکترون‌های آزاد در آخرین مدار)، میزان عبور جریان الکتریکی (I) و

طول مدت زمان عبور جریان الکتریکی (t). سختی یا سبکی مقطع تاثیر در نرخ باربرای

در استینکاری مقطع ندارد. (فقط وزن فارادی) $m = E I t$ $E = \frac{A}{Z F}$ $m = \frac{A I t}{Z F}$ میزان باربرای

۲. نسبت آنده گاز هیدروژن در اطراف کاتد جمع می‌شود، شکل کاتد در طول استینکاری تغییر نمی‌کند

با استفاده از دو مسئله فوق و قانون فاراده، اگر m وزن فلز حل شده در الکترولیز باشد

$$m = V \rho_a$$

وزن مخصوص فلز
حجم مواد حل شده در الکترولیز

$$m = \frac{A I t}{Z F}$$

(نرخ) میزان حجم مواد حل شده از مقطع کار فلزی (V) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V = \frac{A I}{Z F \rho_a}$$

در ECM پارامترهایی مانند چگالی جریان، هدایت الکترولیت و فاصله بین دو الکترود (gap) و اندازه فلز مهم می‌باشند. بر اساس قانون اهم، جریان الکتریکی I که از هادی عبور می‌کند رابطه مستقیم با ولتاژ و برعکس رابطه دارد

$$V = I R$$

مقاومت هادی

در ECM، الکترولیت هادی الکتریکی می‌باشد و مقومت آن ممکن است به صدها اهم برسد.

مقاومت یک هادی R رابطه مستقیم با طول هادی h و رابطه معکوس با سطح مقطع هادی A دارد.

$$R = \frac{h \rho}{A} \quad \rho = \frac{1}{\sigma} \quad \rho = \frac{1}{\sigma} \quad R = \rho \frac{h}{A}$$

پ = ثابت نسبی یا تقابلی ویژه می‌باشد (Specific Resistance) $\rho = \frac{1}{\sigma}$
اگر هادی یک تکعب به ضلع ۱۰ میلی‌متر باشد $R = \rho \frac{h}{A}$

طراحی محورها ماشین ECM

حرف از طراحی محورها و ماشین آن درست آوردن الکتریسیته جهت سفت قطعه است
الکترا سوزنیاز جهت سفت شدن، شکل هندسی، انبساط، تقارن و صاف سطح مورد نیاز
قطعه می باشد. استفاده از ماشین ابزار مناسب فنی هم است. ماشین ابزار ECM امروزه در اندازه
و سفت فنی برابر هوا تراشه قطعه کار موجود است. با این اندازه سرعت و بر اساس اندازه قطعه کار افزایش می دهد
- صافی سطح در ECM

در ECM ^{عمل} الکترو لیت اثر متقوس بر صافی سطح قطعه کار دارد. در ماشینکاری ECM سندان صافی
سطح هند $1\mu m$ تا $10\mu m$ می تواند برداشته شود. در پرداخت کاری الکترو لیتی سندان صافی سطحی حدود
 $10\mu m$ تا $100\mu m$ می تواند ایجاد نمود

در ECM سندان تیزی سطح در مسیر جهت عبور جریان الکترو لیت افزایش می دهد. صافی سطح
درخواه با کنترل پارامترهایی مانند چگالی جریان، ترکیب نوع الکترو لیت، و سرعت جریان الکترو لیت
و ابزار مورد استفاده است می آید. در سفت کردن ابزار چرخشی (rotating electrode) در ECM-RE
جریان صافی سطحی بین $6\mu m$ تا $20\mu m$ می تواند برداشته شود.

- دقت ماشینکاری

در ECM دقت ماشینکاری بستگی به پارامترهایی مانند فاصله بین دو الکترود و تغییرات فیزیکی جریان
الکترو لیت (که موجب ایجاد ضراب های گاز و تغییرات فاصله بین دو الکترود) دارد. فاصله سندان
بین دو الکترود (equilibrium gap) بستگی به فاکتورهای مانند هدایت الکترو لیت، (مقدار
تپانسی و گرمای ایجاد شده دارد. عبور جریان الکتریکی از کنار دیواره قطعه در سطح موازی
قطر سوراخ را افزایش میدهد و موجب overcut می شود. با عایق کردن دیواره های ابزار
بوسیله ^{بوسیله} رزین خاص یا پلاستیک رزینی سندان overcut را محدود کرد. میزان overcut را
می توان در حد $0.1\mu m$ تا $0.2\mu m$ میلی متر نیز کمتر از قطر ابزار محدود نمود.
استفاده از ابزار چرخشی در ECM سندان دقت ماشینکاری را افزایش داد و دقت را به
 $0.1\mu m$ تا $0.2\mu m$ رساند و میزان بیخوردی ابزار در قطعه کار را به حد اکثر خود رساند.

تعدادی از نقطه های طراحی ساخته شده بوسیله ECM در مقاله انجمن و به منظور کمک به طراحان و مهندسان
مهندسی ساخت در زمینه ماشین و ابزار مورد نیاز در زمینه ماشین سازی است. همچنین لازم است اندازه قطعه خاص جهت
در انتخاب نام و پس لازم است ماشین و ابزار مورد نیاز در زمینه ماشین سازی است. همچنین لازم است اندازه قطعه خاص
در زمینه ماشین سازی است. همچنین لازم است ماشین و ابزار مورد نیاز در زمینه ماشین سازی است.

در این روش از یک محلول الکترولیت (جهت برآشتن طرز از سطح قطب) ، ابزار (که معمولاً بر قطب منفی وصل است) و قطعه کار که به قطب مثبت وصل است) که در داخل محلول الکترولیت غوطه ور شده در جریان مستقیم مانند شکل (۲-۴) بین قطعه کار و ابزار برقرار می شود. ابزار و قطعه کار خود باید حاد باشد. این فرآیند اصولاً فرآیند آبکاری معکوس است. که در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.

جریان الکترولیت با سرعت بالا از داخل یا اطراف ابزار بین دو الکترود ^(gap) یعنی از می شود تا محلولات ماسین کاری را از محل دور نماید. این مواد (محلول کاری) وارد تانک اول می شود و پس از رسیدن به دینام فیلتر می شود و محلول فیلتر الکترولیت به تانک دوم می رود تا از لحاظ لوله و پمپ بین شکاف در الکترو (gap) پوشیده شود.

در صنعت ECM بهترین الکترولیت NaCl می باشد که ۸۰٪ از آن استفاده می شود. از محلول NaNO₃ نیز ۱۸٪ در صنعت استفاده می شود. از سایر الکترولیت ها نیز در حدود ۰.۲٪ استفاده می شود از آنست که جرمی بین ۸ تا ۴۶۵ آمپر در هر سانتی متر مربع A/cm² در این فرآیند استفاده می شود

در این فرآیند از یک سیستم کنترل کیفیت روی تانک رسانا (مکانیزم) همراه با یک سیستم حفاظت از اتصال کوتاه (این ابزار استفاده می شود) همراه با ماده حاصله بین دو الکترود مقدار مابقی باشد. در نتیجه سس در برابر خوردگی آید از این فرآیند در موارد زیر استفاده می شود:

- نظم را با شکل هندسی پیچیده باشد.
- قطعه دارای گوشه های پیچیده باشد که توان از لحاظ فرآیند سنتی به دست آورد.
- جنس قطعه بسیار سخت باشد که توان آنرا از لحاظ فرآیند سنتی ماشینکاری
- زمانی که صافی سطح خوب نیاز باشد

NaCl
NaNO₃

الکترو ابزار

در فرایند ماشینکاری ECM انتخاب الکترو ابزار نقش مهمی دارد. و معمولاً از فلزات نرمی مانند برنج Brass، برونز Bronze و مس Copper استفاده می شود. ویژگی های مهم الکترو ابزار مانند پارامترهای زیر را با سنج در برنج انتخاب ابزار در نظر گرفت:

electrical resistivity - مقاومت الکتریکی

Elasticity - الاستیسیته

Thermal Conductivity - هدایت گرمایی

Melting Point - نقطه ذوب

spark resistance - مقاومت در برابر جرقه

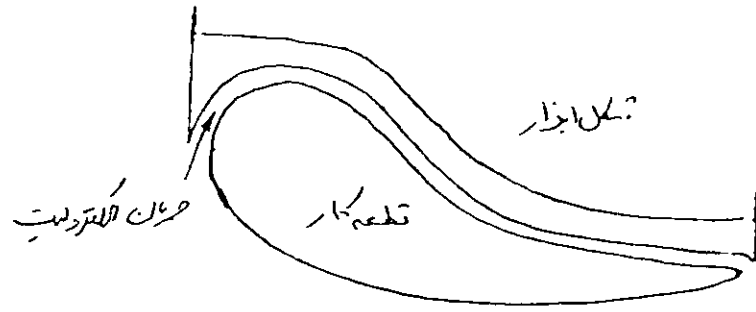
Repairability - قابلیت تعمیر

tool cost - هزینه ابزار

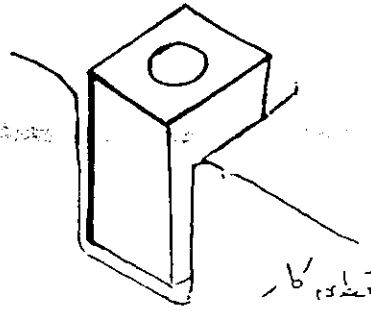
در مکان (۱-۶) سه نمونه از ابزارهای مورد استفاده در ECM نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱-۷ به تعدادی از ابزارهای مورد استفاده اشاره شده است. یکی از مسائل اساسی در فرایند ECM طراحی ابزار است که متوال با استفاده از آن شکل هندسی مورد نظر را در قطعه ایجاد نمود. روش سنتزی جهت طراحی ابزار مورد نیاز با استفاده از روش بعضی از روش های ریاضی مناسب ماشین کاری ها مختلف، شکل مناسب خنثی ابزار را می توان بدست آورد.

البته جهت دست آوردن شکل هندسی ابزار تولیدی ها مختلف دیگری وجود دارند که عبارتند از: که جهت سنجی فرایند ECM از آن استفاده می کنند.

- $\cos \theta$ method
- Analogue method
 - 1) tank analouge method
 - 2) Conducting Paper analouge method
- Complex variable method
- Numerical Method
 - 1) finite difference method (FDM)
 - 2) Finite element method (FEM)



شکل ۱ (۲-۷د) نمونه‌ای از ابزار ECM



شکل (۲-۷ع) نمونه‌ای از ابزار ECM

شکل (۲-۷) نمونه‌ای از ابزار های مختلف در نوایه ECM

نرخ ماشینکاری در ECM نشان به خصوصیت فیزیکی قطعه کار ندارد، بلکه بیشتر به پارامترهای ماشینکاری، ویژگی‌های سیستم‌های الکترود و الکترودها دارد. کلیه پارامترهایی که در میزان ماشینکاری موثر می‌باشند در شکل (۵) نشان داده شده است.

عفت ثابت نه داشتن میزان هدایت الکترودیت، لازم است الکترودیت از فیلتر عبور نماید تا مراد فیلتر آن گرفته شود. سپس توسط روش‌های گرم‌کننده و سردکننده درجه حرارت آن کنترل شود سپس توسط یک پمپ، الکترودیت نمیزی که درجه حرارت آن کنترل شده در داخل تانک نمیزا فشار و سرعت بالا به سمت کب (Gap) با فاصله بین دو الکترود پمپاژ شود.

بمترین عامل میزان تغذیه و نرخ باربراری ^{الکترونیته} جریان است که همان سطح دانه ریز مشخصی از

تفاوت فاراده

تفاوت فاراده یک رابطه ریاضی را بین جریان I (current)، میزان باربراری از قطعه آندی ^{الکترونیته} m و رانندگی

زیرقصر دیت می‌نماید که $m = EIt$ یا $m = \frac{AIt}{Zf}$

$E = \frac{A}{Zf}$

- m میزان باربراری از قطعه آندی
- I همیزات جریان
- t زمان ماشینکاری
- A وزن اتمی قطعه Atomic weight
- Z ااترووالانس Valency

E معادل ااترو شیمیایی ^{میزان آنده شده ااترون} $E = \frac{A}{Zf}$

f ثابت فاراده Faraday's constant $F = 96500 \text{ C}$

حجت اندازه نرخ باربراری از طریق ااترو شیمیایی می‌توان از قانون فاراده استفاده نمود.

درجه سردی الکترولیت را محدود ب ۲۲ تا ۵۲ درجه سانتیگراد نگهدارند.

نرخ جریان الکترولیت (flow rate) معمولاً در حدود ۱۰۰A / ۱۹۱ L/min / ۱۰۰۰ لیتر در دقیقه در ۱۰۰ لیتر است.

سرعت الکترولیت معمولاً بین ۲۵,۴ m/s تا ۵۱ متر در ثانیه است.

تانک الکترولیت به دو قسمت تمیز Clean و کثیف dirty تقسیم می کنند

الکترولیت موقع برداشت از ماشینی اول به سمت تانک کثیف می رود و پس از جدا سازی ناخالصی ها

آن از طرف فیلتر و سائز فیلتر، مواد جدا شده از قطعه از الکترولیت جدا می شود و الکترولیت

تمیز به داخل تانک تمیز هدایت می شود. در تانک تمیز درجه واریت آن کنترل می شود.

در صورتی که الکترولیت بیش از حد گرم باشد توسط خنک کننده خنک می شود و در صورتی که

بیش از حد سرد باشد از طرف گرم کننده heater گرم می شود.

سیب توسط یک پمپ الکترولیت تمیز با فشار بالا به سمت سطح (gap) بین دو الکترود

هدایت می شود.

با افزایش غلظت الکترولیت و چگالی جریان الکتریکی میزان بار برداری از قطعه بالای رود

با کاهش درجه واریت الکترولیت نرخ بار برداری کاهش می یابد.

با افزایش نرخ جریان و سرعت الکترولیت میزان بار برداری افزایش می یابد.

صاف سطح است آند در فرایند ECM سنگین منقسم به سرعت الکترولیت و چگالی جریان الکتریکی بار

هزینه الکترولیت از کل هزینه جاری نمک الکترولیت NaCl، هزینه کارگر جهت حصول کردن آن، بار برداری

حجت یک تانک ۵۰۰ گالنی نیاز به ۱۷۰ کیلوگرم کلرید سدیم NaCl (۲۰٪ وزنی) می باشد.

و دو ساعت طول می کشد تا برسید. همزن بتوان این میزان نمک را در آب حل نمود.

هزینه کل الکترولیت = هزینه نمک و آب + هزینه دو ساعت کارگر
و در کل ۵۰۰ گالنی

بسیار کلی در صورتی می توان از ECM استفاده نمود که حداقل یکی از شرایط زیر ایجاد شوند:

- ۱- حرارت اکثر در رانندگی الکتریکی باشد
- ۲- قطعه دارای شکل هندسی پیچیده باشد
- ۳- قطعه دارای سطحی بالا می باشد
- ۴- مساحتی سطح بالای نیاز می باشد ($Ra \gg 2 \mu m$)
- ۵- در قطعه سوراخ عمیقی ایجاد شود
- ۶- قطر سوراخ ضعیف حرکت است ($D \gg 0.1 mm$)
- ۷- نسبت عمق سوراخ به قطر آن زیاد است

الکتروارایت انتخاب شده در ECM لازم است دارای خصوصیات زیر باشد:

۱- حرارت الکتریکی خوب

۲- ارزان باشد

۳- موجود باشد

۴- ابعاد جهت کار باشد

۵- تا آنجا که ممکن است فاقد خصوصیت خوردگی و یا حداقل ایجاد خوردگی باشد

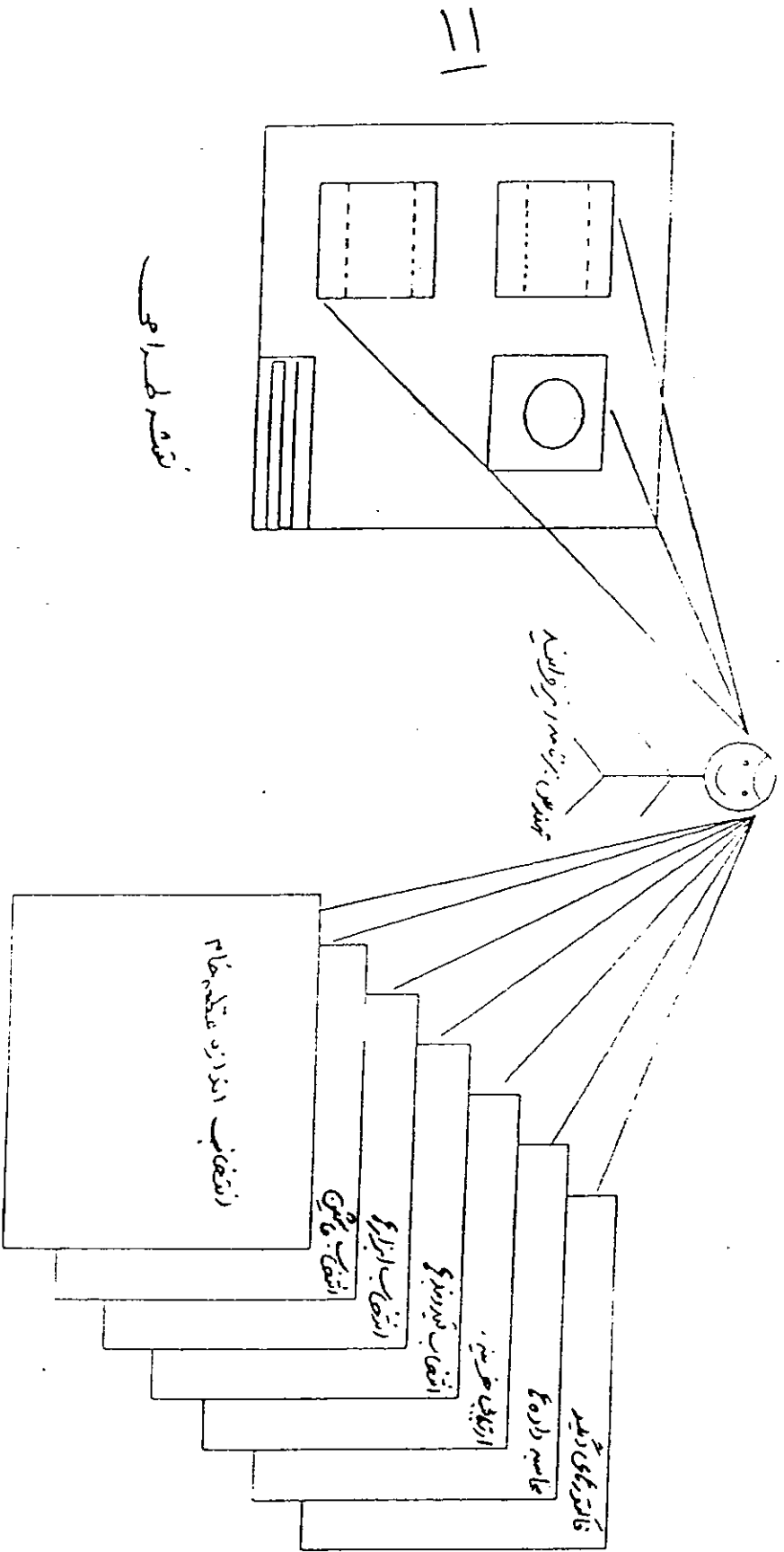
۵-۱- نیترات سدیم $NaNO_3$ دارای خوردگی کمتری نسبت به کلورید سدیم می باشد در محیط می شود سطح ایجاد شده دارای صافتر و بهتر و overcut کمتری است و نسبت در قطعه ایجاد شده است و استنشاقی والکانس سدیم (نسبت به کلورید سدیم)

۵-۲- مهمترین الکترولیت که در صنعت استفاده می شود عبارتند از:

- ۵-۲-۱- از محلول کلورید سدیم در آب با غلظت های مختلف ۸۰٪ استفاده می شود
- ۵-۲-۲- از محلول نیترات سدیم در آب با غلظت های مختلف ۱۸٪ استفاده می شود
- ۵-۲-۳- سایر الکترولیت ها عبارتند از: ۲٪

- کلورید پتاسیم
- اسید سلفوریک
- هیدروکسید سدیم
- کلرات سدیم
- فلورید سدیم

منطق تصمیم گیری برای سیستم زیر ولتاژ



= 1

فیلترهای مختلف برای زیر ولتاژ

شکل (6) ولتاژ تصمیم گیری مهندس برای زیر ولتاژ

محدود یا اترهای که باستی در انتخاب الکترولیت بر آنها وقت شود عبارتند از:
 آستر ترکیب الکترولیت حدود ۲۴۰ تا ۲۶۰ گرم در لیتر و آستر است بیسم پتید ۴۰ تا ۶۰ گرم در لیتر است.
 مضافت الکترولیت ۲۴۰ تا ۲۶۰ گرم در لیتر است $NaCl$ برابر ۶۰ تا ۷۰

محدوده درجه حرارت الکترولیت 52 ± 2 درجه سانتیگراد 26 ± 4 C (۹)
 محدوده نرخ جریان الکترولیت ۰.۱۹۵ لیتر در دقیقه در هر ۱۰۰ لیتر $0.195 L/min$

بصورت سرعت الکترولیت (متر در دقیقه)
 نرخ بیشتر از (بیشتر متر در دقیقه)
 فشار در درجی الکترولیت (کیلو پاسکال)
 صافی سطح ماسینکاری شده
 فن خردویی الکترولیت (کیلو پاسکال)
 نامناسب دور الکترو (گپ) (میلی متر)
 اندازه جابج $overcut$ (میلی متر)
 محدوده استفاده از جنس ابزار در ECM عبارتند از

بریلیم	فولاد
برنج	فولاد ۳۱۶
برنز	تیتانیوم
مس	مگنسیوم

علافا از مس بعنوان ابزار استفاده می شود

یا اترهای که در انتخاب جنس ابزار مرسوم بازرغب رتند از:

اگر جنس ابزار انتخاب شده بریلیم باشد *Beryllium*

مقاومت الکتریکی ابزار (میکرو اهم در سانتی متر در ۲۰ درجه سانتیگراد) $1/8$

هزینه الکترو (بریلیم) بالاتر است و از کافاوسیتی اقتصادی برخوردار است $1/10$

استحکام الکترود (مقاومت مکانیک) 758

الاستیسیت الکترود 110 $cal/cm^2/cm/s/C$

هدایت گرمایی الکترود 0.14

نقطه ذوب الکترود (در سانتیگراد) $1780 C$

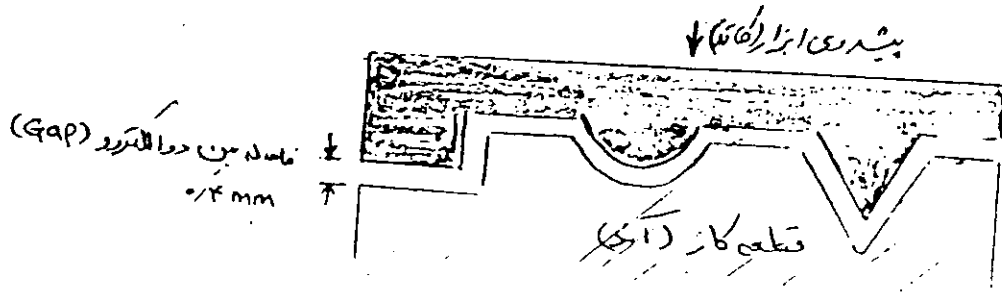
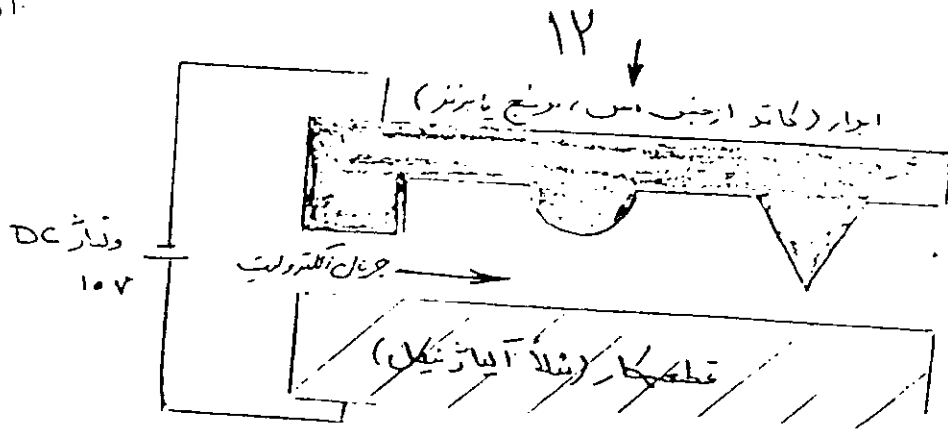
مقاومت در برابر جرقه

تابیلیت تکرار ابزار جهت ماسینکاری

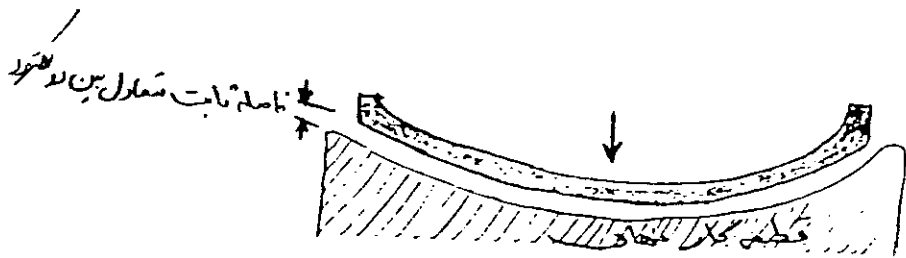
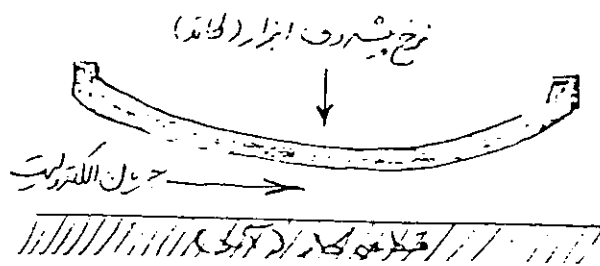
نظر بدان مواردی که جهت ابزار استفاده می شوند باستی دارای خصوصیات زیر باشد

- حرارت الکتریکی خوب
- هدایت گرمایی خوب
- مقاومت در برابر خوردگی
- باستی تابیلیت ماسینکاری داشته باشد
- باستی محکم و مقاوم در برابر جریان الکترولیت باشد

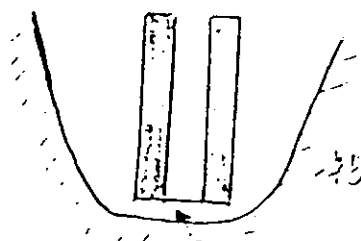
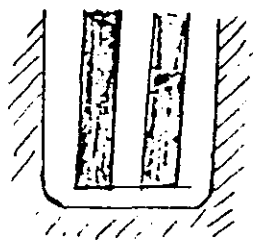
کامپوزیت



شکل ۲۰۲. نمونه ای از ابزار قطعکاری ماسینکاری با استفاده از ECM



شکل ۲۰۳. نمونه ای از ابزار



شکل ۲۰۴. نمونه ای از ابزار

شکل ۲۰۶. نمونه ای از ابزار قطعکاری ماسینکاری با استفاده از فرایند ECM

✓ دقت ماشینکاری در ECM بستگی به پارامترهای ذیل دارد:

ولتاژ کار

تاب بردن فرخ پیشروی ابزار

درجه حرارت الکترولیت

غلظت الکترولیت

دقت کاتد (ابزار)

کنندگی در جریان الکترولیت

جریان الکتریکی کاتد ابزار و قطعه کار جریان دارد

✓ مباحثی در سطح ماشینکاری در ECM به پارامترهای ذیل بستگی دارد:

صافی سطح ابزار

نوع مواد قطعه کار

الکترولیت

* خصوصیت مکانیکی میچگونه اثری در صافی سطح ندارد

✓ اندازه overcut بستگی به پارامترهای ذیل دارد:

نسبت معکوس با نرخ پیشروی ابزار دارد

رابطه مستقیمی با ولتاژ مورد استفاده دارد (وقتی نسبت بر حسب overcut مثبت می شود)

نسبت معکوس با مقاومت الکترولیت دارد

overcut اثر:
نرخ پیشروی ابزار بیشتر
مقاومت الکترولیت بیشتر
ولتاژ کمتر (جریان بیشتر)

محدوده قابل قبول overcut

محدود overcut مورد قبول بین ۰.۲ تا ۰.۳ میلی متر است

فاصله بین دو الکترود (گپ) لازم است هم مثل ذیل دقیقاً توجه شود در کنترل

مقاومت الکترولیت امکان ندارد ثابت بماند زیرا گاز و گرما در حقیقت می که الکترولیت

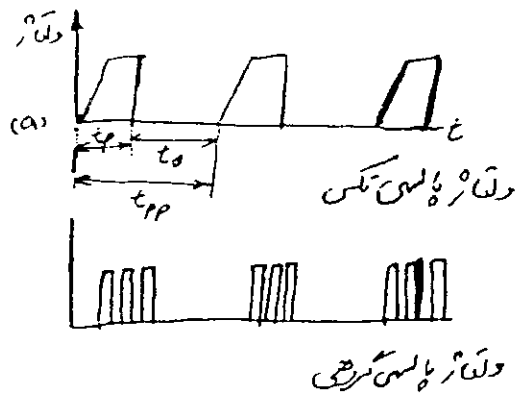
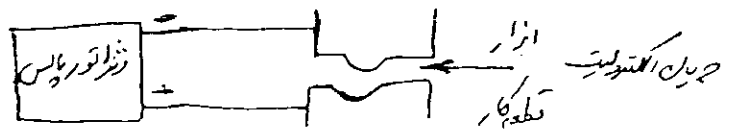
از گپ می گذرد در الکترولیت ایجاد می شود. گاز موجب ~~تغییر~~ مقاومت و گرما

موجب کاهش توان الکترولیت می شود.

پسین همی کنترل و کنترل overcut جابجایی کار بسیار مشکل است.

ماشینکاری از طریق الکترولیت‌های پالسی (PECM) Pulse Electrochemical Machining

فاصله کوچک بین دو الکترود (گپ) در ماشینکاری از طریق الکترولیت‌های پالسی موجب کنترل دقت ابزاری و سطح در طول ابزار می‌شود. اما فاصله کم بین دو الکترود اثر مستقیم بر عبور جریان الکترولیت با انتقال ذرات جدا شده از قطعه ^{می‌گذارد} و موجب عدم پایداری و ایندگی می‌شود. بهترین روش جهت رفع مشکلات فوق الذکر استفاده از ECM با تلف راه از جریان پالسی می‌باشد. ماشینکاری از طریق پالس الکترولیتی (PECM) Pulse Electrochemical Machining روشی است که از ولتاژ پالسی با چگالی جریان بالا در زمانید حل کردن قطعه کار استفاده می‌کند. این روش باعث اینک این امکان را میدهد که بر پارامترهای مختلف کیفیت و دقت کنترل داشته باشد. فاصله کم بین دو الکترود، نسبت جریان کم الکترولیت، جریان شرایط بین دو الکترود در طول زمانی که پالس قطع می‌شود موجب بهبود رابطه حل شدن قطعه و بالا رفتن دقت و صاف شدن سطح ماشینکاری است نسبت به زمانی که از جریان پالسی استفاده می‌شود.



شکل (۲-۸) ماشینکاری با روش الکترولیت‌های پالسی PECM

برونور، Rajurkar, Kozak و Wei با استفاده از PECM نتایج زیر را بدست آوردند:

- ۱- کینداختی گپ (فاصله بین دو الکترود) در PECM بیشتر از ECM است.
- ۲- تغییر در جهات انحراف گاز و هدایت الکتریکی در طول جریان الکترولیت در PECM کمتر از ECM است.
- ۳- استفاده از پالس همگرا کمتر زمانی موجب دقت بیشتر و نرخ فرسایش در زمانی که پالس $Pulse-on-time$ است.
- ۴- در PECM فاصله دورتر و خرابی الکترولیت نسبت به ΔP تغییر کمتر نسبت به ECM دارند.

Generating Surfaces of Rotation by Electrochemical Turning

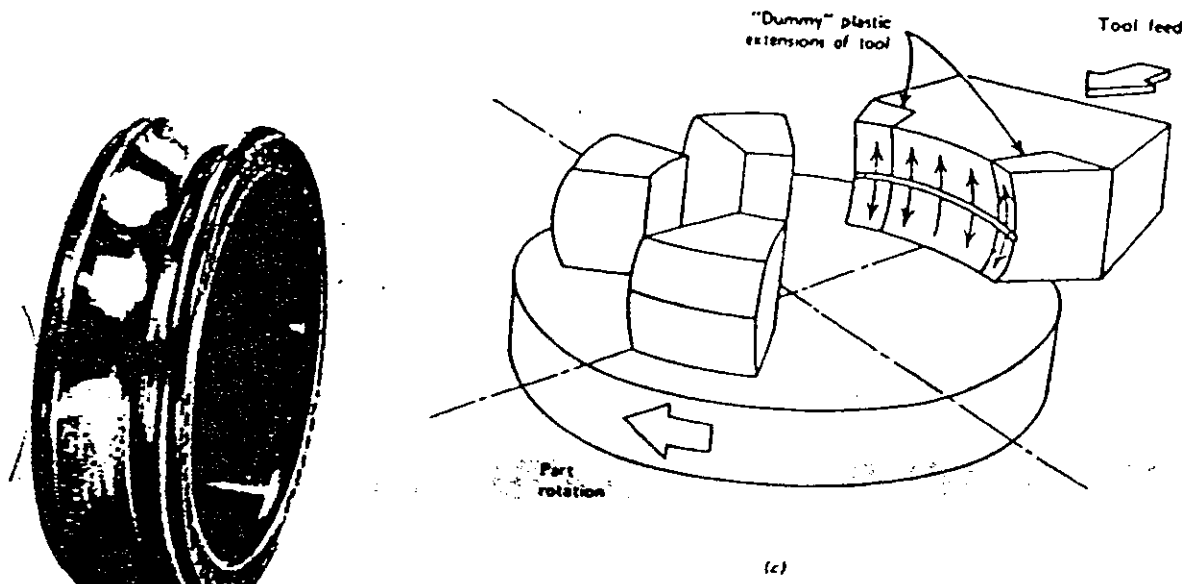


Figure 8.3 (Continued).

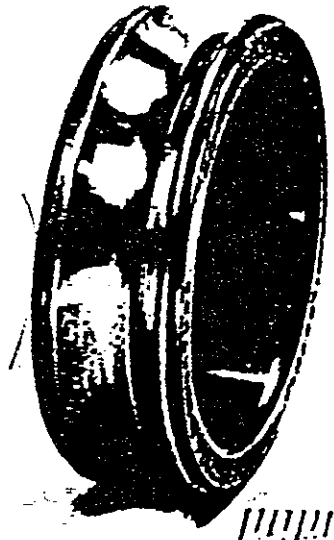


Figure 5.4 Electrochemically turned component produced by a radially moving segmented tool. (Courtesy of the Anocut Engineering Company)

شکل (د) جریان الکترولیت در ابزار و پیشروی ابزار در قطعه کار چرخشی

شکل (د) نمونه قطعه ای که بر وسیله چرخشی توسط وسیله ECM ساخته شده

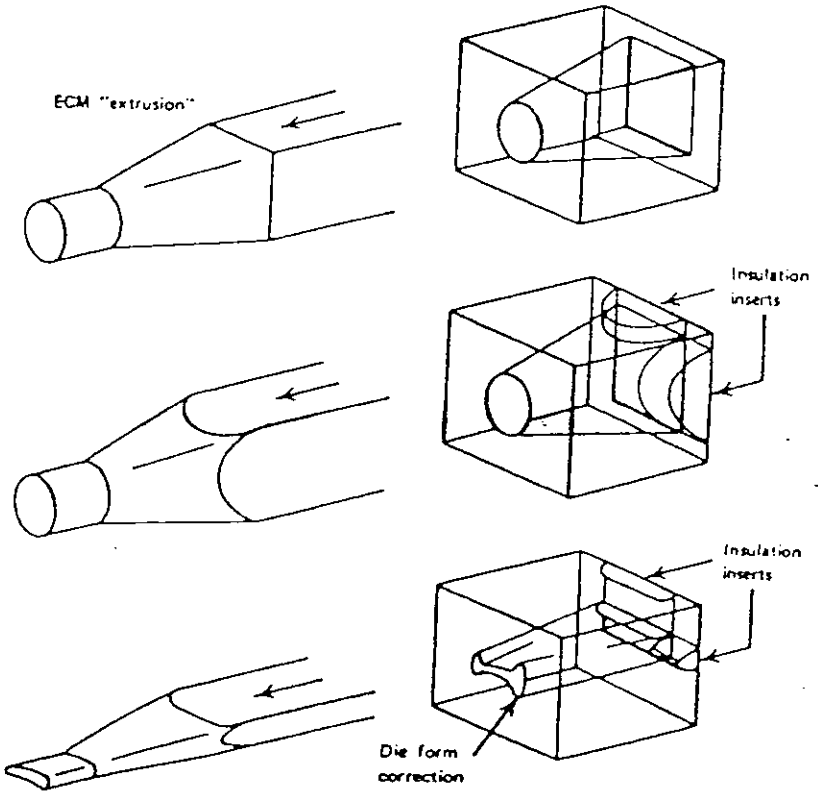


Figure 8.8 A wide variety of two dimensional shapes can be produced by ECM extrusion.

شکل (د) قطعات پیچیده ای که می توان بر وسیله ECM extrusion آنها را ساخت

۵-۲ از کلورسدیم (NaCl) در زمان استفاده می شود که:

- نیاز به ماشینکاری سریع باشد
- زمان جریان ۱۰۰٪ نیاز باشد
- overcut جانبی بزرگ می باشد

۵-۳ از نیترات پتاسیم (NaNO3) در شرایط زیر استفاده می شود:

- نیاز به تدریس های دقیق تر باشد
- زمان جریان ۲۰٪ است
- overcut جانبی حداقل باشد

۵-۶ برای کلورسدیم غلظت های مختلف در شرایط مختلف زیر توصیه می شود:

- غلظت الکترولیت برای نرخ بار برداری کم بین ۱۰ تا ۵٪
- غلظت الکترولیت برای نرخ بار برداری متوسط ۲۰ تا ۱۰٪
- غلظت الکترولیت برای نرخ بار برداری بالا ۴۰ تا ۲۰٪

۵-۷ برای نیترات پتاسیم غلظت های مختلفی در شرایط مختلف زیر پیشنهاد می شود:

- برای تدریس های کم دقت ترین (۱۰ تا ۱۰۰ μm) ۲۰ تا ۱۰٪
- برای تدریس های با دقت بالا (۱ تا ۱۰۰ μm) ۴۰ تا ۲۰٪

۵-۸ جهت اهداف خاصی مواردی بر الکترولیت افزوده می نمایند که عبارتند از:

۵-۸-۱ surface-active-agents جهت ترک کردن کامل الکترولیت در مواضع نهایی و همچنین جهت تمیز کردن قطعه از روغن و کثیفی از مواد فوق در ابتدا؛ ماشینکاری استفاده می شود. همچنین موجب دور کردن گازهای هیدروژن در اطراف کاتدی می شود.

۵-۸-۲ جهت درست آوردن صافی سطح بهتر: surface finish improvers

۵-۸-۳ جهت کاهش حجم حباب های هیدروژن در زمان دقت الکترولیت بالا: Special Agents

۵-۸-۴ در زمینه ماشینکاری (ECM) برخی از مناطق نظراتی مانند تیتانیوم غیر فعال می شوند و در نتیجه مناطق غیر فعال قطعه کار با کاتد تماس برقرار می شود. جهت جلوگیری از این عمل از مواد activators در الکترولیت

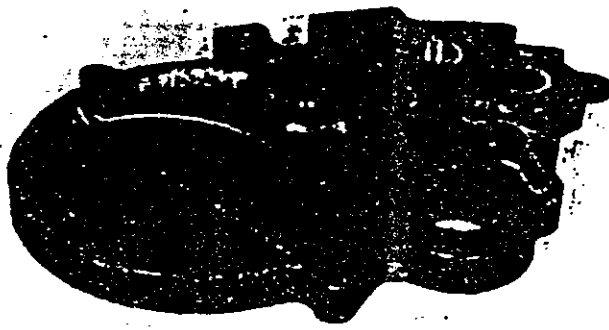


Figure 7.54 The large recess in this 1-in.-thick titanium plate was machined with a forward flow tool. The periphery of the recess, and straight rib, form exhaust boundaries while the curved ribs correspond to flow supply slots. (Courtesy of the General Electric Company.)

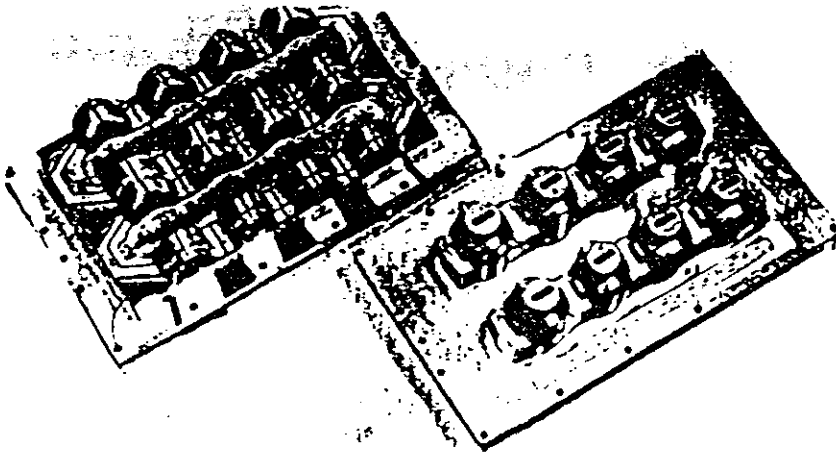


Figure 7.56 ECM tools that produced the steel forging die shown in Figure 7.55

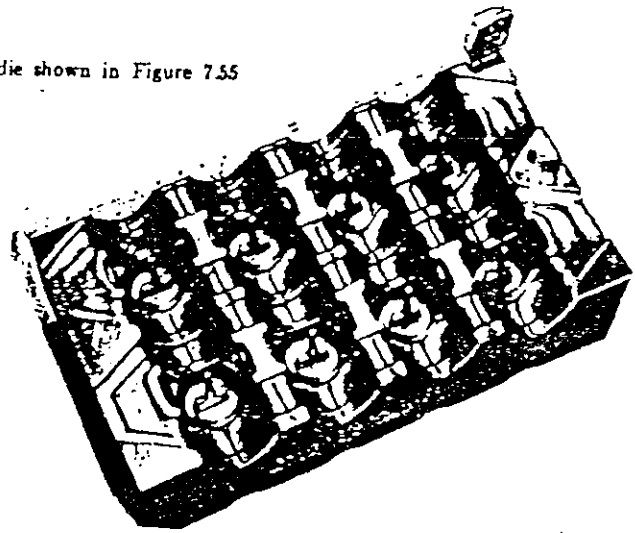
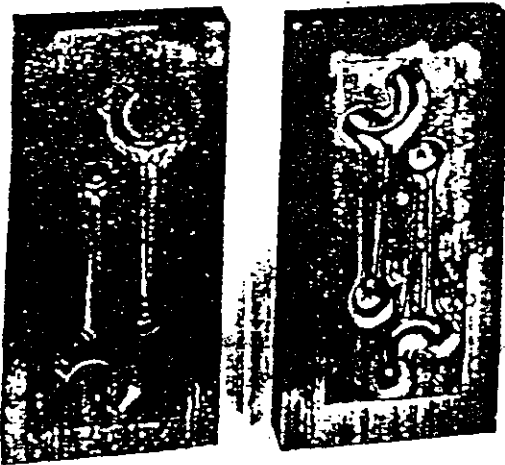


Figure 7.55 Steel forging die produced by two ECM operations. A 200 machine will produce a part of this size and complexity in 4 hr. (Courtesy of Anocut Engineering Company.)

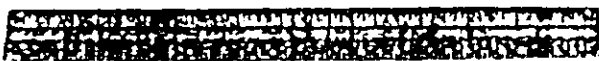


Figure 7.57 Automobile engine connecting rod forging dies and one of the ECM tools used to machine one of them from a solid blank in 20 min. (Courtesy of the Anocut Engineering Company.)

شکل ۱ (قطعات مختلفی که توسط ECM ساخته شده اند

حجت عالی کردن دیواره ابزار از مواد ذیل استفاده می شود

- | | |
|-------------------|------------------|
| EPOXIES | اپوکسی ها |
| Modified EPOXIES | اپوکسی اصلاح شده |
| Filled Silicone | |
| Porcelain enamels | |

با استفاده از هر یک از مواد فوق الذکر می توان دیواره ابزار را عایق نمود و جریان الکتریکی تنها از بیلاف ابزار اجازه عبور داد.

معمولاً ضخامت مواد عایق 1.2 mm کافی است. قبل از استفاده از مواد عایق کننده باید ابزار را کاملاً تمیز نمود

محدودیت های ولتاژ ماشینکاری در ECM عبارتند از:

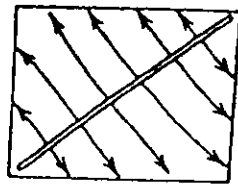
- | | |
|--|--------------|
| محدوده ولتاژ ECM بین | ولت ۵ تا ۵۰ |
| ولتاژ بین ۵ تا ۳۰ ولت بسته توصیه شده است | ولت ۲۰ تا ۵ |
| ولتاژ فولاد آدیازی | ولت ۱۰ تا ۵ |
| آلیاژهای با استحکام بالا | ولت ۲۰ تا ۱۰ |
| آلیاژهای تیتانیوم | ولت ۲۵ تا ۱۵ |
| آلیاژهای منگن | ولت ۲۵ تا ۱۰ |

محدودیت های جریان

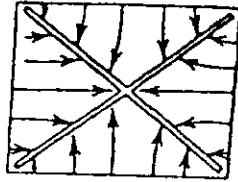
جریان مورد استفاده در ماشینکاری با ECM در حدود بین ۵۰ تا ۴۰۰۰۰ A می باشد

محدوده گپهای جریان مورد استفاده

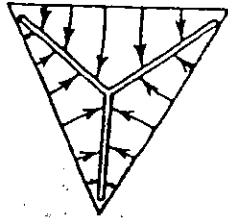
گپهای جریان مورد استفاده در محدوده بین ۸ تا ۴۶۵ A/آمبر بر سانتی متر مربع ولت.



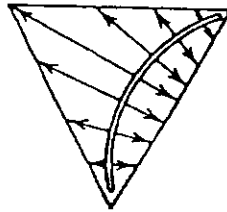
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 7.45 Variation in slot design for forward and reverse flow tools.

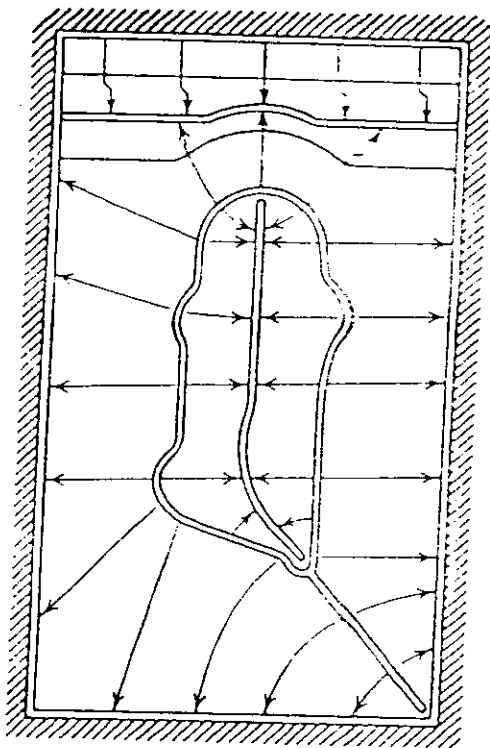


Figure 7.48 Electrolyte flow pattern for the tool shown in Figure 7.46.

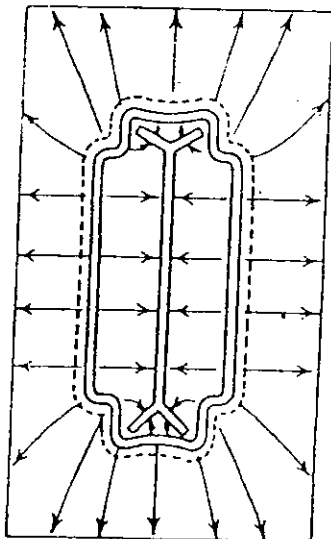
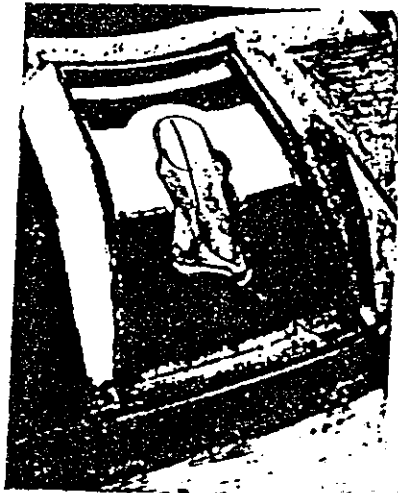


Figure 7.49 Electrolyte flow pattern for the tool shown in Figure 7.47

شکل () جریان های
مختلف عمود الکترولیت از داخل ابزار



19



Figure 7.46 Complex contour (6 x 8 in.) cut in a tough wrought nickel alloy jet engine casing by a single pass of the ECM tool shown. Machining time 30 min. (Courtesy of the Bristol Engine Division, Rolls-Royce Limited.)



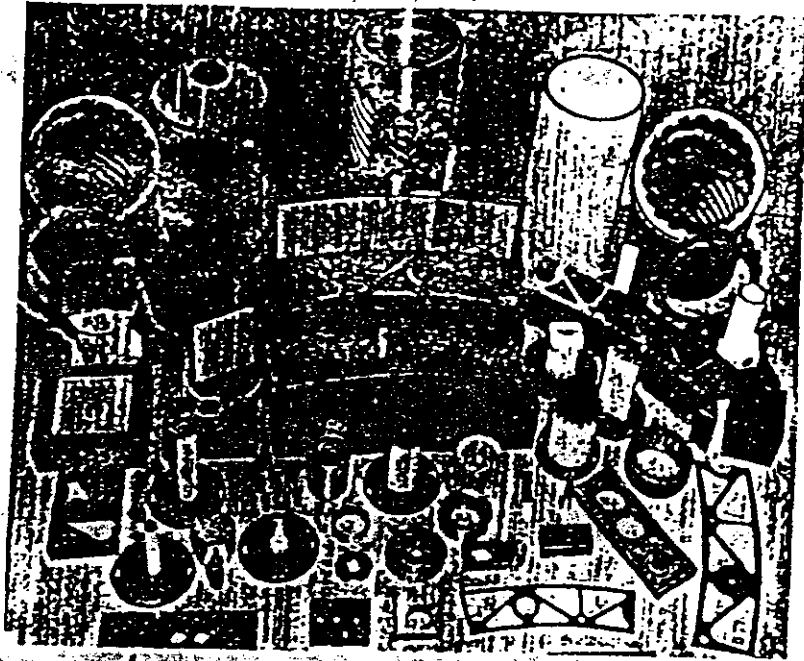
Figure 7.47 This tool, which machines the contour shown, and the tool shown in the previous figure are examples of a number of tools used to produce the entire outer contour of a 4 ft diameter jet engine casing. (Courtesy of the Bristol Engine Division, Rolls-Royce Limited.)

Table 4.2 Approximate Costs of Standard Machines

Vertical 10,000 A	\$135,000
Vertical 20,000 A	\$200,000
Vertical 40,000 A	\$350,000
Horizontal 10,000 A	\$150,000
Horizontal 20,000 A	\$250,000
Beam machine 10,000 A	\$280,000
Beam machine 20,000 A	\$340,000
Vertical lathe 10,000 A	\$245,000
Vertical reinforced concrete 3,000 A	\$ 50,000
Vertical reinforced concrete 5,000 A	\$ 60,000
Vertical reinforced concrete 10,000 A	\$ 80,000

MATERIAL: STEEL 0.25 C% DRILL 0.15 RPM	ECM-DRILLING (22)	CONVENTIONAL DRILLING
FEED	1.5 mm/min	MAX. 0.3 mm/min
NUMBER OF FINISHING DRILLING PASSES	1/2 machine 1.5 machines 1.0	1
PERFORMANCE RATIO	$(1.5 \times 1.75/1) \times 0.51 = 1.34$	
PACKING TIME (DRILLING 1.5 MIN)	1.1 min/cycle 1.5 min	1 min/cycle
INVESTMENT	\$ 500,000	\$ 1500
PACKING COSTS PER HOUR	\$ 65	\$ 15
TOOL COSTS PER EDGE	\$ 6	\$ 15
COSTS PER HOLE	1.0 RM	1.6
COST RATIO	1	1.6

Table 1: Comparison of ECM Drilling with Conventional Drilling (22)



شکل () قطعات مختلف
 و ابزارهای مختلف ECM

Figure 7.17 Variety of components, test pieces, and the ECM tools that produced them. The helical splined gears are generated with a tool having combined axial and rotational motions. (Courtesy of LTV Vought Aerospace Division, LTV Aerospace Corp.)

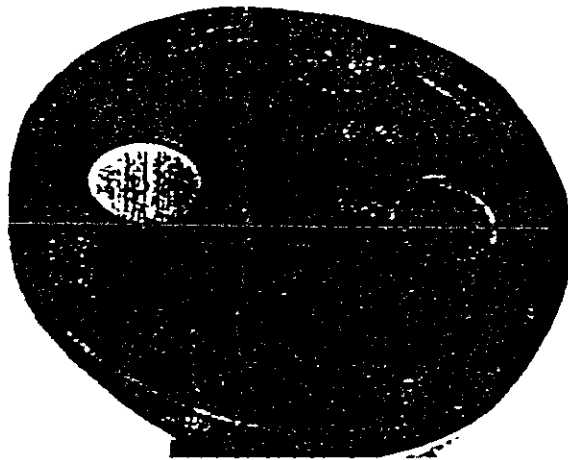


Figure 7.19 Gear blank showing lightening holes produced by the tooling in the previous illustration. ECM replaces both mechanical drilling and blending operations at a saving of \$3 per piece. (Courtesy of the General Electric Company)

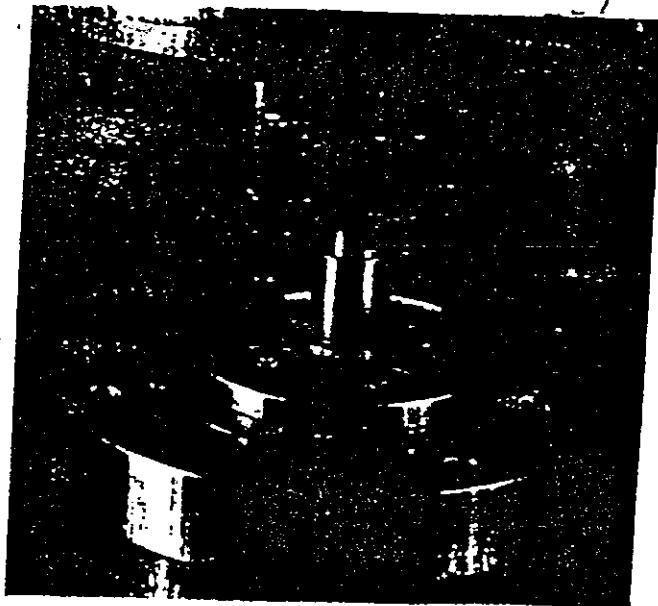
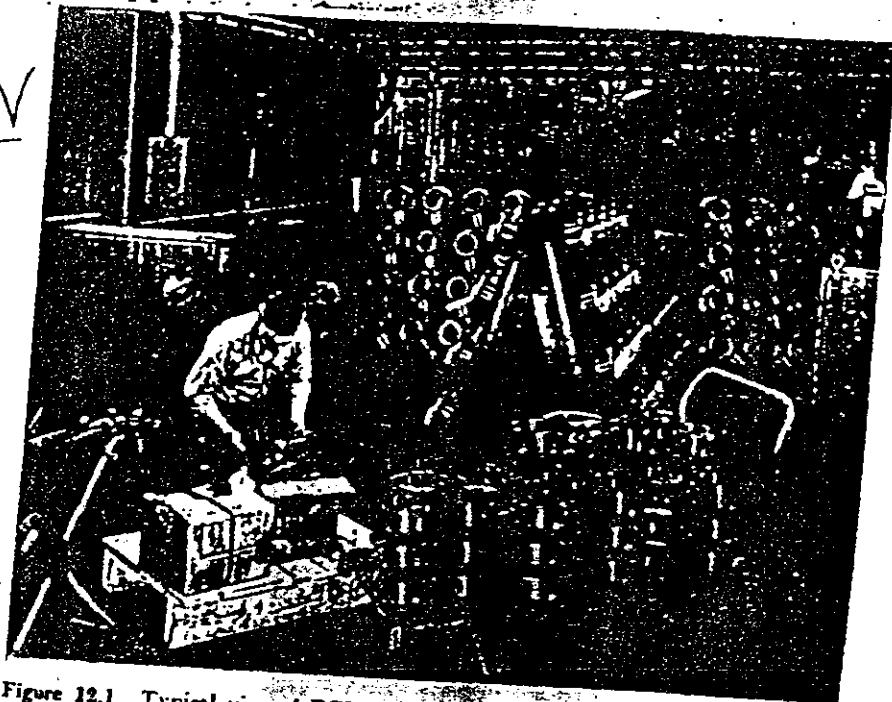


Figure 7.18 Generating tools after machining four lightening holes in a gear. At the center of each hole can be seen the small slug of material isolated by the machining. (Courtesy of the General Electric Company)

14



مورد استفاده
ساخت قطعات از
طریق ECM

Figure 12.1 Typical view of ECM production shop. Oval lightening pockets, two per part, were machined into all of the parts shown. One pocket in each part is partially located under a flange, making it difficult to machine with conventional contouring machinery. (Courtesy of the Anicut Engineering Company.)



Figure 8.6 Turbine wheel EC slotted by a bank of tapered electrodes feeding axially. The slots, 0.5-in.-deep, 1.8-in.-long, 0.09-in.-wide, are produced simultaneously by a single pass of the tapered slotting tools. The complete operation takes 20 min in this tough nickel alloy. (Courtesy of the General Electric Company.)

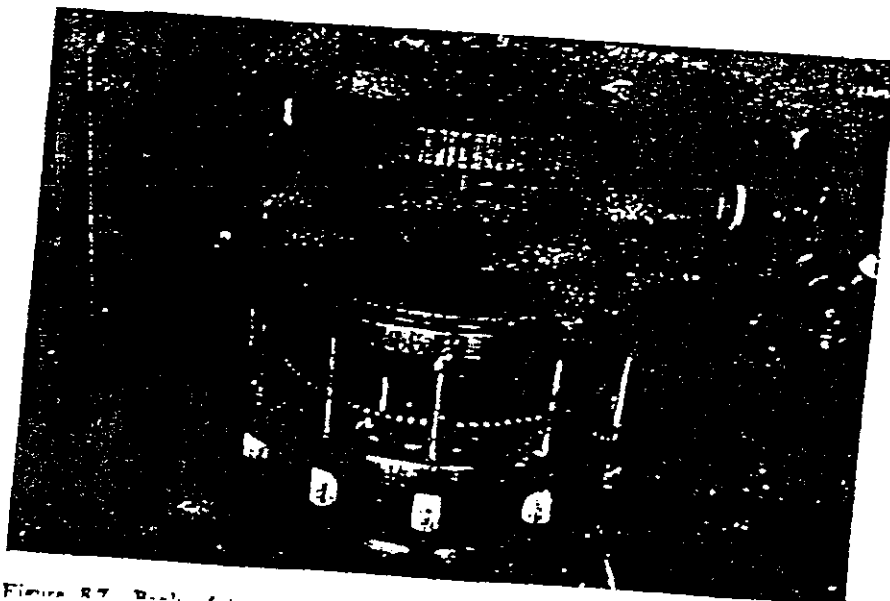


Figure 8.7

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100



Figure 7.51 Titanium plate with rectangular pockets produced by a repetitive ECM operation. The dimensional repeatability and surface quality is apparent. (Courtesy of the Anocut Engineering Company.)

شکل () یک صفحه تیتانیوم که
بر وسیله ECM ماشینکاری شده اند

Figure 7.50 Simple generating tool. Electrolyte is supplied from the periphery of the tool and flows into the cross slots. The sides of the tool are insulated to prevent side-cutting. (Courtesy of the Anocut Engineering Company.)

شکل () یک ابزار ECM

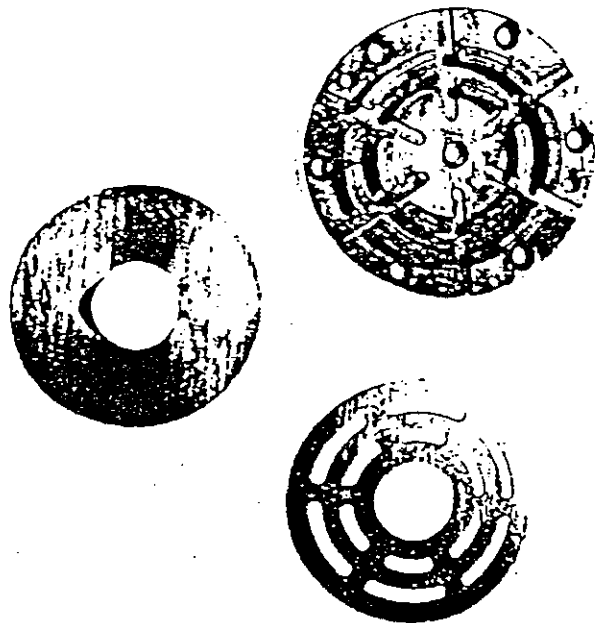
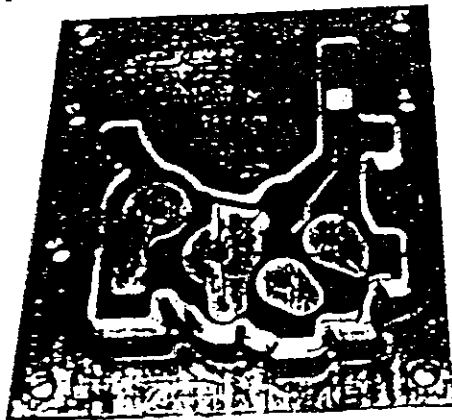
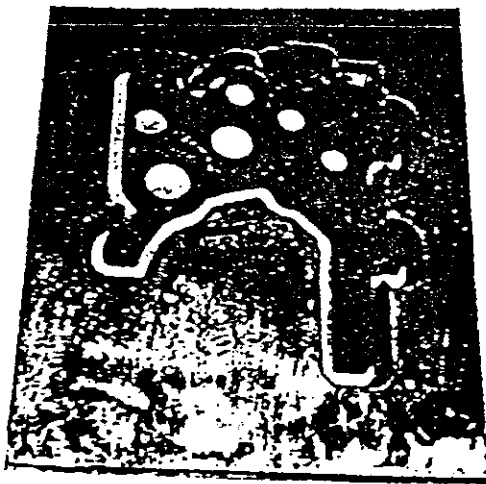


Figure 7.52 ECM slotted disk. Each individual electrode on the tool has insulated vertical walls and its narrow electrolyte supply slot is produced by electro discharge machining (EDM). (Courtesy of the Cincinnati Milacron Company.)

شکل () قطعاتی که بر وسیله ECM ساخته شده اند

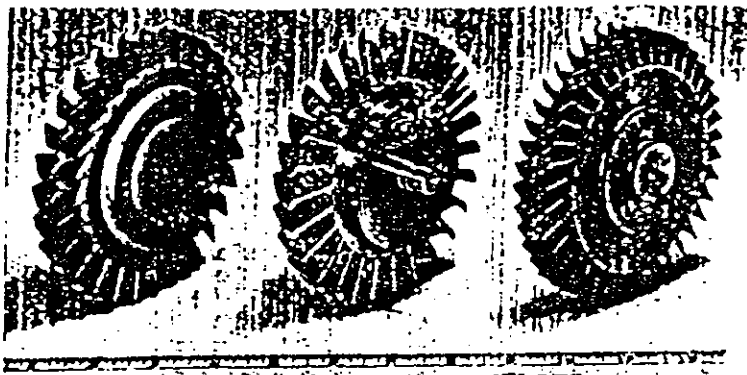
Figure 7.53 This ECM trepanning tool cut the component shown, from a solid 0.75-in.-thick titanium plate, in 20 min. The base of the tool measures 12 x 18 in. (Courtesy of the General Electric Company.)

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHILOSOPHY DEPARTMENT

101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200



19

Figure 7.20 Integrally bladed turbine wheels electrochemically machined from waspalloy and titanium forgings. In operation a tool moves in radically to generate one airfoil; the wheel is then indexed. While wheels take under 3 hr to process, because of the many tool passes which have to be made, multielectrodes can be used to process several wheels simultaneously to achieve low manufacturing costs. Tooling is patented by Garrett-AiResearch. (Courtesy of the Garrett-AiResearch Manufacturing Company of Arizona.)

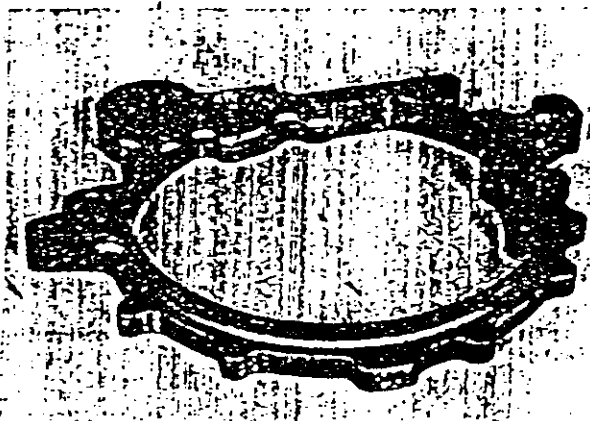


Figure 7.21 This ring, approximately 10 in. in diameter, was cut as shown by a single, 20-min pass of an ECM generating tool through a 0.75-in-thick titanium plate. (Courtesy of the General Electric Company.)



Figure 7.22 In order to fully utilize a 10,000-A machine both these components, the larger measuring 10 in. across, were machined simultaneously in 20 min by a single ECM generating tool. (Courtesy of the General Electric Company.)

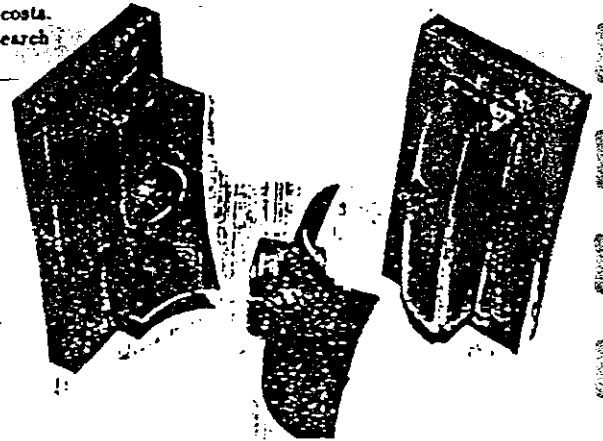


Figure 7.27 Complexly shaped component and ECM tools used to produce it. (Courtesy of Klik Industries.)

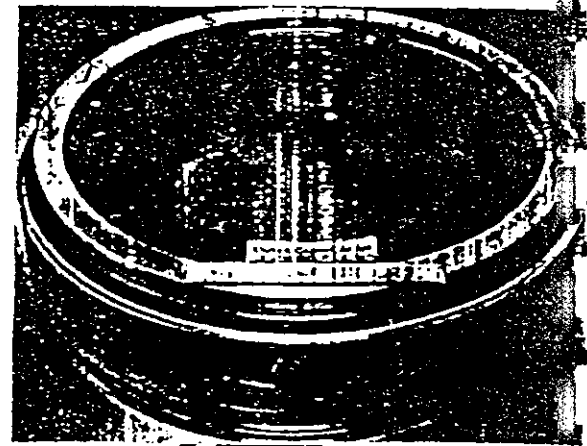


Figure 7.29 Jet engine casing, with integral "vane ends" and pockets produced by ECM. The process is used extensively to produce this type of component in the gas turbine industry. (Courtesy of the Aero Engine Division, Rolls-Royce Limited.)

شکل () قطعات که از طریق ECM ساخته شده اند

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions.

2. It is essential to ensure that all data is entered correctly and that the system is regularly updated.



شكل () ماسين مخصوص
برش الالتروشيمياي

Figure 3.3 Specially built machine for electrochemical cutting of large billets of material not easily cut by mechanical methods. (Courtesy of the Anocut Engineering Company.)



شكل () ماسين افقى الالتروشيمياي

Figure 3.4 Horizontal electrochemical machine. The work enclosure slides to the right, to the position shown over the electrolyte tank, to give access to the tooling. (Courtesy of the Anocut Engineering Company.)



Figure 3.5 Electrochemical beam machine used mainly for both inside and outside contouring of large annular components. The tool platen has controlled motion in both vertical and horizontal directions. (Courtesy of the Cincinnati Milacron Company.)

۲۵

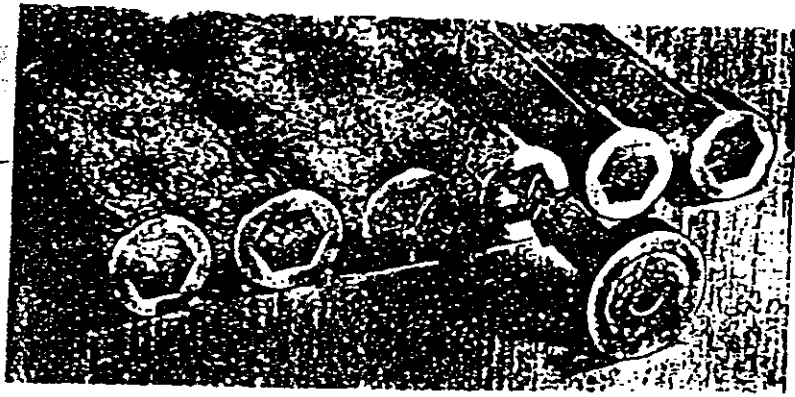


Figure 7.13 These hexagonal pockets are typical of work that can be produced with simple, forward flow generating tools. (Courtesy of the Anocut Engineering Company.)

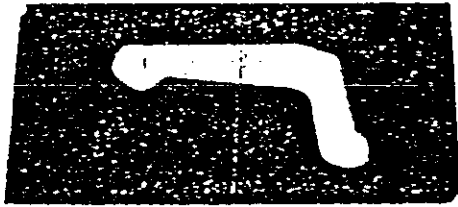
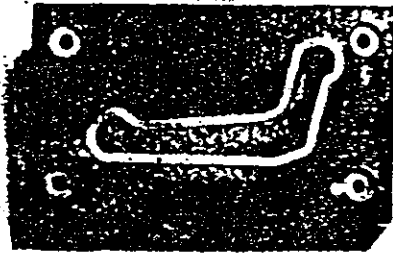


Figure 7.15 A generating tool can be used to cut almost any shape from plate material. The tool is a simple envelope of the shape to be machined. (Courtesy of the Cincinnati Milacron Company.)

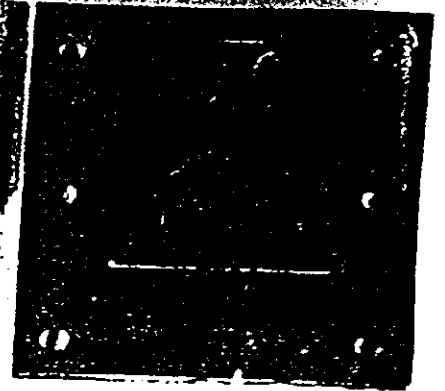
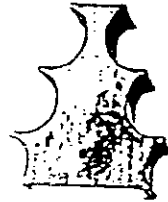


Figure 7.18 The dovetail shape, produced by an ECM generating tool, is typical of that used to secure airfoils to their rotors in both gas and steam turbines. A single tool, as shown, can machine to ± 0.0005 in. tolerance. If a secondary ECM operation is performed then tolerances of ± 0.0001 in. are possible. (Courtesy of the Cincinnati Milacron Company.)

شکل () قطعات مختلفی که بر روش الکتروشیمیایی ساخته شده است

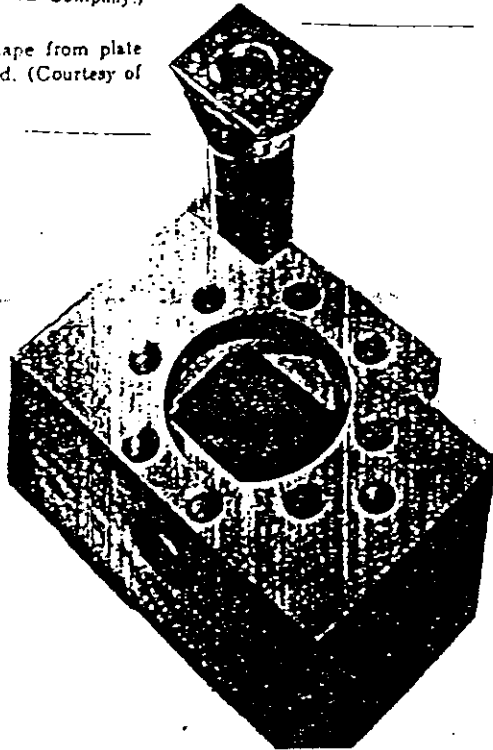
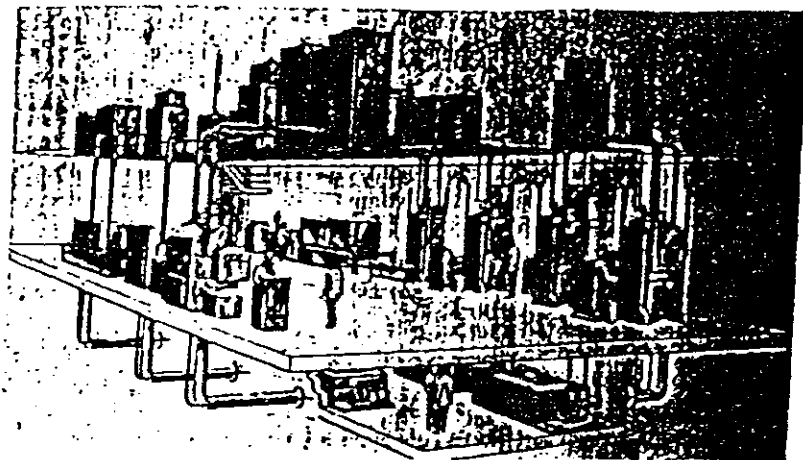


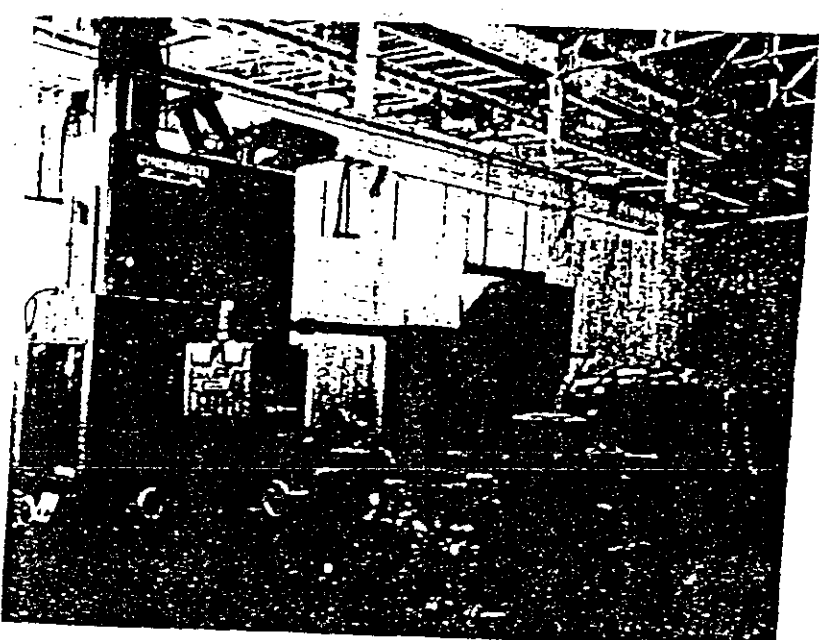
Figure 7.14 Precise rectangular hole produced with a generating tool. A tool, such as this, will penetrate into the work at 0.1 to 0.3 in./min on ferrous materials. (Courtesy of the Cincinnati Milacron Company.)

۲۱



شکل () ترمیم قدرتی
ماشینهای ECM در یک کارخانه

Figure 3.10 Streamlined electrochemical machining factory arrangement. Noisy auxiliaries are separate from the machine shop. Electrical equipment is placed on the floor above and electrolyte handling equipment on the floor below. (Courtesy of the Anocut Engineering Company.)



شکل () ماشین
الکتروشیمیایی عمود

Figure 3.8 Vertical electrochemical "C" frame machine. The auxiliaries in the foreground are high pressure pump, filter, electrolyte pressure and temperature controls, and hydrogen extraction fan; in the background are centrifuge, evaporative condenser, and electrical control cabinet. (Courtesy of the Cincinnati Milacron Company.)

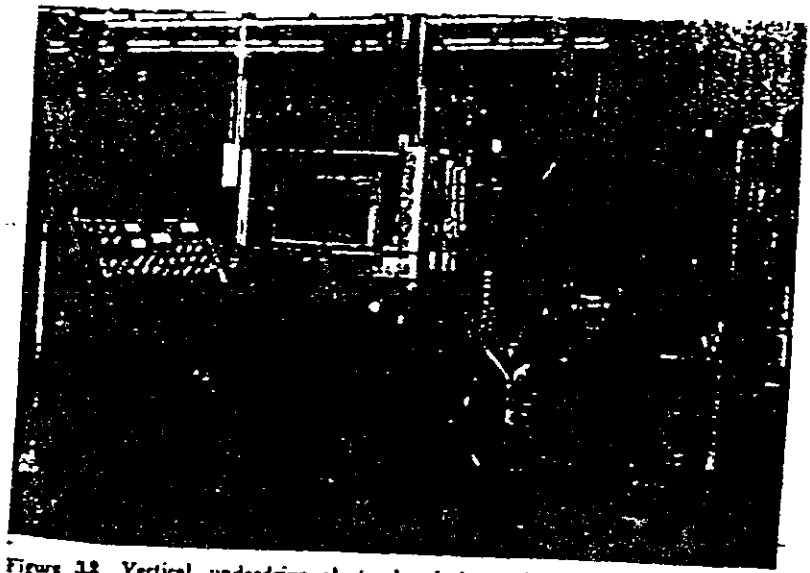


Figure 3.9 Vertical, underdrive electrochemical machine. The upper tool platen remains fixed while the work is fed towards the electrodes by the upwards motion of the horizontal table. The drive mechanism is housed in the lower half of the machine. (Courtesy of the Anocut Engineering Company.)

بسمه تعالی

درس تولید مخصوص
روش های پیشرفته ماشینکاری

ماشینکاری به روش تخلیه الکتریکی Machining Electrodischarge

دکتر مرتضی صادق عمل نیک

دانشگاه تبریز

دانشکده فنی - گروه مهندسی ساخت و تولید

ترم پائیز ۱۳۸۰

ماشینکاری بر روش تخلیه الکتریکی
Electro discharge machining (EDM)

در روش های سنتی ماشینکاری، عمدتاً نیروی عامل انجام فرایندها نیروی مکانیکی و کاتر است که در سوراخکاری می باشد.
از چند دهه گذشته، برادری ساخته اند که دارای ویژگی های میباشند که نمی توان جهت ماشینکاری آنرا با روش های سنتی استفاده نمود. این ویژگی ها عبارتند از: دسترسی، هزینه انتقال و ارتقا، نیاز
مقاومت در مقابل فرسایش مکانیکی و یا شیمیایی، مقاومت در مقابل سوراخکاری مکانیکی و یا حرارتی
و یا مقاومت در مقابل خستگی در بخش میباشند. امروزه یکی از روش های اساسی ماشینکاری و ابزارسازی است که بر روش ماشینکاری سنتی مباحثه شده اند، زیرا از نظر

حرارتی و سخت کردن موجب تغییر فرم و از دست دادن دقت در ماشین کاری می شود.
در صورتی که قبل از ماشینکاری بر قطعه کاری انجام نماند، دقت امکان ماشینکاری آن از طریق سنتی امکان پذیر نمی باشد. همچنین سختی سطحی ایجاد شده همراه با تنش ها پس ماند در روش سنتی موجب می شود طول عمر

قالب قطعه بماند. گمراهی از سختی آن، روش های مانند EDM و ECM باشد. از طرف دیگر
قطعاتی که در روش های سنتی بکار می روند اثرات را با روش برده و رفع آن موجب صرف وقت و هزینه می باشد.

در روش های مانند EDM و ECM هیچگونه بیسیس ای در قطعه کاری ایجاد نمی شود. در فرایند های سنتی
غالباً لازم است قطعه کاری در سطح نگهدارنده محکم نگه داشته شود، همین شده موجب اثرات سوء بر سختی
گردد پس قطعاتی از جنس نسیم ها در کارگاه ندارد. در روش EDM می توان بدون نیرو در نگه دارنده نسیم کاری را

ماشینکاری نمود. در روش های سنتی نمی توان سوراخ های قطر ۱ تا ۱۰۰ میکرون در قطعه ایجاد نمود. اما در روش

های مخصوص EDM امکان پذیر است. همچنین در صورتی که نسبت طول به قطر سوراخ
بسیار زیاد باشد مثلاً ۱:۲۰۰ باشد نمی توان بر روش های سنتی آنرا در قطعه ایجاد نمود. اما در روش EDM
این کار امکان پذیر است.

EDM کلمه اختصار Electrical-Discharge Machining می باشد که به فرآیند ماشینکاری برقی (تخلیه الکتریکی) می گویند.

در فرآیند ماشینکاری با تخلیه الکتریکی EDM قطعه کار فلزی در اثر جریان تخلیه الکتریکی

ماشینکاری می شود. در همدستانه هزاران جرقه تولید می شود و هر جرقه با ذوب کردن

و تبخیر قسمت کوچکی از قطعه کار یک حفره کوچک روی آن ایجاد می کند. مجموعه

حفره های ایجاد شده مورد نظر را بر روی قطعه کار بوجود می آورد. از مایع غیر فلزی برف

تراشه ها را از دور ماشینکاری دور و جرقه را محدود می سازد. در این فرآیند هر جرقه دارای مقدار

علوم و قابل کنترلی انرژی است که با کنترل دقیق آن می توان نرخ برداشت فلز و برداشت سطح

را بیشترین نمود. حرارت ایجاد شده به وسیله جرقه الکتریکی تا ۲۰۰۰۰ درجه سانتیگراد میرسد

که موجب ذوب شدن، تبخیر، ایجاد حفره در قطعه کار و تراشه توسط سائل غیر فلزی در برق از محل جرقه و

ماشینکاری دور و در آن غوطه در می شود. با این روش می توان حفره های فلزی را

بدر گونه های گوناگون که بتوان ابزار آنرا ساخت ماشینکاری نمود. در این فرآیند هیچگونه تماس

بین دو الکترود وجود ندارد. در نتیجه امکان ماشینکاری قطعات ظریف و کاری از اعوجاج

را فراهم می سازد.

در این فرآیند بین قطعه کار و ابزار و نیز ریالیس منقطع برقرار می کنند. هر دو الکترود در مایع

دی الکتریکی غوطه ور می باشند. در هر پاس ولتاژ در کورتا ترین فاصله بین ابزار و قطعه کار

جرقه ایجاد می شود. این جرقه ها موجب جدا کردن خنده کوچکی از قطعه کار و ایجاد حفره می شود.

بر این صورت سطح کار ماشینکاری می شود. فاصله بین ابزار و قطعه کار (گپ) باید تعدد آنرا در نظر داشته باشد

جهت حفظ گپ تنظیمی لازم است بیشتر روی ابزار به داخل قطعه کار کنترل شود. قطعه کار

ماشینکاری شده ماکمل یا عکس شکل پیش از ابزار ساخته شده می باشد.

ذوب شدن و تبخیر فلز به وسیله تخلیه الکتریکی اولین بار توسط Sir Joseph Priestly

در سال ۱۷۶۸ م اهدا شد. از آن زمان یک قرن طول کشید تا تلاش های عملی

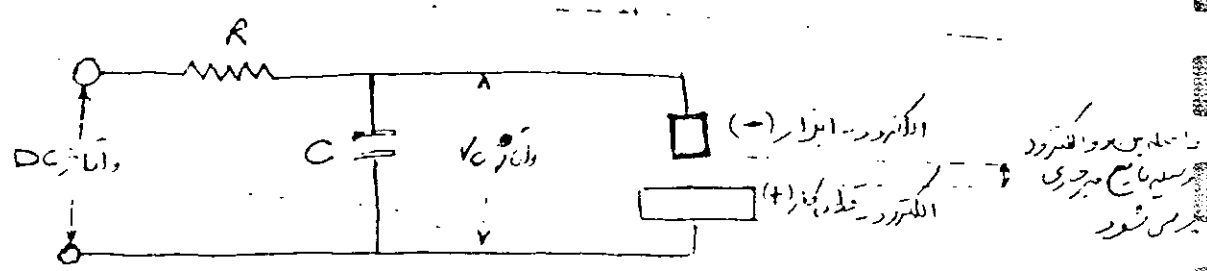
در این زمینه شروع شد.

۲۲
 درس ۱۸۴۲ دودانشمند روسی B.R Lazarenko و N.I شماره خردان کتاب تکنیک برقی کرده
 لازرنکوها دریافته‌اند با کنترل انرژی تخلیه الکتریکی میدان فولاد سخت را براده برداری نمود
 آنها دریافته‌اند جهت ماشینکاری موثر لازم است طول زمان تخلیه الکتریکی کوتاه‌تر و تعداد تکرار

آن در واحد زمان بیشتر. جهت اسفند لازم است تخلیه الکتریکی در مایع عایق (dielectric)

و عمر کنترلی در یک سطح کوچک انجام گیرد. آنها با استفاده از تخلیه الکتریکی با ولتاژ کم

اولین سیستم RC EDM را ساختند. این سیستم در شکل ۲-۱ نشان داده شده است.



شکل (۲-۱) مدار سیستم RC EDM

مدارهای زیادی از سیستم فوق جهت ساخت ماشینهای تخلیه الکتریکی استفاده شد.

این سیستم‌ها دارای معایب زیر می‌باشند

- هزینه کم
- ساده
- قابلیت اطمینان

اما عیب اساسی این سیستم‌ها محدود بودن قابلیت براده برداری (ماشینکاری) آن می‌باشد.

امروزه جهت رفع عیب فوق واکنش نوع بار برداری و کاهش خوردگی ابزار، از تراشه‌های کنترل

ابزار و از مدار کنترل شده با ترانزیستور (transistor controlled pulse circuit) استفاده می‌شود.

در مدار RC فرکانس بار برداری بین ۲۰۰ هرتز تا ۵۰۰ کیلو هرتز (از زمان توقف R) عبور می‌کند و خازن (C) را با ولتاژی بین ۳۰ تا ۲۵۰ ولت پر می‌کند. وقتی ولت خازن (C)

بیش از دلتا در مورد زحمت شکست و به اندازه ارزید که جهت ایجاد حفره در بین دو الکترود لازم می باشد، در منطقه ای که دارای حداقل تفاوت پتانسی الکتریکی می باشد و در جایی که کوپترین فاصله بین دو الکترود می باشد حفره ایجاد می شود. از آنجا که معمولاً به قطب منفی متصل است مواد کتری جدا می شود. اما از قطب کار که معمولاً به قطب مثبت وصل است فرسایش و براد مثبتی جدا می شود. پس از هر تخلیه الکتریکی مجدداً خازن پر می شود و تخلیه الکتریکی مجدداً در محل بعدی که کوتاه ترین فاصله را بین دو الکترود دارد بوجود می آید.

درجه ولت حفره زمان تخلیه در حدود ۲۰۰۰۰ ولت سانتی گراد می باشد. با استفاده از

یک خازن کوپل، تخلیه الکتریکی کوچکی با فرکانس زیاد و در نتیجه صافی سطح

عرب بدست آورد. فاصله بین دو الکترود (انبار و قطعه کار) معمولاً بین ۰.۲۵ تا

۰.۵ میلی متر و نرخ جدا کردن مواد (برابراری) ۳۰۰ میلی متر مکعب در دقیقه با قدرت ۱۰ وات

در میلی متر مکعب در دقیقه (۱۰ W/mm³/min) می باشد. همچنین از روی قطعه کار مواد بوسیله

تخلیه الکتریکی جدا می شود انبار در داخل کار پیشروی می کند و چون از یک سیستم سرو حفره پیشروی

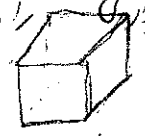
انبار با نرخ مناسب استفاده می شود تا همواره فاصله بین دو الکترود را ثابت نگه دارد. با تغییر دادن

مقاومت (R)، خازن (C) و دلتا، سوال چنان بین دو الکترود را افزایش داد. حتی دلتا در خازن به اندازه ای که بتواند هیچ دی الکتریک را بشکند، خازن بین دو الکترود (GAP) تخلیه و این عمل تکرار می شود. معادله گفته شد در اوقات RC در بعضی ممکن دلتا که عبارتست از:

۱- نرخ پاشیدن جدا کردن مواد از روی قطعه که حدود ۲۵۰ میلی متر مکعب در دقیقه (mm³/hr) است

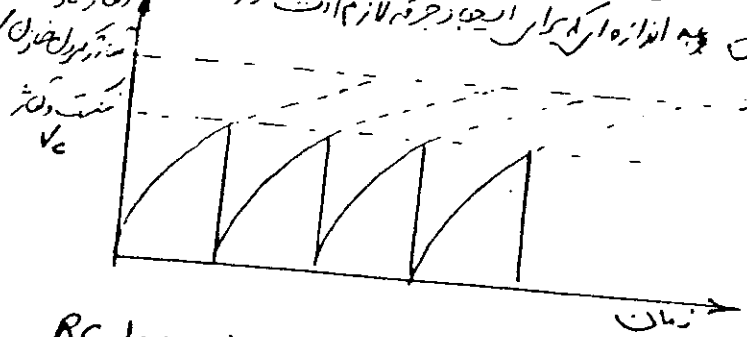
۲- در طول مدت پر شدن خازن، کار موثری انجام نمی شود

۳- بلوی بدست آورده شده صاف است و به وسیله نرخ برابری را فوق آن، کار دارد



۳۰۰ mm/min
۱۰ W/mm³/min

در مدار RC که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است، ابزار در قطعه کار در مایع دی الکتریک غوطه‌ور می‌شوند و موجب
 یک طرف خازن که به منبع DC شارژی شود متصل است. همانطور که در شکل (۲-۱) نشان داده شده است در
 افزایش ولتاژ خازن به سبب افزایش ولتاژ شکست و به اندازه آن برابر این جرم جرم لازم است سیدر منطقه ای در زمان
 بین دو الکترود که کمتر یا نامند را در جرم ایجاد می‌شود.



شکل (۲-۱) تغییرات ولتاژ خازن با زمان در مدار RC

از مایع دی الکتریک جهت تمرکز انرژی تخلیه الکتریک در مقدار شکاف بین این ابزار (لایه)
 و قطعه کار (آند) استفاده می‌کنند. همچنین از آن جهت خنک کردن دو الکترود و
 کنار زدن محلول الکتریکی از میان شکاف استفاده می‌شود. مقاومت الکتریکی مایع دی الکتریک

در موقع شروع تخلیه انرژی الکتریکی اثر می‌گذارد. مقاومت کم دی الکتریک موجب تخلیه انرژی
 زودتری می‌شود. اگر از خازن بزرگتری استفاده شود، قبل از آنکه تخلیه الکتریک اتفاق افتد
 خازن بسته شارژ (پر) می‌شود. در نتیجه انرژی و تعداد جرمه‌ها بستگی به شرایط بین
 دو الکترود (کپ) دارد. چون در هر وارت جرمه‌های زیاد است و طول زمان جرمه‌های تریانه در
 سطحی که جرمه اتفاق می‌افتد ضعیف‌تر می‌گردد تا آنجا که جرمه‌ها در سطح یک جرمه‌ها موجب ایجاد جرمه
 در سطح آن جرمه‌ها می‌شود تا آنجا که سطح قطع بعدی که قطع می‌شود در شروع

تقریباً مکمل ابزار می‌شود. در طول سال ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ نرخ بار برداری در این ابزار از

۰.۲ تا ۲.۰ $\text{cm}^3 \text{hr}^{-1}$ متر مکعب در ساعت رسید. یکی دیگر از محدودیت‌ها در مدار RC است

است که برابر است با آردن همان سطح بالا حدود ۰.۳ تا ۰.۴ $\text{cm}^3 \text{hr}^{-1}$ نرخ بار برداری را تعیین می‌کند.

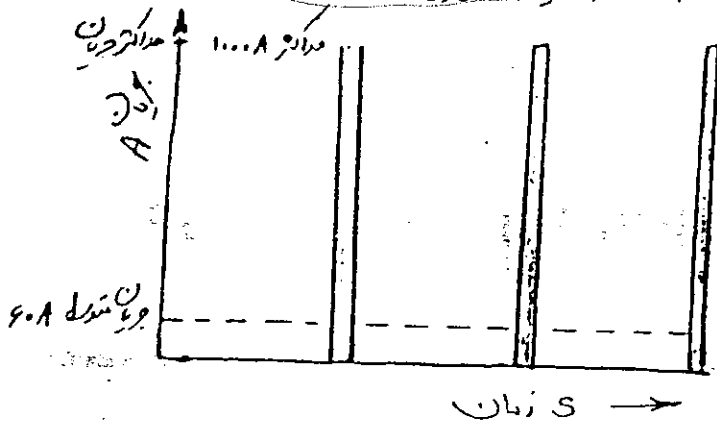
تقلیل بار

- ۱- تمرکز انرژی تخلیه الکتریکی در اندازهای کوچک
- ۲- بین لایه‌ها و آند
- ۳- جهت کردن الکترود
- ۴- دور کردن محلول الکتریکی

$$10^9 \times \frac{250}{106} = 250 \times 10^3 \frac{\text{mm}^3}{\text{hr}}$$

$$1^{\text{hr}} \approx 4000 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}} = 4 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

علاظدره در شکل (۱-۳) مشاهده شده است در ابتدا شروع حرقه جریان پهنای خود را (Peak) و سریع کاهش می یابد. درجه حرارت حرقه بعد از آن از حدی است که موجب جدا کردن مدار از قطعه کار می شود. در نتیجه قطعه ذائقی می شود. همچنین موجب آسیب دیدن جوارین ابزار می شود.



همچنین در حرقه های از این جریان بسیار بیشتر از حد لازم برای جدا کردن مدار از قطعه کار است. شکل (۲-۳) در اکثر جریان و کاهش سریع آن در شروع حرقه

در صورتیکه در اکثر جریان که عرض و طول زمان حرقه افزایش یابد موجب خوردگی کمتر ابزار و بالاتر

دائری و شکلگیری می شود. این اهداف با استفاده از فرکانس های کنترل شده مانند شکل (۲-۴) بدست می آید. شکل موج مربعی شکل پالسهای کنترل شده

نشان داده شده است.

در واقع بدلیل محدودیت های مدار مولد قدرت (RC) از یک طرف و توسعه بزرگتر

ظنابع الکتریکی، سرامتسورها و IC ها از طرف دیگر، استفاده از مدارهای قدرت

سرامتسوری در ماشین EDM نامناسب است. در ماشین های جدید تخلیه الکتریکی

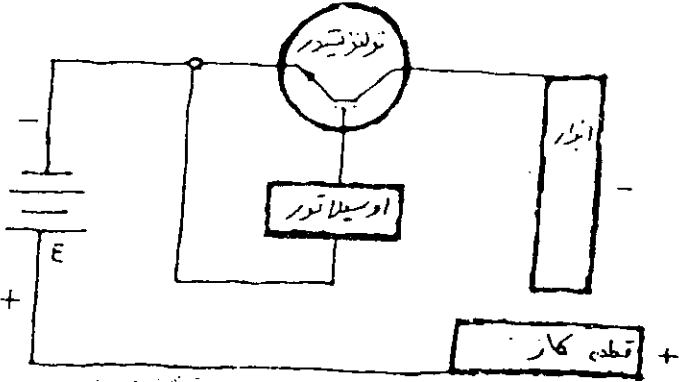
و انجم بیت مشخصات ولتاژ و جریان و زمان در شکل (۲-۶) نشان داده شده است.

در مقایسه شکل های (۲-۳) و (۲-۵)، کاهش مقدار حرارت جریان و کوتاه کردن زمان خاموشی

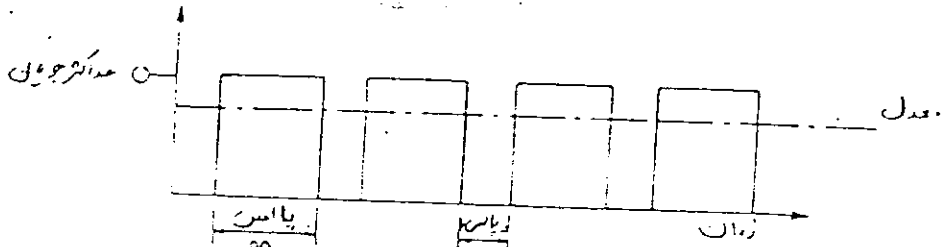
(تکرار) موجب افزایش طول زمان پالس می شود. نسبت زمان روشنی و خاموشی پالس را می توان تغییر داد. چون این در نتیجه قابل تنظیم است، شواهد و نتایج را می توان بر اساس نیاز تنظیم نمود.

۲۵

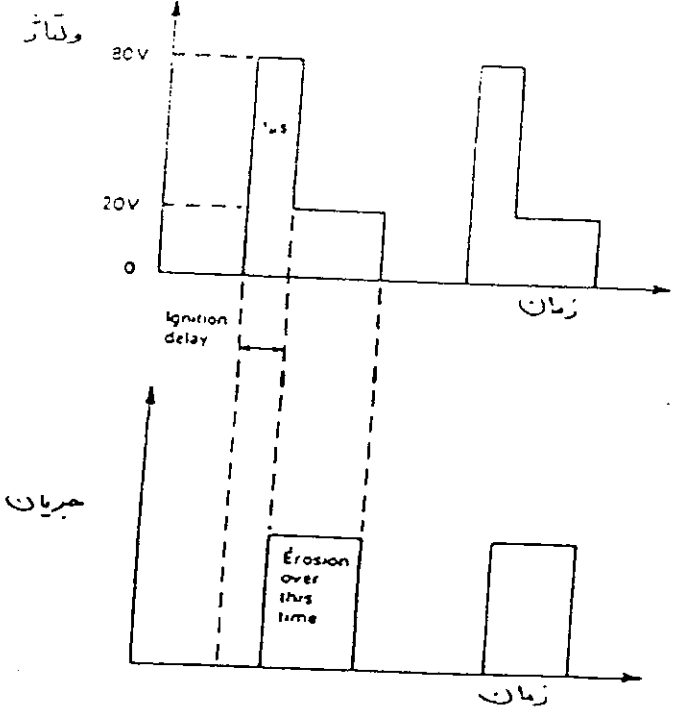
میزان جریان من ۱ تا ۴۰ آمپر
 میزبان وقت زبری ۶ تا ۳۰۰ ولت
 زمان روشن کردن پالس من ۹ میکروثانیه بیشتر
 زمان خاموشی پالس ۱۰ میکروثانیه
 با فرکانسهای از پالس ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز
 برای ماشینهای از پالس ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ هرتز



شکل (۲-۴) نمونه ای از EDM با کنترل پالس های مترادف



شکل (۲-۵) شکل موج مربعی شکل ترانزیتور پالس های کنترل شده



شکل (۲-۶) مشخصات ولتاژ و جریان برای ترانزیتور پالس های کنترل شده

از پالس های با انرژی بالا و فرکانس پایین جهت خشن کاری با سرعت بار برداری بالا و
صافن سطح با این ارتفاع می شود. از پالس های کم انرژی با فرکانس بالا نرخ بار برداری کمتر
حجت عملیات دقیق و صافنی سطح خوب استفاده می شود.

ژنراتور یا مولد پالس انرژی خود را از یک منبع $D.C.$ و از طریق یک تقویت و موج الکترونیکی
در فاصله بین دو الکترود (گپ ماشینکاری) تقدیم می شود. بزرگی جریان مورد استفاده معمولاً بین
 $1A$ تا $400A$ میباشد که از طریق تعیین میزان مقاربت و ولت ر ضعیف تقدیم (که معمولاً بین $10V$ تا $300V$)
ولت آرک arc و شکل کار (duty cycle) تعیین می شود.

زمان روشن بودن پالس بطور نمونه $90\mu s$ و زمان خاموش بودن پالس $10\mu s$ است.

در فاصله بین مدارات RC و مولد پالس، ژنراتور یا مولد پالس دارای نرخ بار برداری بسته و

خردگی ابزار الکتری برای سطح های شیب دارند.

عمل تخلیه الکتریکی در کرجیتتیت حاصله بین دو الکترود اتفاق می افتد. با تکرار تخلیه

الکتریکی محل بوجود آمدن جرم تخلیه الکتریکی تغییر می کند. جهت جلوگیری از انفال بین دو الکترود و

ایجاد آرک و آسیب دیدن سطح الکترود ابزار لازم است فاصله بین دو الکترود (گپ) کنترل شود تا

تحرایلی بایداری در گپ ایجاد نشود. همین خاطر از یک سر و مکاتیزم جهت کنترل ابتدای گپ استفاده می شود.

جهت کنترل گپ معمولاً از یک موتور $D.C.$ یا استپ موتور و سیستم هیدرولیک استفاده می شود.

مکانیزم بار برداری در EDM

در فرایند EDM از دو الکترود استفاده می شود. یکی از الکترودها یعنی الکترود ابزار از قبل شکل داده می شود

و از الکترود دیگر یعنی قطعه کار استفاده می شود. هردو الکترود در مایعی مانند پارافین و یا روغن سبک

غوطه ور میباشند. یک سر پالس های ولت، معمولاً شکل مستطیل با بزرگی 80 تا 120 ولت یا بسته و

فرکانس 5 KHz کلید هرتز بین دو الکترود که فاصله بین 5% تا 10% میلی متر است فاصله بار برد

لک می رود. ارتفاع از این پالس ها وقتی زمین دو الکترود موجب شکست الکتریکی مایع

دی الکتریک در آن مقدار $10\mu m$ تا $100\mu m$ می شود.

$$Y = 10 \mu m$$

در ماشینکاری از طرف تخلیه الکتریکی EDM / قطعه کار (که از جنس مادی است) از طریق
 تکرار زیاد تخلیه جرقه الکتریکی که توسط منبع انرژی با پس جریان متغیر تامین می شود، نظیر در اثر جریان
 سطح الکتریکی در ابعاد مختلف باریک بین ابزار (کاتد) و قطعه کار بار برداری می شود. در این فرایند
 جریان دی الکتریک بین ابزار و قطعه کار بافت و نشانه می شود. ابزار شکل داده شده توسط یک سوراخ
 بطرف قطعه کار پیشروی می دهند. تخلیه جرقه موجب شکست جریان الکتریکی در ابعاد مختلف
 باریک (تخلیه جرقه) می شود.

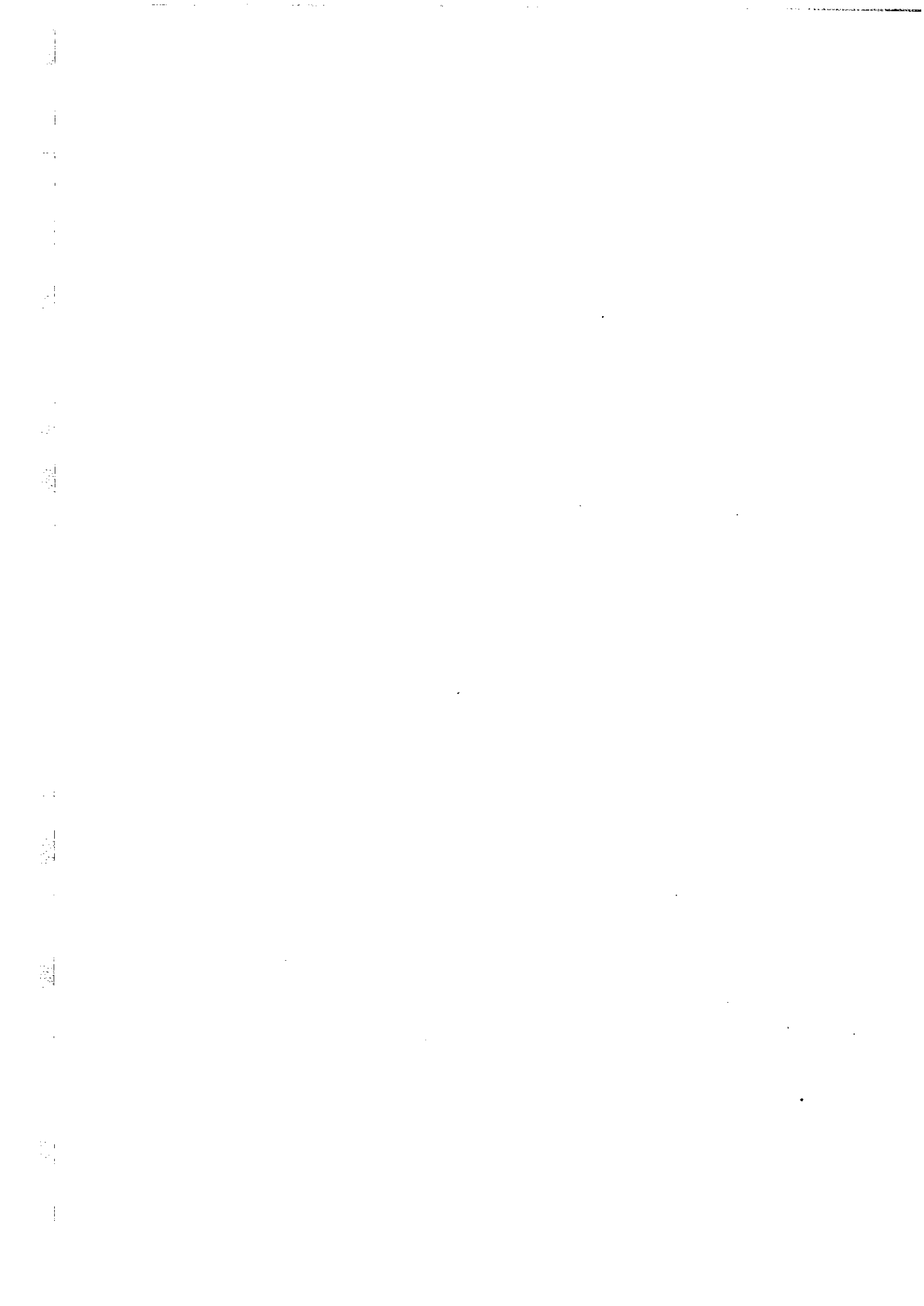
فرکانس و انرژی جرقه تنظیم و برده شده منبع انرژی جریان متغیر کنترل می شود. باریک شدن سوراخ موجب
 است که عمق آتش فاصله بین ابزار و قطعه کار (در فضای که ابزار بطرف قطعه کار پیش روی می کند) استفاده می شود
 منبع دی الکتریک موجب کمک کردن و دور کردن ذرات تصفیه شده و جدا شدن از قطعه کار می شود.

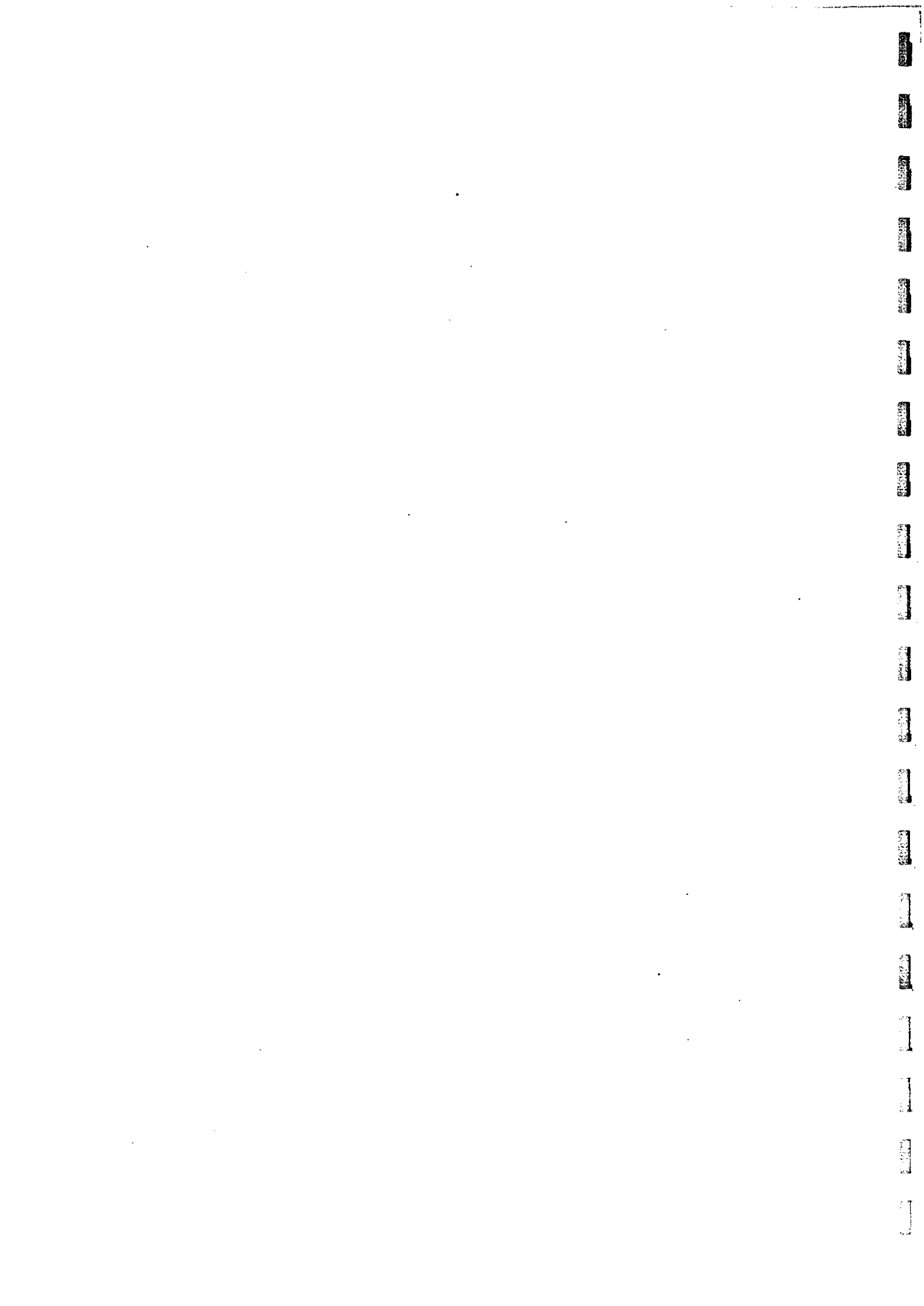
با افزایش فرکانس و کاهش جریان صاف سطح ~~تخلیه جرقه~~ پیدا می کند
 با کاهش فرکانس (یا افزایش طول زمان روشن بودن) و یا با افزایش جریان، نرخ بار برداری افزایش
 صاف سطح و ^{کاهش} در جانبی overcut افزایش می یابد.

عمده ابزارهای مورد استفاده در فرآیند الکتریکی EDM از جنس برنج مس، مس نیکل و ^{کامپوزیت} رافینیت است.
 هر چه در فاصله بین الکترودها برابر و قطعه کار کمتر باشد تخلیه جرقه دقیق تری و نرخ بار برداری کمتر است.
 در این فرایند خوردگی در ابزار و قطعه کار به صورتی آید. نسبت به این خوردگی سنگین به شکل موج دیده
 از منبع انرژی و جنس الکترود ابزار و قطعه کار دارد.

افزایش جریان → به این با انرژی بالا و فرکانس پایین → نرخ بار برداری زیاد و سطح صاف تر
 (به این با انرژی پایین و فرکانس زیاد → مرحله نهایی در فرآیند با صاف تر)

سیم سوراخ کردن چوب است که در سطح فاصله بین الکترود (Gap)





نمونه پارامترهای آزمایشات ماشینکاری از طریق EDM که قابل کنترل می باشند عبارتند از:

از ۵۰ تا ۲۰۰ ولت

رشد در بار

۵۰ Hz تا ۵۰۰ KHz

فرکانس

روغنهای هیدروکربن، آب مقطر

موج مایع غیر هادی (دی الکتریک)

۴۸۲ KPa

فشار جریان دی الکتریک

گرافیت، مس، برنج، تیتانیم، فولاد، منگنیز، نقره، نیکل

جنس الکترود ابزار

از ۰.۱۳ mm تا ۰.۱۳ mm میلی متر است

حداکثر سرعت برش EDM (۹۸)

انصال است دارد از آن جهت به قطعه و اتصال منفی به ابزار است

انصال است دارد قطب + و -

معروفه پارامترهای وابسته در فرایند ماشینکاری:

از ۰ تا ۵۰۰ A آمپر

میانگین جریان کار

تعداد بارش EDM با تیتانیم بیشتر از ۵۰۰ آمپر است (در هر بار)

از ۰.۱۳ mm تا ۰.۱۳ mm میلی متر است

فاصله بین ابزار و قطعه کار

از ۰.۰۵ mm تا ۰.۵ mm میلی متر

نسبت درکنش Overcut

از ۰.۵ تا ۲۶۶ cm³/hr تا ۲۶۶ cm³/hr

نرخ برداری مواد

از ۱:۵ تا ۱:۱۰

نسبت خوردگی قطعه کار به ابزار

از ۲ μm تا ۶۲ μm میکرو متر

دقت سطح

از ۰.۲۵ mm میلی متر

شعاع گوشه (گوشه عمیق ترین کاری شده)

از ۰.۰۵ mm/mm تا ۰.۰۰۵ میلی متر در میلی متر سطح جانبی

کوئیک یا تخلی شدن (Taper)

با افزایش دردت ابزار می توان فرایند کوئیک شدن قطعه کار را محدود نمود

ارتفاع در EDM کاربرد وسیع دارد. از این روش برای ماشینکاری مواد هار، در ساخت قالبها، ابزار دقیق هنده ها و شکاف منظم یا غیر منظم، ابزار سرافرازی لقطه 0.05 mm میلان در تا سه دقیقه نیز میسر می آید که در حجم اول کاربرد آن ۵۰ تن می رسد. ارتفاع در این روش چرخش الکترود ابزار بطور قطعی کار بیشتر در میانه های آن در سوراخها و ماشینکاری عمود

از حالتی که EDM در ساخت قالبها و تفکیک و تولید انبوه بعضی از قطعات استفاده می شود در این روش جهت ماشینکاری قطعات کلسند و شکل داران شدنی فیزیکی با عرض 0.05 mm تا 2.0 mm بیشتر

$$0.05 \text{ mm} \text{ till } 0.40 \text{ mm}$$

استفاده می شود.

نرخ کار بردار بین 0.05 تا $165 \text{ cm}^3/\text{hr/A}$ سانتی متر مکعب در ساعت در هوا کربن
 شعاع گوشه 0.1 mm تا 1.6 mm میسر می آید

$$\pm 0.025 \text{ mm} \text{ میلی متر}$$

تولرانس عمیق ماشینکاری فراتر می رود

$$\pm 0.005 \text{ mm} \text{ میلی متر (با انتخاب دقت همراه ماشینکاری)}$$

تولرانس عمیق قابل اندازه گیری

$$\text{حجم مواد برداری شده از قطعه کار} = \text{حجم خوردگی}$$

حجم خوردگی قطعه کار است. ابزار

$$\text{حجم مواد مصرفی از ابزار}$$

$$\frac{\text{عمق برش}}{\text{طول الکترود معوض شده}} = \text{نسبت خوردگی متوسط}$$

نسبت خوردگی متوسط

با افزایش فرکانس جرقه، همانند آنچه می شود. همانند سطح خوردگی 12.5 mm تا 1.25 mm میسر می آید. نوعاً قابل معوض است.
 از میان سطح بین 1.25 mm تا 3.2 mm میسر می آید. نوعاً قابل معوض است.
 بر این اساس می توان همانند سطحی بین 0.05 تا 1 mm میسر می آید. نوعاً قابل معوض است.
 با افزایش انرژی جرقه، اندازه حفره بیشتر می شود. همچنین با کاهش فرکانس جرقه، اندازه حفره بیشتر می شود.

علاوه بر آنکه توضیح داده شد EDM یکی از روش های ماشینکاری و براده برداری است

که در آن قطعه کار بر وسیله نظایه الکتریکی با برداری می شود. در این فرایند از ولتاژهای

متعلق بین ابزار و قطعه کار که در فاصله نزدیک و کنترل شده ای از هم ریزید و انرژی و در سیال غیر هادی

الکتریکی غوطه ور می باشند. ولتاژ عامل ایجاد جرقه بین ۳۰-۶۰ ولت میباشد. شدت

جریان جرقه معمولاً از ۱-۴۰۰ آمپر و زمان روشن پالس معمولاً بین ۲۰۰-۱۰۰۰ میکروثانیه

زمان خاموشی بین دو پالس معمولاً بین ۱۵۰-۱ میکروثانیه و فاصله بین ابزار و قطعه کار

تیب در حدود ۲۰۰-۵ میکرومتر است. ماشین های EDM بطور کلی از سه قسمت زیر تشکیل شده اند:

۱- بدنه و اجزاء مکانیکی

۲- سیستم سیال غیر هادی الکتریکی

۳- ژنراتور سولید قدرت

۴- سیستم کنترل گیب یا فاصله بین دو الکترود (قطعه کار و ابزار)

در ماشین های EDM از نوع wire cut علاوه بر سه قسمت فوق را با سیستم تغذیه سیم نیز می بینیم

در سیستم کنترل لب آن تعداد کنترل کامپیوتری بیشتر و کامپیوتر توسط سیستم های حرکتی و غیره وظیفه

در سیستم تغذیه سیم را بر عهده می آورد. در ماشین های EDM از نوع Die-sinking از

سیال دی الکتریک که برای پایه دستی میباشد استفاده می شود. اما در Wirecut از

آب دی یونیزه (استفاده نمی شود. در EDM از سردی مانند مس، برنج،

گرافیت، فولاد، مس-تنگستن و غیره استفاده می شود. در این فرایند ابزار را از

جنس برنج، مس، گرافیت و غیره که به آسانی قابل شکل دادن و ماشینکاری می باشند می سازند

کلمه قطعات که در این مطلب هدایت الکتریکی و یا هادی می تواند با استفاده از فرایند

EDM ماشینکاری نمود.

پارامترهای زیادی در فرایند ماشینکاری زبرکاری EDM موثر می باشند که عبارتند از:

۱- دی الکتریک یا مایع غیر هادی

۱- دی الکتریک

حالت مهم در انتخاب تخلیه الکتریکی در استاندارد شکاف باریک بین ابزار (کاتد) و قطعه کار (آنود) از مایع دی الکتریک استفاده می شود. از دی الکتریک به منظور اهداف زیر استفاده می شود:

۱- مایع دی الکتریک تحت فشار بین دو الکترود پاشیده می شود و محصول ماشینکاری را از بین در الکترود دور می نماید

۲- مایع دی الکتریک در حین خشک شدن دو الکترود (قطعه و ابزار) می شود.

۳- مایع دی الکتریک در ابتدای پهنای عایق عمل می کند

۴- وقتی ولتاژ به حد کافی بین دو الکترود رسیده در استاندارد شکاف باریک تخلیه جرقه مایع دی الکتریک برنیزه شده و در آن سطح هدایت هادی در می آید و اجازه عبور جریان الکتریکی میدهد.

تغییر انرژی الکتریکی موجب تبخیر و تجزیه مایع دی الکتریک روی شکاف باریک قرار داده می شود در نتیجه ای که تخلیه الکتریکی اتفاق می افتد درجه حرارت به بیش از ۲۰ هزار درجه سانتیگراد میرسد.

مایع دی الکتریک با این دارای خصوصیات زیر باشد:

الف- جریان مایع دی الکتریک باید از نظر غیر هادی بودن تا قبل از ولتاژ شکست و ایجاد جرقه مستحکم و مقابل اطمینان باشد.

ب- قابلیت برنیزه شدن سریع بعد از ولتاژ شکست و ایجاد جرقه

درصد تبخیر از مایع دی الکتریک مناسب و تحت فشار کافی استفاده شود موجب ایجاد آرک Arc

و افزایش قدرت کنی ابزار می شود. جریان الکتریک خوب بالاترین دایره خصوصیات زیر باشد

۱- دارای چسبندگی کم Low viscosity

۲- نرخ انتقال حرارت بالا high heat transfer rate

۳- استحکام مایع دی الکتریک تا قبل از ولتاژ شکست

۴- مرطوب پاشش بالا

نوع مواد ابزار

در فرایند EDM - عنصر مواد ابزار مورد استفاده اثر مستقیم در واید ماسینگری دارد به آنکه از منابع قدرت تلفی تلفیه شود. از جمله در الکتریکی می توان بعنوان ابزار استفاده نمود اما غالباً از گرافیت، بزیج، مس، آلومینم، تنگستن - مس استفاده می شود.

در انتخاب مواد ابزار باسی به کیفیت و شکل واید ماسینگری آن توجه نمود. مس اولین موادی است که دارای کیفیت مناسب و شکل دادن آن به آن می امکان پذیر است اما دارای نقطه ذوب پائین (1083°C) میباشد که موجب خوردگی ابزار می شود از تنگستن - مس

صلت داشتن نقطه ذوب بالا تر و خوردگی کمتر ابزار در ماسینگری سوراخ عمیق استفاده می شود از گرافیت که در سطح کمتر دای استناد می شود. اما از منبسط شدت خوردگی 15 کمتر تلفیه می شود

کمترین الکترود جهت ابزار، موادی هستند که دارای کمترین مقاومت الکتریکی، نقطه ذوب بالا و دارای پایداری (Stability) بالا ^{می باشد} ابعاده ای است. ^{می باشد} ابعادش در طول زمان تغییر نمی نماید و خاصیت تلفیه ای آن کمترین عوامل مؤثر در فرایند ماسینگری، نسبت خوردگی ابزار پایداری ماسینگری منبع تغذیه مدار

مورد استفاده میباشد

کمترین مقاومت الکتریکی
نقطه ذوب بالا
پایداری

کمترین تلفیه

در فرایند EDM سطح حفره‌های ایجاد شده با افزایش انرژی حرقه و کاهش فرکانس افزایش می‌یابد. شکل خدسی حفره‌ها با ایجاد شده توسط فریب از حرقه‌های EDM بستن؛ نوع مواد و انرژی حرقه دارد. این بطوریکه نسبت فرکانس کم عمق را برای با نسبت سطح عمق ۱۰:۵۰ می‌باشد. در شرایط اولیه الکتریکی بستن قطر حفره تقریباً با هم برابر است اما عمق حفره‌ها بستن به جنس و قطعه ماشینکاری شده دارد. بطوریکه اندازه حفره شکل آن همچنین رابطه‌ای با جنس ابزار ندارد (بجز مواردی که در این زمینه ذکر شده است).

در EDM از برش سطح ماشینکاری شده بستگی مستقیم با افزایش طول زمان حرقه (Tsp) شدت جریان حرقه Isp و ولتاژ خدیه (Vsp) دارد. در مورد طول زمان حرقه مقدار بسته‌ای جهت بارگذاری تراش حرقه وجود دارد. صحنی سطح برش به عوامل پایداری وابسته است. رابطه بین دو الکترود (کاپ) و جریان دی الکتریک دارد.

$$\frac{قطر}{عمق} = \frac{1}{5}$$

در این رابطه ولتاژ و فرکانس به هم وابسته است. قطر حفره با هم برابر است. که عمق حفره بستگی به جنس قطعه کار دارد.

در این رابطه پایداری فرکانس بستگی به جنس مواد الکترود و حرقه دی الکتریک دارد.

VI+	t	طول زمان حرقه	} زبری سطح بستگی مستقیم دارد
	I	شدت جریان حرقه	
	v	ولتاژ حرقه	

در دستکاری: روش EDM می توان شروع حفرت ای با هویتگی دوازده ای سنت به سطح ای ایجاد نمود

در EDM می توان استاده قطعه کار را سخت نمود و سپس آنرا دستکاری نمود

صیقل پذیری بسیار کمی دارد

در بسیاری از موارد نیازی به مکرر کردن قطعه نیست بلکه بارنده نمی باشد

در EDM می توان سوراخهایی به قطر $3 - 2$ mm در قطعه ایجاد نمود

در EDM می توان سوراخهایی که نسبت طول به قطر آن $1:200$ باشد در قطعه فلزی با سختی بالا ایجاد نمود

در قطعاتی که بر اثر برشکاری آلودگی از روش EDM ساخته می شوند برای بهتر از نظر آن است که در روش EDM

از فرآیند EDM بیشتر در ساخت قالب های برشکاری، استروژن، آهنگر و غیره استفاده می شود

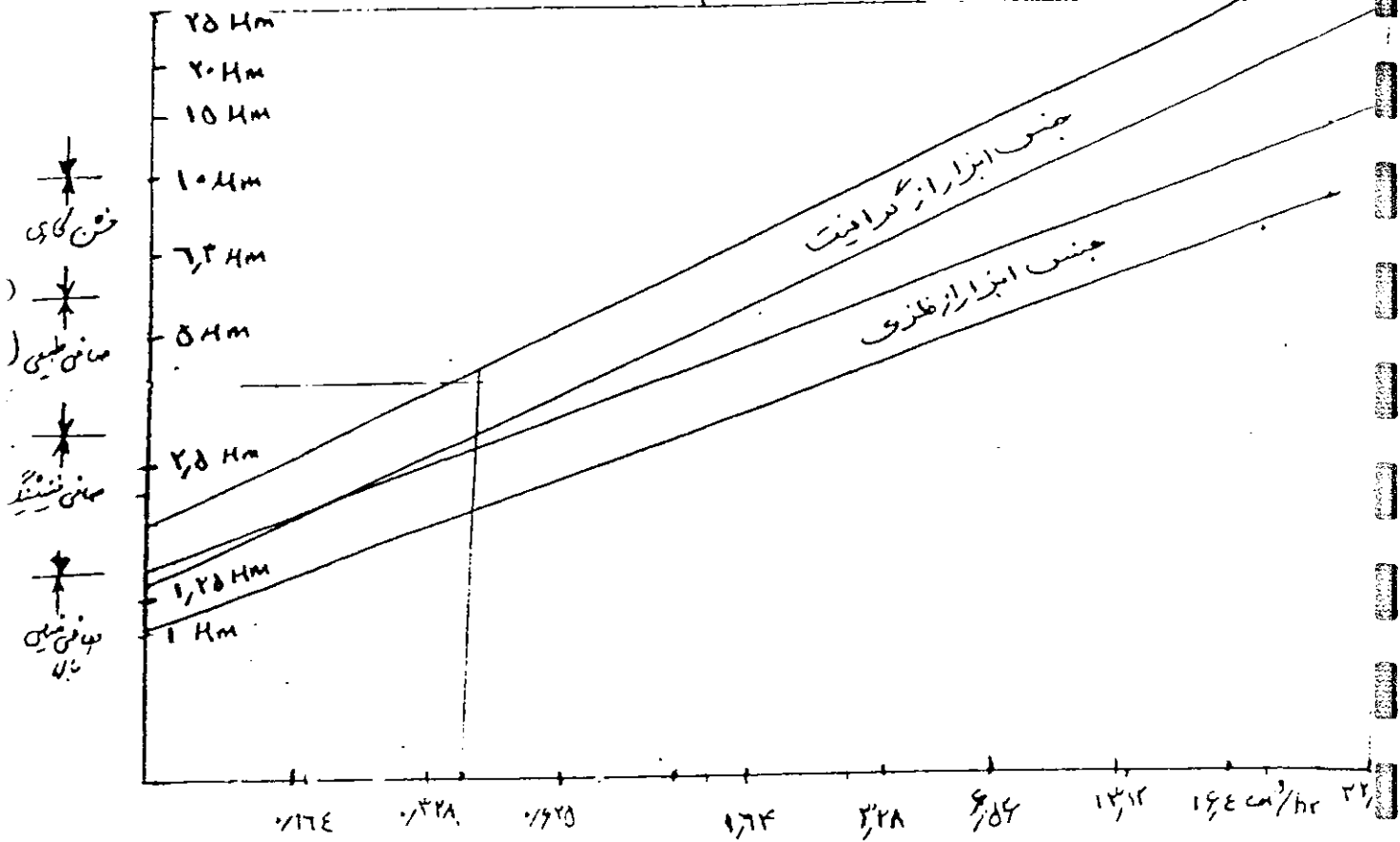
از EDM می توان در تولید اسلحه های سرد استفاده نمود و نیز در ایجاد سوراخ های عمیق در مواد سخت و در برشکاری

ایجاد سوراخ در یک تپش زیر $50 \mu m$ - ضخامت $25 \mu m$ - میان سطح برش و
و در استراحت در حدود $1 \mu m \pm$ می توان در قطعه ایجاد نمود

در EDM می توان از ابزارهایی بر وزن 2000 kg و قطعات کاری بزرگ 50000 kg را ساخت

50+

2+



شکل (۳) نرخ باربرداری بر حسب سطح مختلف در یک ساعت

سطح فراسینه	مکانی سطح mm	نرخ باربرداری cm ³ /hr		
توسی سطح عالی	< 1.4	< 0.05	< 0.0054	0.014 تا 0.015
مکانی سطح خوب	1.4 تا 3.2	0.05 تا 0.3	0.0054 تا 0.0071	0.025 تا 0.033
مکانی سطح نروال	3.2 تا 6.3	0.3 تا 6.9	0.0071 تا 0.011	0.054 تا 0.084
مکانی سطح فرس	6.3 تا 12.5	6.9 تا 24.6	0.011 تا 0.017	0.114 تا 0.133
مکانی سطح فرسین	> 12.5	> 24.6	> 0.017	تا 0.134

جدول (۲) رابطه بین نرخ باربرداری و مکانی سطح

جران A	نرخ باربرداری با استفاده از جنس کرافیت از الکترود در واحد cm ³ /hr	نرخ باربرداری با استفاده از الکترود فلزی cm ³ /hr
۲۵	۲۴.۶	۱۲.۳
۵۰	۴۹.۲	۲۴.۶ تا ۲۹.۵
۱۰۰	۹۰.۱	۴۹.۲ تا ۷۲.۱
۲۰۰	۱۸۰.۵	-
۴۰۰	۳۶۱	-

جدول (۳) نرخ باربرداری در EDM

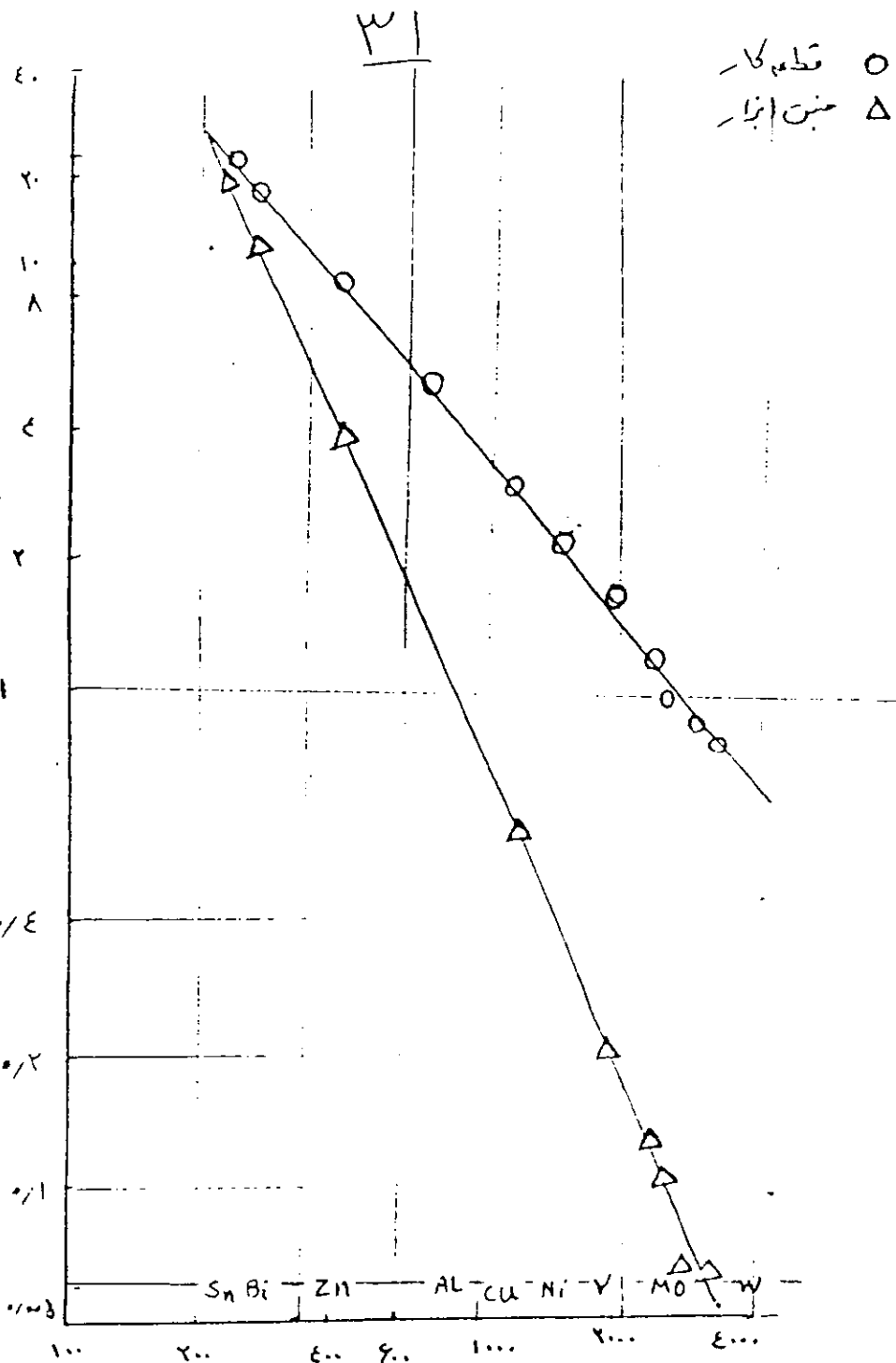
جنس الکترود ابزار	نقطه زرد C	نقطه چوب C	گرمایه تبخیر در هر سانتیگراد 1 cm^3 cal/cm^3	هدایت گرمایی در صد	هدایت الکتریکی در صد	انساط حرارتی در هر درجه سانتیگراد $\times 10^{-2}$	ارتعاش Psi	Psi $\times 10^6$
مس	۱,۰۸۳	۲۵۸۰ ۷۶۳	۱۲۷۴۰	۹۴,۳	۹۶,۵	۱۶	۲۵۰۰۰	۱۸
گرافیت	*	۴۰۰۰	۲۰۰۰۰	۲۰	۰,۱	۴,۵	۵۰۰۰	۰,۱۸۶
تنگستن	۲,۲۹۵	۵۹۳۰	۲۲۴۸۰	۲۹,۶	۴۸,۱	۴,۶	۶۰۰۰۰۰	۵۱
آهن	۱,۵۴۵	۲۸۰۰	۱۶۹۰۰	۱۶,۲	۱۶,۲	۱۵	۴۰۰۰۰	۲۷

جدول (۵) خصوصیات جنس الکترود ابزار در EDM

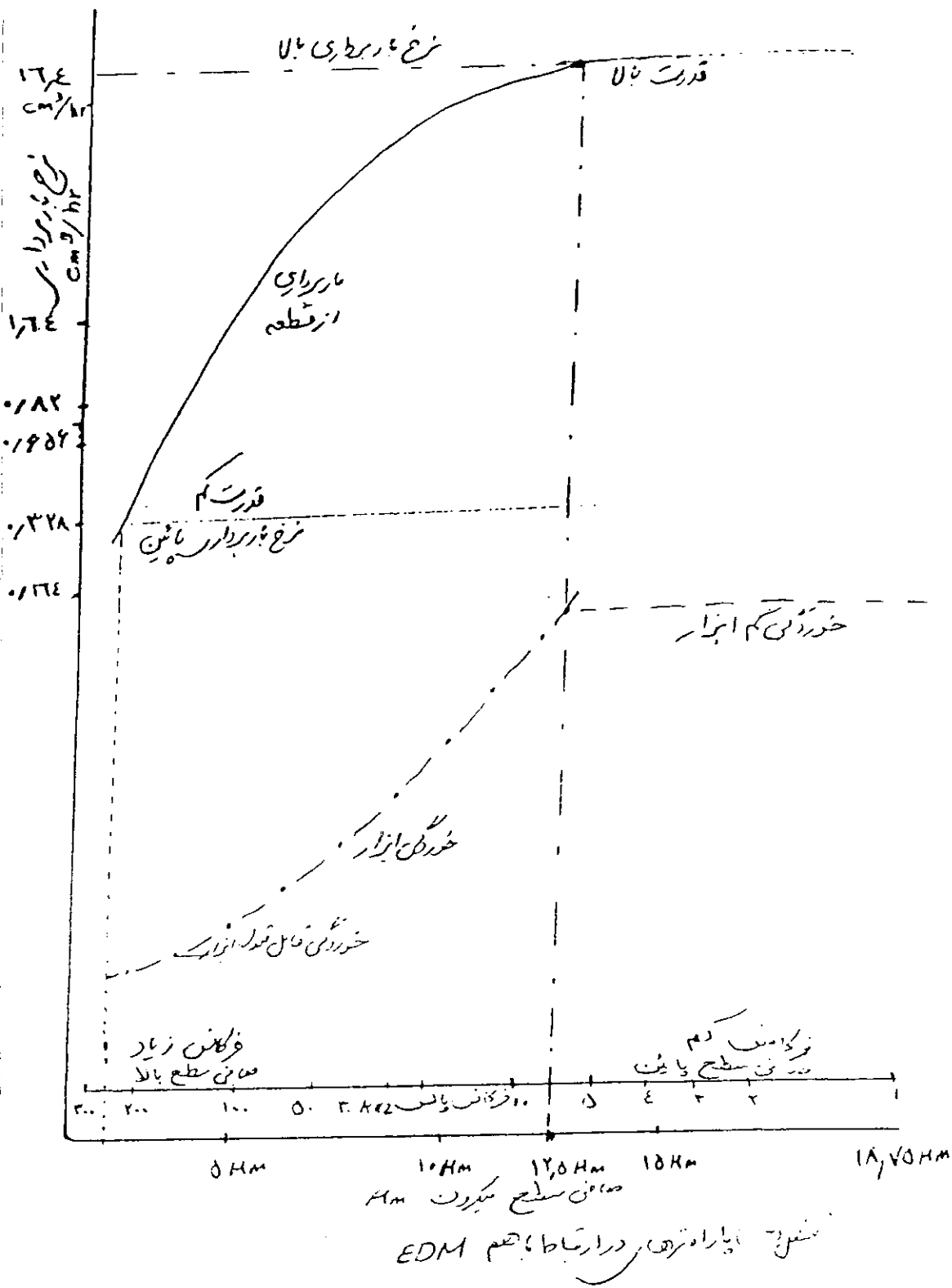
جنس الکترود ابزار	ترتیب اولویت	شکل	نسبت طولی نوشته‌ها در مرحله (مینیستیل) ۱:۱	نسبت طولی در انتخاب در خشن‌کاری	خونه نسبی	تابانندگی نسبی	کاربردهای توصیف شده	مزایای کم توجهی غیرتوجه
گرافیت	۱	مدیرد لوله بزرگ	۵:۱	۱۰۰:۱	پائین	عالی	ابزارهای	
مس	۲	تسمه شیاردار	۱:۱	۲:۱	متوسط	خوب	سوراخ‌های بزرگ	دقت بالا
مس - گرافیت	۳	بلوک / مخروط	۲:۱	۴:۱	متوسط	خوب		
برنج	۴	تسمه شیاردار	۰,۷:۱	۱:۱	پائین	خوب	رایج در تمام	دقت بالا
آهن زرد سردی	۵	دسته‌های	۰,۷:۱	۲:۱	پائین	متوسط	بازوهای بلند	سوراخ‌های
نولار	۶	در تمام اشکال	۱:۱	۲:۱	پائین	عالی	سوراخ‌های عمیق	تاریک
مس - تنگستن	۷	تسمه شیاردار سلجق‌تات	۳:۱	۸:۱	متوسط	متوسط	شکل‌های پیچیده	سلجق‌زیر
نقره - تنگستن	۸	سیلندر	۸:۱	۱۲:۱	بالا	متوسط	سوراخ‌های کوچک	سلجق‌زیر
تنگستن	۹	سیم / میله	۵:۱	۱۰:۱	پایین	متوسط	سوراخ‌های عمیق	سوراخ‌های عمیق

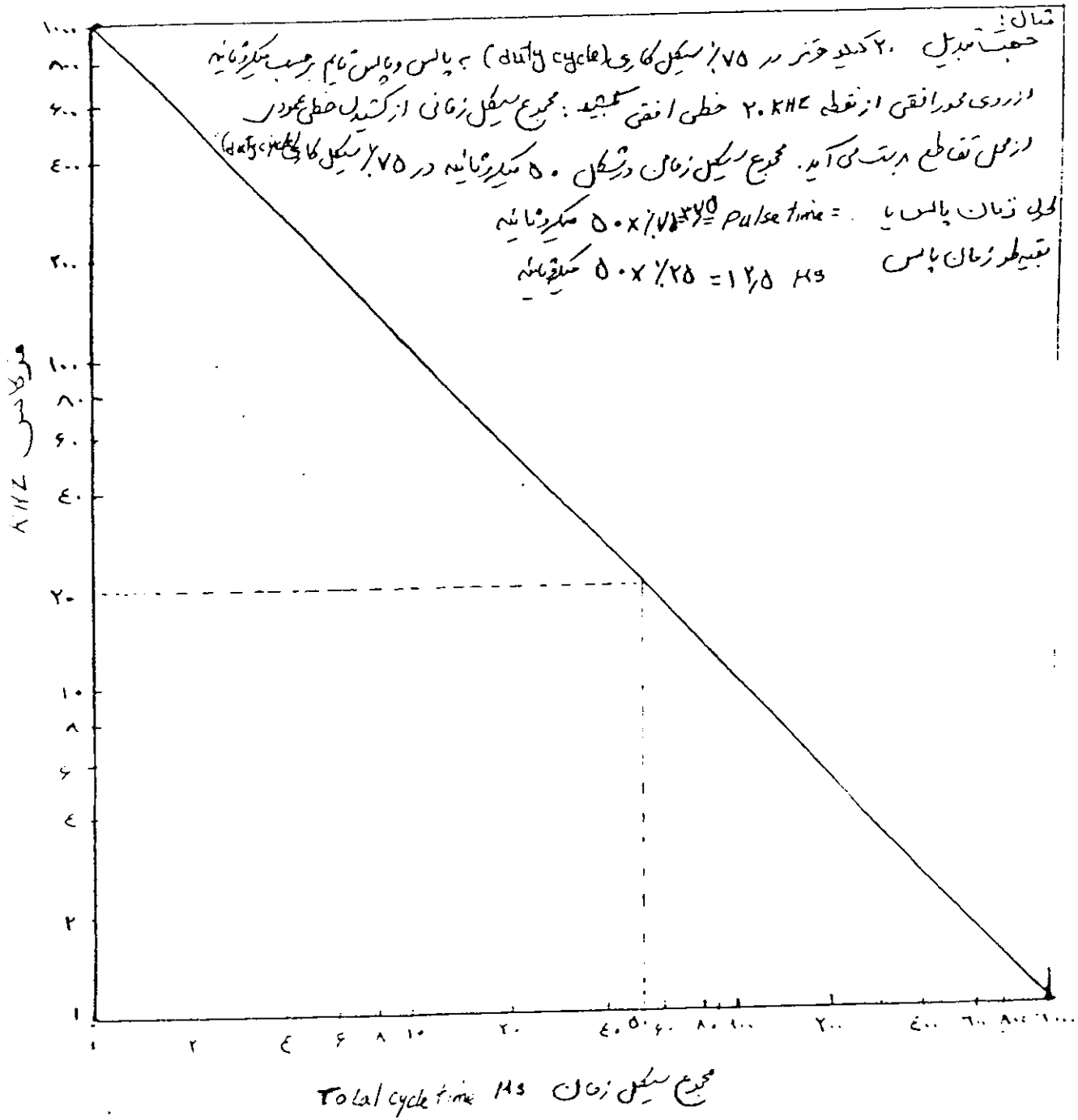
جدول (۶) انتخاب جنس ابزار

منبع باربروداچک (المنج ملب در ترمودینامیک) (۱۰۴)



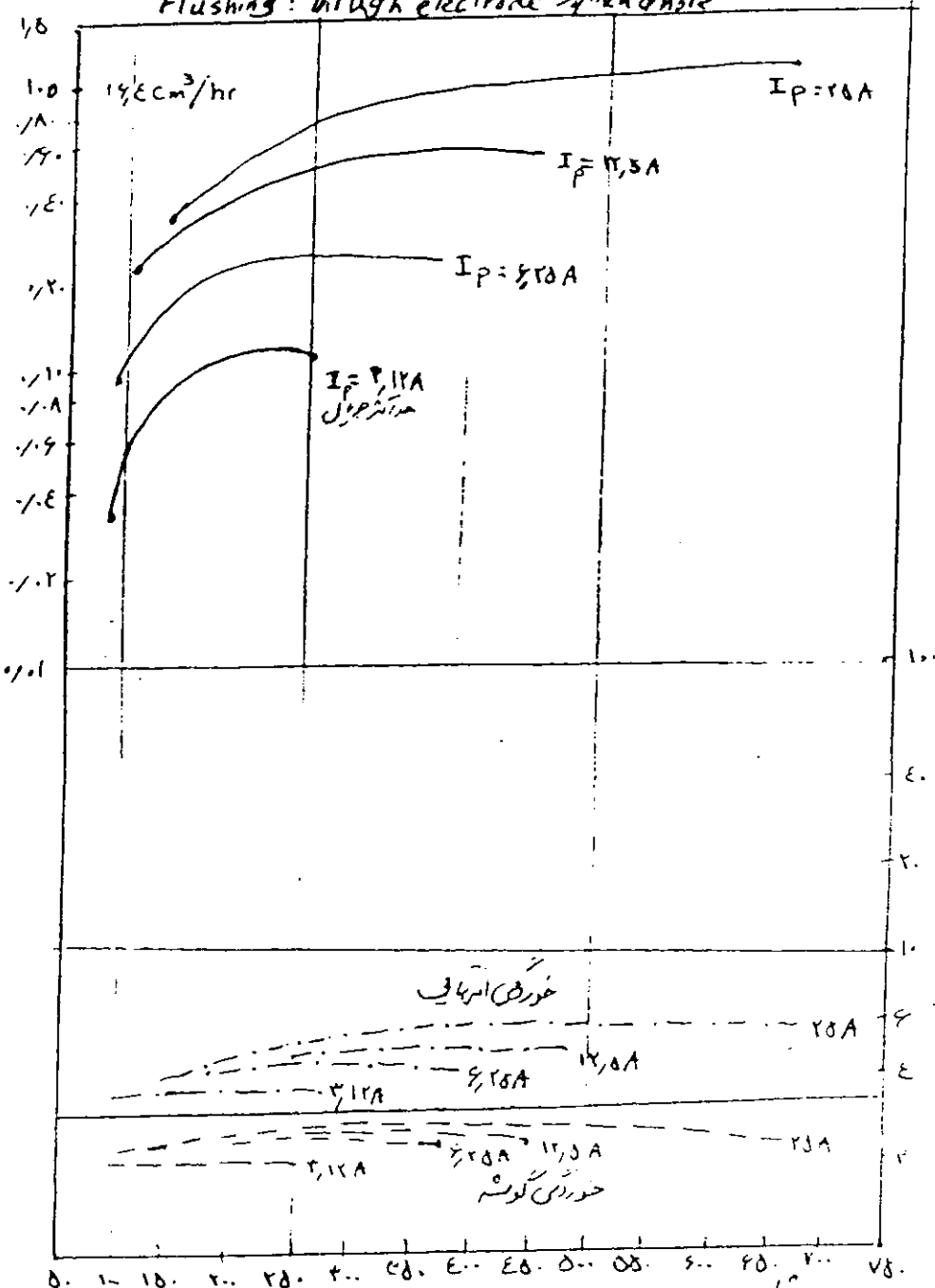
شکل (۵) رابطه ذوب (سانتی گراد)





شکل (۷) رابطه بین سیکل زمان و فرکانس

Electrode size $1 \text{ in} \times 1 \text{ in} \times 4 \text{ in}$ $\gamma = \text{platinum}$
 Flushing: Through electrode $\frac{1}{4}$ inch hole



میزان بار برداشتی / سطح سطح در دست

شکل ۱ (مقادیر سطح و سطح (برای اینج rms)

3.125 A 12.5 A 18.75 A

شکل ۲: نمودار انرژی از جنس فولاد ۲ در تطبیق منحنی وصل شده

شرایط الف	شرایط ب
نرخ باربرداری زیاد زبری سطح زیاد مزگانس کم (طول چرخه میل زمان) انرژی آرک arc زیاد (آب زیاد) فاصله زیاد بین ابزار و قطعه کار گشادگی زیاد OVER CUT خوردگی متوسط ابزار	نرخ باربرداری کم زبری سطح کم (صافی بالا) مزگانس زیاد (short cycling) انرژی آرک arc کم (آب کم و زمان کم) فاصله کوتاه بین ابزار و قطعه کار گشادگی کم خوردگی کم ابزار

جدول (۷) انتخاب شرایط و پارامترها در EDM

قطب الکترود ابزار		موارد	
مثبت +	منفی -		
متوسط یا پایین زیاد خوب برای زبری سطح عالی خوب رنگینی؛ پارامترهای برابری	متوسط یا بالا متوسط خوب برای حشن کاری خوب رنگینی؛ پارامترهای برابری	نرخ باربرداری نسبت خوردگی - تطعمه کار زبری سطح فولادها مواد دیگر	
ولتاژ مدار باز (ولت)	قطب الکترود ابزار	جنس مواد الکترود ابزار	جنس مواد قطعه کار
تا ۲۷۰ ولت	مثبت	فولاد	فولاد
تا ۱۰۰ ولت	مثبت	WCU	فولاد
تا ۱۰۰ ولت	مثبت	گرافیت	فولاد
تا ۱۵۰ ولت	مثبت	مس CU	فولاد
تا ۲۷۰ ولت	منفی	مس CU	فولاد
تا ۱۰۰ ولت	مثبت	WCU	مس
تا ۱۰۰ ولت	منفی	CU	مس
تا ۲۷۰ ولت	منفی	WCU	کاربایدها

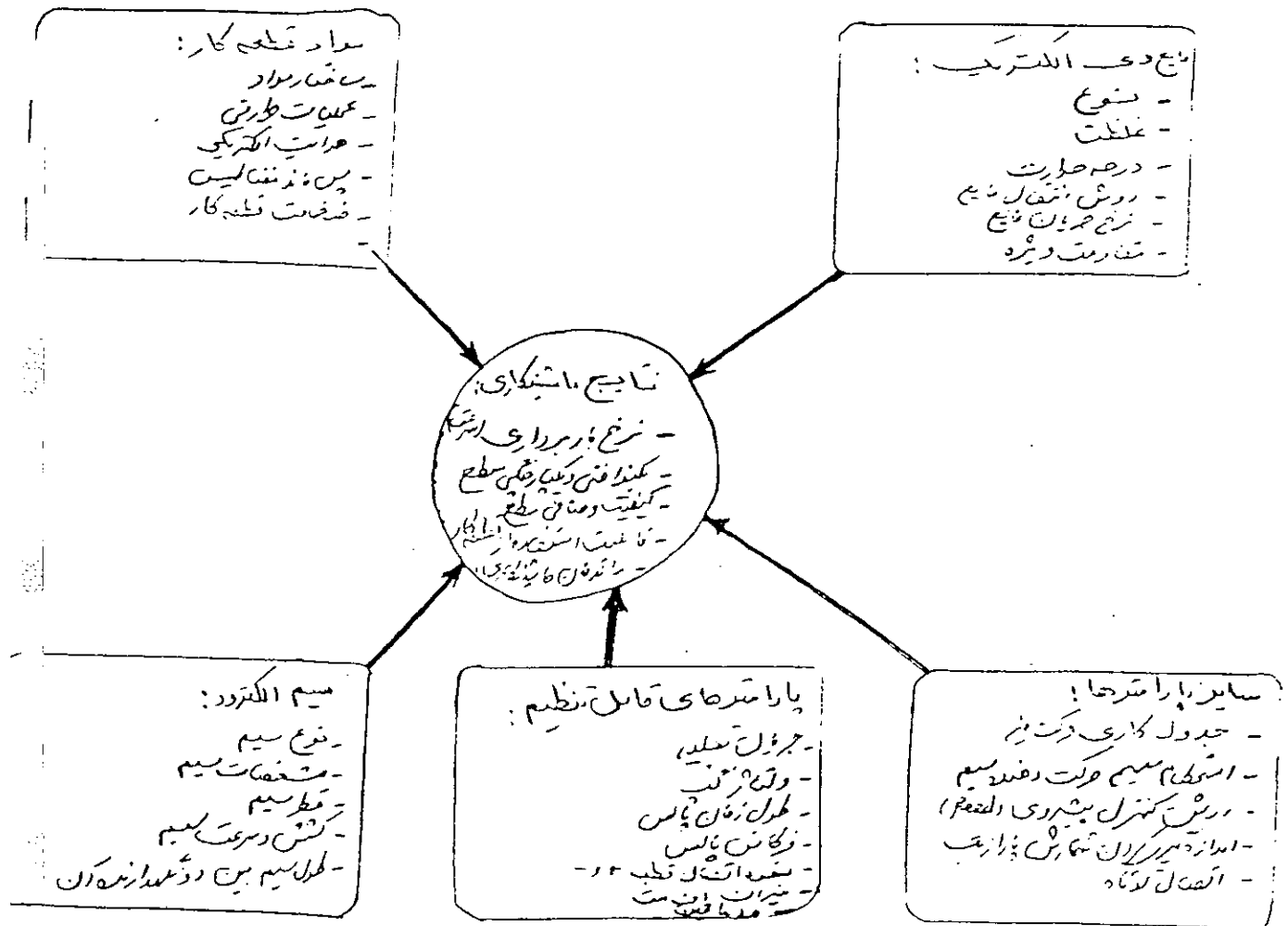
جدول (۸) دستورالعمل تطبیقها در EDM و ولتاژ مدار باز

مهمترین مشخصه (EDM) ماشینکاری از لحاظ تخلیه الکتریکی قابلیت ماشینکاری اشکال پیچیده
 و تکرارپذیری بالا و ماشینکاری مواد بسیار سخت و شکننده می باشد که بدین ابزار می توان از جنس نرم تر
 ساخته می شود ساخته می شود. امروزه با استفاده از ماشینکاری CNC EDM، کنترل متغیرها خودکار
 انجام می شود و استفاده از درگدر ۷ و ۸ تولید اشکال گوناگون در قطعه امکان پذیر می باشد.

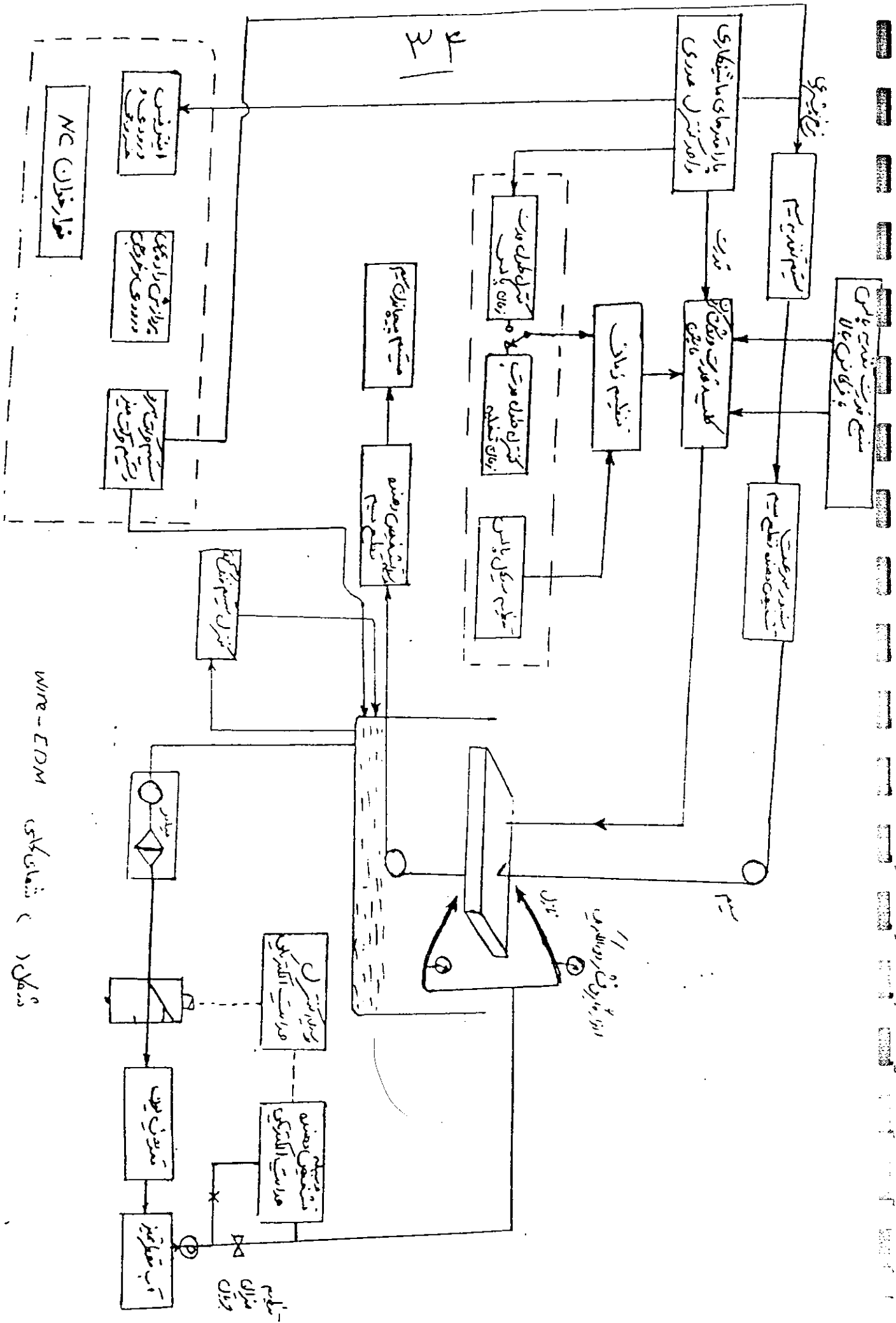
EDM یک فرایند تخصصی است. زانید که با استفاده از ترموالکتریک و یک سر برقیه در این بین ابزار و
 قطعه کاری که در مایع دی الکتریک غوطه در اند موجب تبخیر و ایجاد حفره و ماشینکاری قطعه می شود.

Wire-EDM تخلیه جرقه بین سیم الکترود نازک (معمولاً کمتر از ۰.۵ میلی متر) بعد از ابزار و
 قطعه کار در مایع دی الکتریک آب مقطر deionized water موجب تبخیر و برابری قطعه کاری می شود و در

ایجاد پیچیده دو نیم مورد شکل برقیه می کنترل عدد NC ایجاد نماید.
 پارامترهای مورد ماشینکاری از طریق Wire-EDM در شکل (۱) نشان داده است.



شکل (۱-۲) پارامترهای مورد Wire-EDM



WIRE-EDM شماری کای (شکل)

شکل

به بود فاکتورهای مورد نیاز EDM - wire امروزه ماشین های ب قه آنه که دارا خصوصیات زیر میباشد

- قدرت جیم تراش
- سیم ها جدید برای الکترو و ابزار
- مقاطع متنوع از سیم ها
- پیوره هوشمندی ماشین
- تکنیک های بهتر در ماشین دی الکترونیک
- خصوصیات مواد مختلف قطع کار

در دهه (۱۹۸۰-۱۹۷۰) عمده فعالیت های عمده در جهت بهبود ماشین های EDM - wire بیشتر در طراحی ماشین تراش و استفاده از سخت افزارهای جدید الکترونیکی بود. امروزه استفاده از سیم های جدید موجب افزایش سرعت ماشین کاری بین ۴۰ تا ۱۰۰ درصد که نسبت به تفاوت قطعه کار دارد شده است

تکامل افزایش سرعت ماشین کاری در شکل () در جدول زیر مشاهده می شود بین ۱۹۸۲ تا ۱۹۷۲ نشان داده شده است

سیم EDM نسبت به سایر مواد الکتریکی خاصیت الکتریکی آن دارد. در ضمن خاصیت کارتریکی خود را نیز از دست میدهد. با کنترل انتقال انرژی بین سیم و تراش و قطع کار فواید و تکنیک های تراش را می توان بدین نحو در واقع با کنترل و حداقل رساندن آن به تراش فواید و مزایای متعددی جهت انتخاب سیم از آن از دو طریق عمل نمود

- ۱- استفاده از درجه های مختلف الکتریسیته جهت تراش و تراش (طریقه)
- ۲- ارتقاء دراز سیم در دراز مقادیر الکتریسیته (در این حالت با افزایش سیم دراز میسر می آید و نیز در این روش)

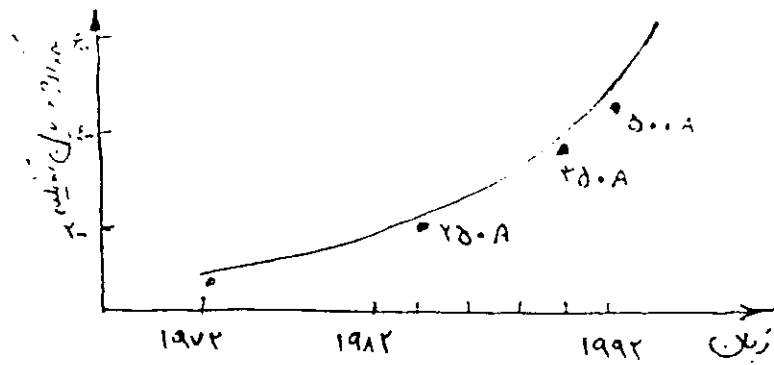
آهن	آکسید	کربن	سرب
۸.۷	۲.۷۲	۶.۶۶	۱.۶۸

اطلاعات فنی برای EDM - wire چارملز Robofil 2020

ولتاژ زبراند - بارزنا	ولت $U_i = 200$
ولتاژ تغذیه U_e	ولت $U_e = 20$
حد اکثر جریان تغذیه I_e	آمپر $I_e = 550$
جریان متوسط تغذیه I_e	آمپر $I_e = 178$
قدرت تغذیه متوسط P_e	وات $P_e = 4575$
قطر سیم d	میکرومتر $d = 25.0 \pm 0.02$
فاصله جوشن ماس	میلی متر ۱۰۰

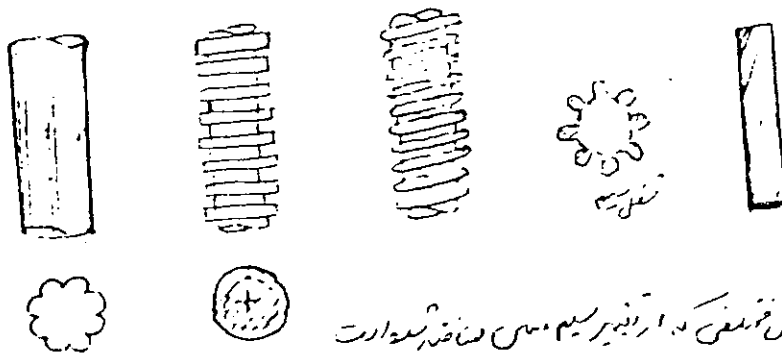
مساحت سطح مقطع الکتریکی بهترین مواد جهت الکترود می باشد. هدایت الکتریکی آهن $\frac{1}{8}$ مس می باشد و برنج دارای $\frac{1}{4}$ هدایت الکتریکی مس می باشد. آلومینیم دارای $\frac{1}{6}$ هدایت الکتریکی مس می باشد.

با افتادن قدرت پارس در سیم قطر سیم افزایش می یابد (شکل د) که عامل افزایش حد اکثر جریان تغذیه الکتریکی در طول سیم است (۱۹۶۲-۱۹۷۲) مثال داده شده است.



شکل د (شکل حد اکثر جریان تغذیه در طول سیم است (۱۹۶۲-۱۹۷۲)

شکل انبار عمده به شکل سیم است که ای می باشد اما اگر شکل آن کمتر استفاده می شود در شکل (شکل داده شده است)



شکل د (شکل مختلف از تغییر سیم مس و استفاده از آن است)

سند روش ساینه الکتریکی (EDG) Electrical Discharge Grinding

درایب روش (EDG) با برابری از مواد جاری الکتریکی از طریق تخلیه جرقه جاری در بین
انزله چرخشی در قطع کار که برسد، عرض دی الکتریک از هم جدا می‌شود، انجم می‌شود در این روش
انزله بصیرت چرخ سنگ زنی می‌باشد در جریان عبور از آن کم می‌باشد و فاصله بین انزله الکترود (سب)
جریان سرد نسیم کنترل می‌شود. به چرخ انزله عاقلی رفته و قطعه کار را ^{پایس} جریان متناوب اتصال می‌دهند
بر اساس اتصالی در قطعه کار را به قطب مثبت و انزله به قطب منفی وصل می‌شود. در این صورت، انزله
جریان در سطح، لافتن سرعت با برابری می‌شود اما در سطح نازلتری در قطعه ایجاد می‌شود و
در سطح اثرات حرارتی محسوس تر در قطعه می‌شود. خوردگی چرخ انزله نسبت به قطعه کار جریان، جنبش متوالی
مابین دی الکتریک و تیزی گوشه‌های قطعه کار دارد.

کاربرد اصلی ساینه EDG شکل می‌دهد که در این روش می‌توان دقت نسیم در برابری
مواد سخت مانند انزله از جنس کار باید، چرخنده‌های سختی از جنس سنگین یکبارند بهت آورد. این
در این روش نرخ برابری بیشتر از روش می‌باشد. علت این امر درایب روش انزله و قطعه کار را
فاصله راه رصیدگی بر روی مکانیکی بین آن وجود ندارد می‌توان اشکال هندسی شکسته را سنگ زنی
تمهین شاد ها تا زود یا فضاها تقویم است را سنگ زنی مورد.

نرخ برابری در EDG معمولاً بین ۰.۱ تا ۰.۱۵ اینچ مکعب در ساعت یا ۰.۰۰۲۵ تا ۰.۰۰۴۵ لیتر در ساعت
نسیم سطحی که از این روش حاصل می‌شود معمولاً بین ۰.۰۱۱ تا ۰.۰۲۱ میکرو متر است
متنوع در شعله‌ها و نسبت به انزله overcut استفاده دارد معمولاً بین ۰.۱۳ تا ۰.۱۴ میلی متر است
نسیم در شعله و معمولاً بین ۰.۰۰۵ تا ۰.۰۰۷ میلی متر است اما در نسیم ۰.۰۰۱۳ تا ۰.۰۰۱ میلی متر است

بازرسی زیانس حرمه در EDG مناره صافنی سطح 0.06 در حد بین 0.14 تا 0.22 میکروتر می شود.
در ب و بشیر و خاندن قدر سطح قطعه کار

در زمانه EDG با اثرهای عمیق دارد و در زیر این قطعات می کنند:

نوع منبع تغذیه:

نوع: احداث سطح با کنترل پاس

ولتاژ: بین 20 تا 400 ولت

فرکانس: بین 200 Hz تا 500 kHz

جریان: بین 0.05 A تا 200 A

چرخ ابزار:

نوع ضمن: گرانیت یا برنج

سرعت چرخ: بین 30 تا 180 m/min

سایح در: الکتریک: درغن معدوم کربن از صافنی گذرند

Gap سگاف بین ابزار قطعه کار: بین 0.13 تا 0.076 mm میلیمتر

نسبت های شدت در روش EDG در لغت و اندازه های مختلفی وجود دارد که منجر به کنترل سرعت چرخ ابزار در زمانه

چرخ شاق تند اسپیندل در ماشین ترا سر و کنترل جهت کنترل سرعت میز می باشد

خوردن چرخ ابزار نسبت قطعه کار در اثر تخلیه الکتریکی دارای طیفی از $100:1$ تا $1:1$ می باشد

ان الکتریکی نسبت آن $3:1$ (سه به یک) می باشد.

نسبت حجم خوردن ابزار از تقسیم حجم فلز برشته شده از قطعه کار به حجم فلز منقوش شده از چرخ ابزار می باشد.

$$\text{نسبت خوردگی حجمی} = \frac{\text{حجم فلز برداشته شده از قطعه کار}}{\text{حجم فلز منقوش شده از چرخ ابزار}}$$

در راستای سنجش EDG رابطه چرخ با ابزار و صافنی سطح به صورت زیر است. هر چه نرخ خرد برداری بیشتر باشد صافنی سطح تا مدت بیشتری در دسترس است.

۰/۸۲	۳/۲
۰/۴۹	۱/۶
۰/۰۳	۰/۴

مراحل انتخاب پارامترهای ماشینکاری EDM

۱	نوع مواد، شرایط ترمال و نقطه ذوب مواد	مشخصات مواد در نقشه فنی (قطعه)
۲	مکانی سطح مورد نیاز (عمیق یا ریز) نیاز	رجوع به نقشه طراحی قطعه
۳	حجم موادی که از قطعه خام باید برداشته شود	با استفاده از نقشه فنی و شکل قطعه خام، حجم موادی که قطعه خام باید برداشته شود بر حسب سائنی محاسبه کنید
۴	فرسایش مواد برداشته شده از قطعه (ماشینکاری)	رجوع به شکل ۴ و ۵ و جدول ۴
۵	برآورد زمان ماشینکاری	با تعیین موادی که با سائنی از قطعه برداشته شود بر نرخ باربری سائنی آید
۶	انتخاب جنبه مواد برای الکترود ابزار	رجوع به جدول ۶ و ۷
۷	انتخاب پارامترهای ماشینکاری	بر اساس بیعدین قطعه کار، الکترود ابزار، فرسایش و دقت مورد نیاز کیفیت، لازم است بین نرخ باربری زیاد یا زمان و یا گتس طولی و تقسیم گیری شود. جدول ۷ و ۸
۸	انتخاب قطب + یا - و ولتاژ و بار	رجوع به جدول ۸
۹	انتخاب پارامترهای مشخص - on time برای شن کاری و مخاف - جریان - فازت - خوردگی انیونی - نرخ باربری - خوردگی کاتدی	ترکیب سائنی در جدول ۹ مشخص شده است. به شکل ۹ و ۱۱ رجوع کنید. برای سائنی عمیق برای باربری الکترود ابزار و قطب آن ها در نظر گرفته شود.
۱۰	انتخاب دی الکتریک	جدول ۱۰ و اشکال ۱۶ و ۱۷
۱۱	فلاشینگ و صافی	یکی از پارامترهای بسیار مهم احتمالاً از سائنی بالا و کمپرسور کردن دی الکتریک و تلاقی آن است. در این مورد به سختی قطعه کار، شکل الکترود ابزار و ماسه بین دو الکترود و سائنی درجه صافی برای فرسایش جریان دی الکتریک با کاهش فاصله بین الکترود ابزار و نقطه فرسایش یا به وینس دی الکتریک است. مشکلات دیگری در فرسایش سائنی وجود دارد. جدول ۱۱ و شکل (۱۸ و ۲)
۱۲	پارامترهای انتخاب شده در تجهیزات و دانش را بررسی کنید	توجه به درجه تجهیزات و دقت کار کنترل (در بعضی از موارد نیاز به انتخاب خاص است)
۱۳		براساس نرخ فرسایش و باربری (از شماره ۹) و سائنی سائنی آنرا با توجه به دی الکتریک و فلاشینگ (در شرکت مورد نیاز)

ماشین کاری با اشته (پایزینو) لیزر (LBM)

یکی از روش های مخصوص ماشینکاری ، ماشینکاری با پرتو لیزر (LBM) میباشد که در

زمانی نوری - حرارتی است که در آن از لیزر جهت ذوب و تبخیر مواد استفاده می شود.

نور لیزر دارای ویژگی های ذیل میباشد و تشکیل شده از:

- یک دسته اشعه تک فرکانس

- موازی

- هم فاز و

- دارای انرژی متمرکز در سطح مقطع کم می باشد.

این نور کاربرد زیادی در صنایع مختلف از جمله تحقیقات فیزیک ، اندازه گیری ، پزشکی ، جوش و

تولید و غیره دارد.

در زمان های گذشته و با پیشرفت های روز در زمینه های سوراخکاری ، برشکاری ، جوشکاری ، عمل حرارتی و غیره

تعداد مثال ، استفاده از این فرآیند می توان بر اساس سوراخکاری سوراخ های بسیار کوچک به قطر ۰.۱۳۸ میلی متر

ایجاد نمود. و با بروی طنزاتی نامنظمی در این عمل می توان سوراخ های به قطر ۰.۷۵ میکرون ایجاد نمود.

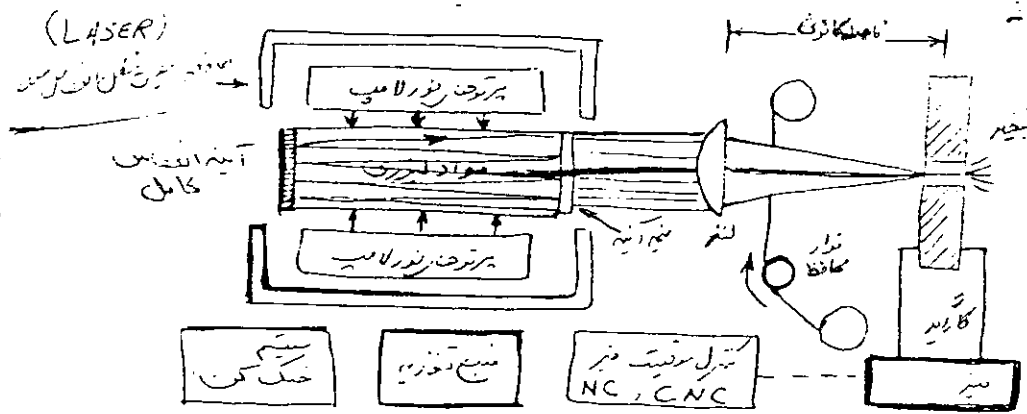
در این فرآیند عمق سوراخ نسبت عمق به قطر سوراخ در حدود ۱۰ برابر تعداد تراست.

سوراخ های درجه بندی کردن می توان با لیزر ایجاد کرد.

ماشینکاری با لیزر (LBM) Laser beam machining

در روش ماشینکاری با لیزر (LBM) مواد در نقطه کانون اشعه تک رنگ و پهن و از قطع کار هدای می شود. لیزر مصفا طبع *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* می باشد. این پروسه یک فرایند نوری - حرارتی است و از امواج الکترومغناطیس نوری برای عملیات ماشینکاری استفاده می شود. در این فرایند از نور تک رنگ که با اعطاس های بسیار دقیق آینه می شود، نور لیزری تبدیل می شود، استفاده می شود.

نور سب از خروج از منبع وارد مغز می شود که از مواد لیزری CO_2 پر شده است. در روش است این مغز دو آینه وجود دارد که یکی آینه کامل و دیگری مانند شکل زیر نیم آینه است.



- نور سب از اعطاس های مکرر مابین دو آینه و جمع شدن انرژی در بین آینه ها و بازتاب یافته می شود. در آن سطح انرژی نور از حد معینی زیاد تر شد تا در خراش بردار از سطح نیمه آینه مگذرد.
- نور لیزری پس از عبور از آینه صورت موازی رنگ و تک طول امواج می باشد. این نور توسط لنز جمع شده و فشرده نگارنده و منبسط کننده انرژی می شود.
- معادل $10^9 \frac{W}{cm^2}$ تولید نماید. پس از برخورد این نور به نقطه مورد نظر سب انرژی لیزر به کنترل سرعت برین مواد را تغییر در مواد می نماید.

- انواع لیزر ها:
 - Neodymium-glass
 - Nd-YAG (Neodymium-Yttrium Aluminum Garnet)
 - Ruby
- لیزر های CO_2 (Carbon dioxide)

سور لیزر از یک دسته اشعه تک فرکانس، سوزی، هفاز و دارا از انرژی متمرکز در سطح مقطع کمی است.

این نور کار بردهای زیادی در زمینه های مختلف از جمله تحقیقات فیزیک، اندازه گیری، پزشکی و صنایع دارد. عمده ترین سافت توسط لیزر شامل تسه کاری، جوشکاری، برشکاری و عمل جراحی و ... می باشد.

در ماشینکاری با لیزر سرج الکترون فضا پیوسته تک فرکانس هم کار لیزر در برخورد با سطح مقطع کار، انرژی محدود را بصورت حرارت آزاد نموده (10^6 W/mm^2) و باعث ذوب و یا تبخیر محل اصابت با قطره در حدود $13 \mu\text{m}$ می شود.

عمولاً از گاز CO_2 به کمک گاز دگیدر در مشعل های برشکاری (torch) استفاده می شود.

در بحث با لیس، منبع انرژی لاندسید با شدت زیاد در دست گرفته می شود. از توانی لایب

با استفاده از الکترود ها در مدار لیزری متمرکز می شود. و انرژی اتم ها را تحریک شده را

در فرکانس تابش رها می کند. نور تک رنگ در طول زمان انعکاس از طریق آینه تقویت می شود.

عکس از آن از شدت بیم آینه عبور می کنند. این نور که بصورت تک رنگ اشعه تک فرکانس، سوزی

و هفا زامت به سطح لیزی می رسد. این لیزر اشعه ها را در سطح کوچک از نقطه کار متمرکز می دهد و

انرژی نور الکترونی در آن سطح کوچک ایجاد می کند که می تواند آن نسبت را ذوب، تبخیر و در آن جنوه ای

ایجاد نماید. در تولید اشعه لیزری در $10^9 \times 4,6$ وات در سانی مربع (W/cm^2) می رسد که

می تواند حراره را ذوب و تبخیر نماید.

در برشکاری نیز از به شدت لیزری $10^6 \times 1,55$ وات در سانی مربع میباشد، یعنی

انرژی که ظرفیت حرارتی اغلب مواد نمی توانند این انرژی را به داخل بدنه مواد با سرعت کافی

انتقال دهند و از ذوب شدن و تبخیر آنها جلوگیری نماید.

انعکاس بودن سطح نقطه، ضریب جذب، هدایت حرارتی، شوری و غیره و گرنای تبخیر مهمترین

پارامترها در لیزر لیزر می باشند.

در عملیات برشکاری، جوشکاری و نمک جوارش می توان از یک لیزر دما تغییر می کند پس انرژی

زیادتی از قطعه کار دور (اداره اسپات Spat) و طول زمان پالس انبساط دارد.

- در عملیات برشکاری که نیاز به چگالی انرژی زیادی می باشد از مد پالسهای تکداری استفاده می شود. چگالی انرژی مورد نیاز 1.55×10^8 وات بر سانتی متر مربع است.

- در عملیات جوشکاری نیاز به پالسهای با طول مدت زمان بیشتر و قطر اسپات (Spat) بزرگتری است. چگالی انرژی مورد نیاز 1.55×10^6 وات بر سانتی متر مربع می باشد.

- در عملیات جوارش نیاز به چگالی انرژی کمتری می باشد و چگالی مورد نیاز در حدود 1.55×10^5 وات

بر سانتی متر مربع می باشد. عملیات تسخیر و ایجاد با سطح انرژی پایین تری انجام می شود در طول فرآیند تسخیر می با بریز لیزر، مواد از قطعه کار به شکل ذره، تسخیر (شکل کار)

از قطعه کار جدا و عمقاً به ذرات بزرگتر و جامد تبدیل می شود. جهت جلوگیری از

ذوب شدن لیزر و حفاظت از آن، یک سیستم انتقال محصول تسخیری شده

اصولاً به وسیله ذرات ریز (chip) محصول تسخیر را و لیزر می کند تا سطح منطقه کاری

کاری را کمتر نماید.

ما تسخیری با بریز لیزر یک روش کاربردی شلین است. نکته یک روش کنترل شده است

و امکان است که در آن با هدایت نیانه به وسیله چرخ و بدنه فروری ابزار انجام می شود

- با استفاده از بریز لیزر می توان سوراخ ریزی با زوای مختلف نسبت به سطح قطعه ایجاد نمود.

در تسخیر سوراخ بزرگ به عمق ۳ میل بر قطر ۱۲ میل می توان در قطعه ایجاد نمود.

سوراخهای تا قطر ۱.۲۷ میل نیز در مواد با ضخامت ۱۲.۷ میل می توان در قطعه ایجاد نمود.

در روش های NC و CNC می توان سوراخ های بزرگتر را امکان گزینا در قطعه ایجاد نمود.

توضیح: برآورد سوراخ

سوراخ با قطر ۱۰ میلی متر و عمق ۱۰ میلی متر در یک ورق فولاد ۳ میلی متری ایجاد می شود. $10^{-3} \times 10^{-3} \times 10 = 10^{-5} \text{ m}^3$ است. جهت کار باید توجه داشت که سوراخ در یک ورق فولاد ۳ میلی متری ایجاد می شود.

در صورتیکه نیاز به سوراخ چند پاسی باشد، حواشی سوراخ بر روی ورق فولاد ۳ میلی متری در هر پاس باید در نظر گرفته شود. همچنین سوراخ در ورق فولاد ۳ میلی متری باید در نظر گرفته شود.

برای مثال: اگر نیاز به سوراخ ۲ میلی متری در ورق فولاد ۳ میلی متری باشد، با ضخامت ۰.۵ میلی متری سوراخ در ورق فولاد ۳ میلی متری ایجاد می شود. زیرا تلاش لایه دار در ورق فولاد ۳ میلی متری در ورق فولاد ۳ میلی متری ایجاد می شود.

در ورق فولاد ۳ میلی متری سوراخ ۲ میلی متری در ورق فولاد ۳ میلی متری ایجاد می شود. سوراخ در ورق فولاد ۳ میلی متری در ورق فولاد ۳ میلی متری ایجاد می شود. Taper شکل گرفته است.

از جهت موقعیت آن در ورق فولاد ۳ میلی متری در ورق فولاد ۳ میلی متری ایجاد می شود. سوراخ در ورق فولاد ۳ میلی متری

سوراخ در ورق فولاد ۳ میلی متری در ورق فولاد ۳ میلی متری ایجاد می شود. re-cast texture (سوراخ در ورق فولاد ۳ میلی متری در ورق فولاد ۳ میلی متری ایجاد می شود). re-cast texture و heat-affected zone منطقه کافتن منطقه سوراخ در ورق فولاد ۳ میلی متری در ورق فولاد ۳ میلی متری ایجاد می شود.

سوراخ در ورق فولاد ۳ میلی متری در ورق فولاد ۳ میلی متری ایجاد می شود. re-cast texture و heat-affected zone منطقه کافتن منطقه سوراخ در ورق فولاد ۳ میلی متری در ورق فولاد ۳ میلی متری ایجاد می شود. fatigue (سوراخ در ورق فولاد ۳ میلی متری در ورق فولاد ۳ میلی متری ایجاد می شود).

مواد پلاسما شیب ، لاشیب ، پودر چوب ، بر مواد پایه اورگانیک راحت تر از فلزات برش داده می شود.

مواد سرامیک ، شیشه و انواع کامپوزیت ها را نیز می توان از طریق پرتو لیزری مراقب بر نمود

پرتو لیزر دارای کار برد های وسیعی است ، شش نمونه کارهای در تکنولوژی مواد فلزی غیر فلزی ،

حسینیت به نازک کردن رتور ها دنیا میکی در حال پیشرفت ، در عملیات جوشکاری ، برشکاری ، عملیات

در تفسیر کردن سطوح فلزات ، در سوراخکاری و ...

لیزر های جامد یا گازی از انواع لیزر های پیرانه ای هستند.

سؤالات :

۱- پارامترهای مؤثر در ماشینکاری به روش های ECM ، EDM و USM

۲- شکل فرآیندهای فوق الکتریکی را بکشید .

۳- نقش سیستم مایع الکترولیت ، دما الکتریک و مایع ساینده در روش های فوق الکتریکی نام ببرید .

۴- کار برد های فوق الکتریکی به تفصیل مشخص فرمایید .

اداس تصحيزات مورد نیاز تاکیدی بر عوارض است از
کنترل موثقت قطعه کار تحت نقطه کاغذی تاکن است
سیخ از غیر مدر حدی حرکت بریزد قطعه ای نیازی باکر . کامیونر

کی بیفتند کنترول عدد بریدب ارتباط و کین رکین پارا مترهن لیزر به شدت و intensity ، شکر / زرخ نوس با
کنترول حرکت و خرد کارکن کن بشود . انطاس پرکو ، قیس و تجزیه بر تولهت جنین صحت و انتقاری
زیر اثر مظهر دوار برار سوانک در لاره اس) ، لیزر مخصوص (toric, axicon) ، چوش آینه ها ، و
آسترک از فانی تمامه دسترس لیزر مخصوص لیزر رفقه شدت . عدم تماس مکانیکی ، پایش بر درجه
بیت و تقویت مشغول بودن لیزر موجب شای بلسچر می شود .

مشغول فایلیک ری

آب منی انتفا ده از بر تو لیزر مورد شکر . در آن درازنده و مختلف انتفا ده شود . جهت انتفا ده لیزر
در آن حفظ فکس از جسم و حتما کار با لیزر عمل آید . رزتر را دیدن سدهس اولی و لیزر العملی کمت
سدهس ازاد کرد با لیزر کار کند و بیکه بر این جفاکات س ازند لیزر دارد که سدهس از آن بیدت مورد
طول سرج لیزر CO2 بر پرتو شای سدهس لیزر O Paque ، نیابرس ، پشش دارن آن به آن نای بی هم پذیر است
کنترول اردوغ بر در لیزر لازم است . و صمیم عا خلاصه روش لولوسر و انتفال ذرات شای کار با لیزر
کارها بیدیم لفظی از سواد در طول فایلیک سدهس بر تو لیزر آزاد و بالسی با OSHA بر اثرات
آنها بر سدهس آسب شود .

مقایسه لیزرهای جامد LBM و لیزرهای مایع

مقایسه لیزرهای جامد و مایع

مقایسه لیزرهای جامد و مایع	لیزر جامد (Solid State)	لیزر مایع (Liquid)	لیزر جامد (Solid State)	لیزر مایع (Liquid)
سایز سوراخ لیزر	Smallest spot	high Peak watts	most easily absorbed by metals	
تولید	1% Nd	1% Nd	Glass + 1% Nd	
طول موج (میکرومتر)	0.69	0.69	0.69	
راندمان %	10	10	10	
مدت اشعه	پالس	پالس	پالس	
اندازه سوراخ در سطح کار	0.14	0.14	0.14	
نوع سوراخ (پالس / CW)	پالس	پالس	پالس	
قدرت خروجی (وات)	1000	1000	1000	
طول موج سوراخ	200	200	200	
معماری سوراخ	0.5	0.5	0.5	
مجموع				

مقایسه لیزرهای جامد و مایع

قطر سوراخ	0.14	0.14	0.14	
عمق سوراخ	0.14	0.14	0.14	
معماری سوراخ	0.14	0.14	0.14	
معماری سوراخ	0.14	0.14	0.14	
معماری سوراخ	0.14	0.14	0.14	
معماری سوراخ	0.14	0.14	0.14	
معماری سوراخ	0.14	0.14	0.14	
معماری سوراخ	0.14	0.14	0.14	
معماری سوراخ	0.14	0.14	0.14	
معماری سوراخ	0.14	0.14	0.14	

switched lasing - این

در ابتدا، اقداماتی که جهت انتخاب پارامترهای عملیاتی در ماشین کار با لیزر را در رعایت شود

<p>۱- پارامترهای نقطه نشانی، مشخصات و کت به شرح ۲- انتخاب نوع لیزر، طول موج، طول موج پمپینگ</p>	<p>۱- عرض قطعه پاروشخصاً جازم آن ۲- انتخاب نوع لیزر، طول موج پمپینگ</p>
<p>۳- نوع نور اندازه اسپت (SPM) (گرفی)، اسپت به طول موج پمپینگ طول موج لیزر، زاویه طول موج طولانی تر است</p>	<p>۳- نوع نور</p>
<p>۴- انتخاب لیزر عمق کانال (d) طول کانال (f) و اندازه اسپت (s) برداشته کار بر روی پاروشخصاً قطعه مشخص می شود</p>	<p>۴- انتخاب لیزر</p>
<p>۵- کنترل حرکت قطعه کار بر پایه CNC، DNC یا NC دارد و گاهی به وسیله قطعه کار و حجم تولید دارد</p>	<p>۵- کنترل حرکت قطعه کار</p>
<p>۷- برش خشک بر پایه تیغه کار با جابجایی مواد مشخص می شود</p>	<p>۷- برش خشک</p>

قدرت مورد نیاز جهت تعیین عمق برش و در زمان برش

۱	آلومینوم
۱,۵	تیتانیوم
۱,۸	آهن
۲,۲	پولیدان
۲,۹	مس

مورد ۱) انتخاب نوع لیزر برای ماشینکاری

کاربرد	نوع لیزر
سوراخکاری بر روی فولاد ۱,۵mm سوراخکاری بر روی آلومین (آردان) سوراخکاری بر روی مس، قطر ۰,۲۵ میلی متر سوراخکاری بر روی آلومین (سوراخ)	Ruby, Nd-YAG, CO2 CO2, Nd-YAG Ruby, Nd glass, Nd-YAG Nd-YAG, Ruby
برش کاری ضخیم برش کاری بر روی فلزات برش کاری بر روی پلاستیک	CO2 + gas assist Nd-YAG CO2
پلاستیک فلزات آبرنگ و غیر فلزات سوراخکاری	CO2 Nd-YAG, Ruby, Nd glass Pulsed CO2 Pulsed CO2 و Nd-YAG

نوع لیزر	طول موج μm	غذایی	قدرت W	سرعت پالس / پالس PPS	طول پالس μs	کاربرد	توضیحات
آرگون	۰.۴۸۸۰ ۰.۵۱۴۵	پالسیون گازی	۲۰ Peak ۰.۰۰۵	۶۰	۵۰ MS		
Ruby	۰.۶۹۴۴	پالسیون جامد	۲x۱۰ ^۵ Peak	(۵۰-۱۰)	۰.۲۶۷ MS	برای جراحی و دندانپزشکی	برای جراحی و دندانپزشکی
Nd-Glass	۱.۰۶	پالسیون جامد	۲x۱۰ ^۶ Peak	(۰.۲)	۷۵ MS	برای جراحی و دندانپزشکی	برای جراحی و دندانپزشکی
Nd-YAG	۱.۰۶	پالسیون جامد	۱۰۰۰	۱۰۰۰	—	برای جراحی و دندانپزشکی	برای جراحی و دندانپزشکی
Nd-YAG	۱.۰۶	پالسیون جامد	۳x۱۰ ^۵ Peak	۱۰۶۲۴۰۰۰	۵۰ MS	برای جراحی و دندانپزشکی	برای جراحی و دندانپزشکی
Nd-YAG	۱.۰۶	پالسیون جامد	۴۰۰	۳۰۰	۷۵ MS	برای جراحی و دندانپزشکی	برای جراحی و دندانپزشکی
CO ₂	۱۰.۶	پالسیون گازی	۱۵۰۰۰	—	—	برای جراحی و دندانپزشکی	برای جراحی و دندانپزشکی
CO ₂	۱۰.۶	پالسیون گازی	۷۵۰۰۰	۴۰۰	۵۰ MS	برای جراحی و دندانپزشکی	برای جراحی و دندانپزشکی
CO ₂	۱۰.۶	پالسیون گازی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰ MS	برای جراحی و دندانپزشکی	برای جراحی و دندانپزشکی

PROCESS SUMMARY

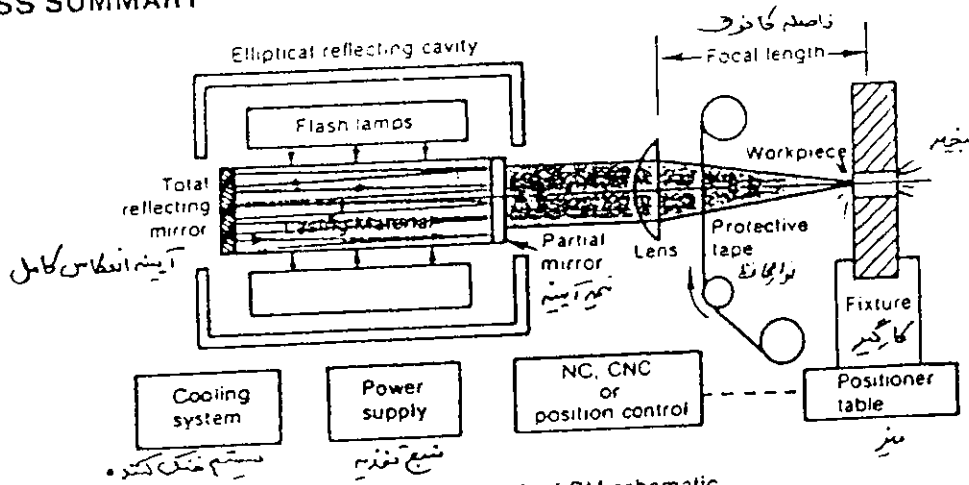


Figure 12.6-1 LBM schematic.

Principles

Laser beam machining (LBM) removes material by melting, ablating, and vaporizing the workpiece at the point of impingement of a highly focused beam of coherent monochromatic light (see figure 12.6-1). Laser is an acronym for "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation." The electromagnetic radiation operates at wavelengths from the visible to the infrared (see table 12.6-3). The principal lasers used for material removal are the neodymium-glass, the Nd-YAG (neodymium-yttrium aluminum garnet), the ruby and the carbon dioxide (CO₂). The last is a gas laser (most frequently used as a torch with an assisting gas—see LBT, laser beam torch), while the others are solid state lasing materials.

For pulsed operation, the power supply produces short, intense bursts of electricity into the flash lamps, which concentrate their light flux on the lasing material. The resulting energy from the excited atoms is released at a characteristic, constant frequency. The monochromatic light is amplified during successive reflections from the mirrors. The thoroughly collimated light exits through the partially reflecting mirror to the lens, which focuses it on or just below the surface of the workpiece. The small beam divergence, high peak power and single frequency provide excellent, small-diameter spots of light with energy densities up to 3×10^{10} watts per square inch (4.6×10^9 W/cm²) which can sublime almost any material. Cutting requires energy densities of 10^7 to 10^9 watts per square inch (1.55×10^6 to 1.55×10^8 W/cm²), at which rate the thermal capacity of most materials cannot conduct energy into the body of the workpiece fast enough to prevent melting and vaporization. The initial or leading edge of the power spike is most important in CO₂ lasers to initiate vaporization in nonmetal drilling, which then promotes better absorption of the energy. Workpiece surface reflectivity, absorption coefficient, thermal conductivity, specific heat and heat of vaporization are all important when considering a laser application.

Cutting, welding, scribing and heat treating can all be done with the same laser by varying the energy density and by appropriately adjusting the focus (spot size) and the pulse duration. Sharp, short, Gaussian-mode repetitive pulses are best for cutting because they have high energy densities. Welding requires longer duration pulses and a broad spot. Welding energy densities are 10^4 to 10^7 watts per square inch (1.55×10^4 to 1.55×10^6 W/cm²). Heat treating operates at under 10^6 watts per square inch (1.55×10^5 W/cm²), and scribing requires very short cutting pulses (see figures 12.6-3 to 12.6-7). Heat treating and welding are not covered in this process summary.

During laser beam machining, the expelled material forms metal gases and vapors, which subsequently solidify to dust or minute beads. In addition to protection for the lens from molten particles or splatter, a "chip" removal system—frequently a vacuum cleaner type—is desirable to keep the operating area clean and free from dust.

Practical Applications:

LBM is not a mass material removal process—it is a fast, easily controlled process with a non-contact, non-wearing tool that imparts minimal heat and thermal distortion with minimal demands upon fixturing. The high energy density in a well-focused beam will melt and remove any material. Contour cuts and slitting of thin steels, aluminum, titanium alloys, and other metals are done at rapid rates with narrow kerfs, continuous-wave (CW) modes or high pulse rates are used. Texturing and etching are performed at lower energy levels. Small hole drilling can be done at shallow angles (15 degrees) to the surface. Multiple pulses permit

*Laser technology is advancing so rapidly that current limitations frequently are removed by more recent developments. A check with active laser equipment builders is recommended for new applications.

hole drilling to 40:1 depth-to-diameter ratios on 0.005-inch (0.13 mm) diameter holes, while larger holes, 0.050-inch (1.27 mm) diameter, can be drilled in 0.50-inch (12.7 mm) thick material. Trepanning is done for still larger holes using NC or a circle generator attachment. Plastics, rubber, cloth and similar organic base materials cut more easily than the metals. Ceramics, glasses and composites of many types are drilled, scribed and diced. Microcircuit components, resistor trimming or circuit "deburning" make use

of the laser's speed and precision. Viable applications for LBM range from diamond wire draw dies to catheter drilling to food sieves. The ability to direct and focus the laser beam into inaccessible locations permits unusual applications, such as balancing rotors dynamically while they are rotating.

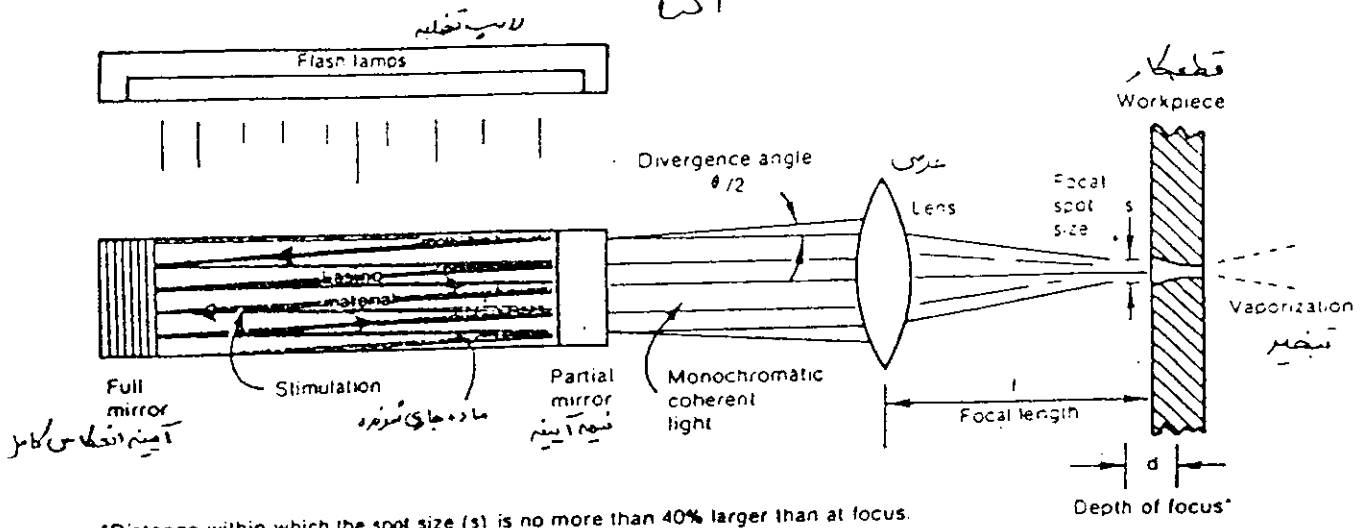
For additional applications, see Laser Beam Torch, section 12.7, particularly visor sitting and fur contour cutting.

Operating Parameters

TABLE 12.6-1 Typical Values for LBM Operating Parameters and Process Capabilities

OPERATING PARAMETERS				
Lasing material Type	Ruby Solid state smallest spot high peak watts most easily absorbed by metals	Nd:YAG Solid state	Nd glass Solid state	CO ₂ Gas high efficiency
Composition:	0.03 to 0.07% Cr	1% Nd	Glass + 2 to 6% Nd	CO ₂ + He + N ₂
Wavelength, micrometers (see figure 12.6-8)	0.69	1.064	1.064	10.6
Efficiency, %	Up to 1	2	2	10 to 15
Beam mode:	Pulse	Pulse or continuous	Pulse	Pulse or continuous
Spot size at focal point, in. [mm]	0.0005 [0.013]	0.0005 [0.013]	0.001 [0.025]	0.003 [0.076]
Pulse repetition rate, pps* (normal mode operation)	1 to 10	1 to 200 or continuous wave	1 to 3	Continuous wave
Beam output, watts	10 to 100	10 to 1,500	10 to 100	250 to 10,000
Peak power, kW (see figure 12.6-9)	200	400	200	100
Beam divergence, milliradians	5 to 7	1 to 5	5 to 7	0.1 to 10
Excitation sources	Hydrogen, xenon or tungsten halogen lamps, electrical discharge			
PROCESS CAPABILITIES*				
Drilling diameter	0.00002 to 0.050 inch (0.0005 to 1.27 mm)			
Drilling depth	larger with trepanning up to 1.75 inch (44 mm)			
Drilling angle to surface	15 to 90 degrees			
Drilling taper	5 to 20% of hole diameter			
Drilling length-to-diameter ratio	Up to 50:1			
Drilling length, trepanned	Up to 0.25 inch (6.4 mm)			
Drilling tolerance	± 5 to 20% of hole diameter			
Minimum corner radius	0.010 inch (0.25 mm)			

*pps = pulses per second. Q-switched lasing can greatly increase all these repetition rates.
See also table 12.6-3 and figures 12.6-10 to 12.6-14.



*Distance within which the spot size (s) is no more than 40% larger than at focus.

Figure 12.6-2 LBM parameter terminology.

TABLE 12.6-3 Commercial Lasers Suitable for Materials Processing

LASER TYPE	WAVELENGTH μm	MODE OF OPERATION	POWER W	PULSE REP. RATE pps	PULSE LENGTH	APPLICATION	COMMENTS
Argon	0.4980 0.5145	Repetitively pulsed	20 peak; 0.005 average	60	50 μs	Scribing thin films	Power low
Ruby	0.6943	Normal pulse	2×10^5 peak	Low (5 to 10)	0.2 to 7 ns	Large material removal in one pulse; drilling, diamond dies, spot welding	Often uneconomical
Nd-Glass	1.06	Normal pulse	2×10^4 peak	Low (0.2)	0.5 to 10 ns	Large material removal in one pulse	Often uneconomical
Nd-YAG*	1.06	Continuous	1,000	—	—	Welding	Compact; economical at low powers
Nd-YAG	1.06	Repetitively Q-switched	3×10^5 peak; 30 average	1 to 24,000 300	50 to 250 ns 50 ns	Resistor trimming, electronic circuit fabrication	Compact and economical
Nd-YAG	1.06	Normal pulsed	400	300	0.5 to 7 ns	Spot weld, drill	
CO ₂ [†]	10.6	Continuous	15,000	—	—	Cutting organic materials, oxygen-assisted metal cutting	Very bulky at high powers
CO ₂	10.6	Repetitively Q-switched	75,000 peak 1.5 average	400	50 to 200 ns	Resistor trimming	Bulky but economical
CO ₂	10.6	Superpulsed	100 average	100	100 μs and up	Welding, hole production, cutting	Bulky but economical

SOURCE: Modified from J. F. Peedy, Selecting a laser for material working, Laser Focus (March 1970), p. 40.
 * Neodymium-yttrium aluminum garnet.
 † CO₂ plus He plus N₂ mixture.

Laser Beam Machining—LBM 12.6

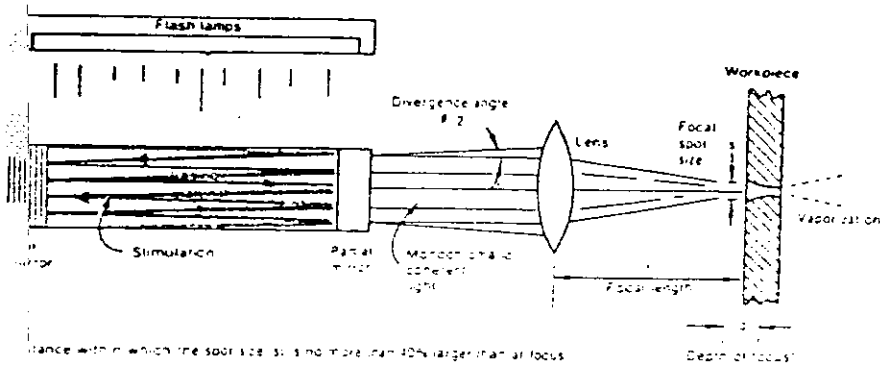


Figure 12.5-2 LBM parameter terminology

12.5-3 Commercial Lasers Suitable for Materials Processing

LASER TYPE	WAVELENGTH (nm)	MODE OF OPERATION	POWER (W)	PULSE REP. RATE (pps)	PULSE LENGTH (ns)	APPLICATION	COMMENTS
CO ₂	0.4880 0.5145	Repetitively pulsed	20 peak 1000 4 average	50	50 μ s	Scribing thin films	Power low
CO ₂	0.6943	Normal pulse	2 x 10 ⁴ peak	low 500-1000	0.2 to 7 ms	Large material removal in one pulse. Drilling diamonds. Spot welding.	Often uneconomical
CO ₂	1.06	Normal pulse	2 x 10 ⁴ peak	low 1000	0.5 to 10 ms	Large material removal in one pulse.	Often uneconomical
YAG	1.06	Continuous	1-300	—	—	Welding	Compact, economical at low powers
YAG	1.06	Repetitively Q-switched	0.1 x 10 ⁴ peak 10 average	100 to 200 500	50 to 250 ns 50 ns	Resistor trimming, electronic circuit fabrication	Compact and economical
YAG	1.06	Normal pulsed	400	1000	0.5 to 7 ms	Spot weld drill	
YAG	10.6	Continuous	15-3000	—	—	Cutting organic materials, oxygen-assisted metal cutting	Very bulky at high powers
YAG	10.6	Repetitively Q-switched	75-3000 peak 1.5 average	400	50 to 260 ns	Resistor trimming	Bulky but economical
YAG	10.6	Superpulsed	100 average	100	100 μ s and up	Welding, hole production, cutting	Bulky but economical

NOTE: Modified from J. F. Ready, "Selecting a laser for materials processing," Laser Focus, March 1970, p. 40.

CO₂ = carbon dioxide laser.
YAG = yttrium aluminum garnet.
Q = quality factor.

Laser Beam Machining—LBM 12.6

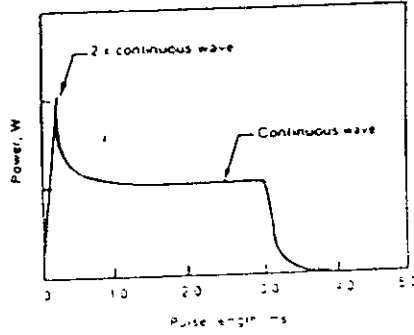
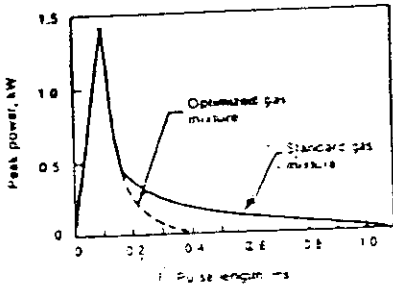


Figure 12.6-5 Pulse configurations for CO₂ lasers (Left: short pulse length (less than 100 μs to peak); right: long pulse length (0.2 μs to 100 μs to peak))

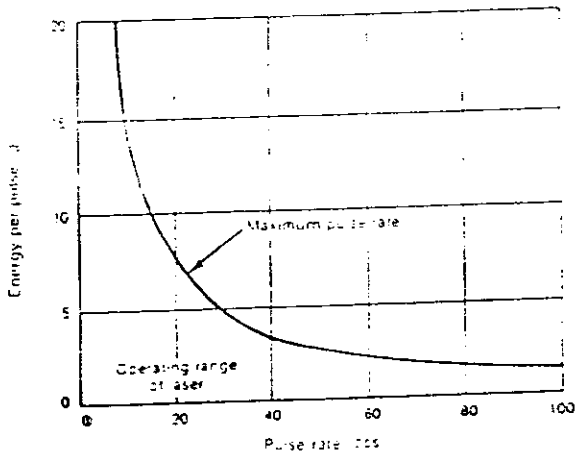


Figure 12.6-6 Operating range of a flash-lamp-pulsed Nd:YAG laser (Courtesy of Coherent, Inc.)

استند
تعداد ۱
تعداد ۲
دینامیک
طراحی اجزا ۱
طراحی اجزا ۲

ریشه ۱
ریشه ۲
معدلات انتقال
آماره انتقال

× انتقال
× انتقال
× انتقال

سیات
توسعه
انتقال
انتقال

زبان

انرژی
توانایی
نیروی

CNC
عملیات
تولید
کنترل
برس
عملیات
تولید
سیستم

5/12

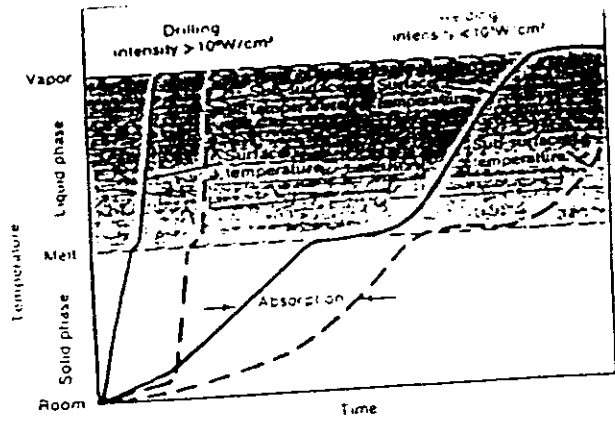
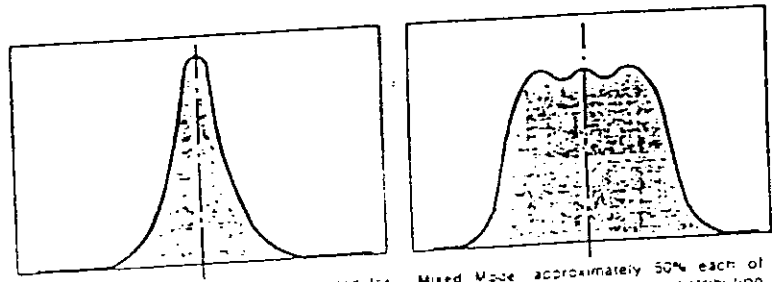


Figure 12.6-3 Difference in energy and absorption between laser drilling and laser welding (S. R. Boun, Pulsed-laser metalworking, American Machinist 120 (October 1976) p. 124)



Gaussian Mode (or TEM₀₀) Ideally suited for high quality cutting. Power densities up to 10^7 watts/cm² (1.55×10^6 W/cm²). Mode quality is maintained throughout the power range.

Mixed Mode (approximately 50% each of TEM₀₀ and TEM₀₁) Flat topped distribution makes this model ideal for welding and heat treating.

TEM — transverse excitation mode

Figure 12.6-4 Laser excitation modes for cutting versus welding (Courtesy of GTE Sylvania)

Laser Beam Machining—LBM 12.6

This nomograph provides fast, convenient conversions among the various ways of describing light waves in energy, frequency, and wavelength.

As an example, the left side of the nomograph shows that the 532-nanometer wavelength of a frequency-doubled neodymium:YAG laser corresponds to an optical carrier frequency of 5.6×10^{14} hertz and a photon energy of 2.3 electronvolts or 2.3×10^{-19} joules.

The right side of the nomograph shows that the laser's spectral width of 0.5 cm⁻¹ is equivalent to a width of 15 picometers or 0.15 angstroms.

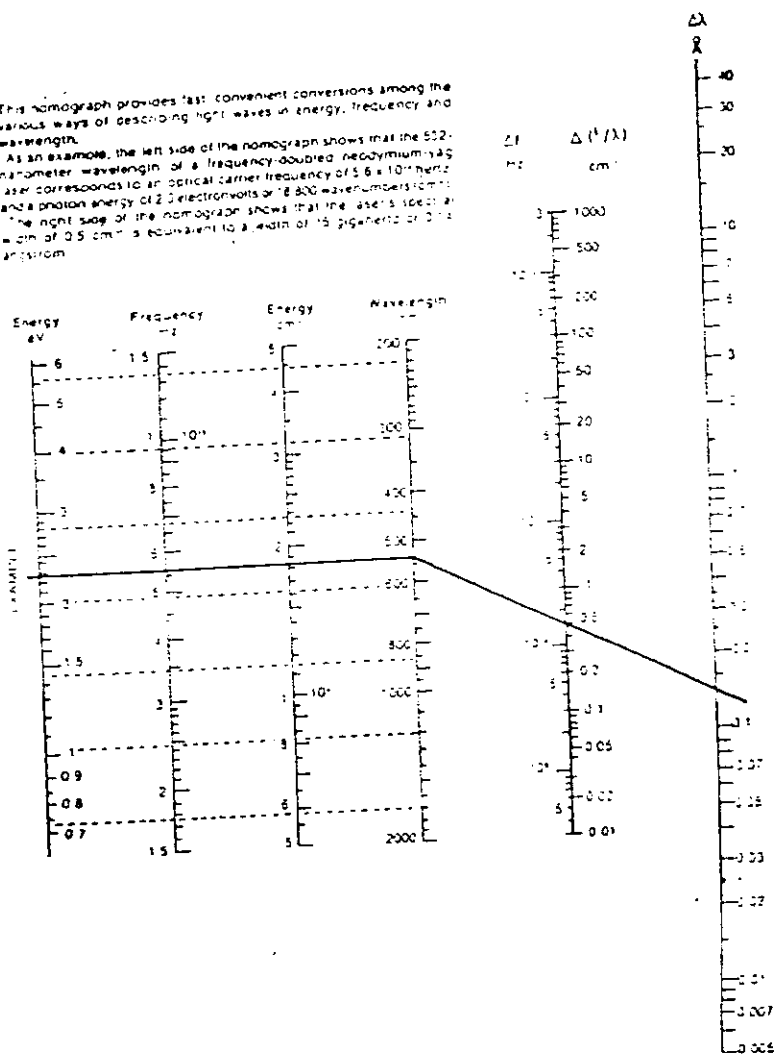


Figure 12.6-8 Energy nomograph (Courtesy of Photonics Associates, reprinted from 1979 Laser Focus)

12.0 Laser beam machining

2/17

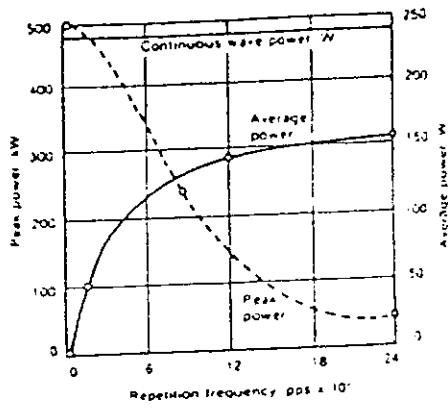


Figure 12.6-7 Relationship of peak power and average power with variation in repetition frequency (YAG laser). (Courtesy of Holobeam Laser Company)

TABLE 12.6-5 Selecting a Laser Type for Machining

APPLICATION	LASER TYPE
Large holes (to 0.005-inch (0.127 mm) diameter)	Ruby, Nd glass, Nd-YAG, Nd-YAG, CO ₂
Large holes (reamed)	Ruby, Nd glass, Nd-YAG
Small holes (to 0.010-inch (0.25 mm) diameter)	Nd-YAG, Ruby
Drilling, punching or percussion	CO ₂ - gas assisted*
Thick cutting	Nd-YAG
Thin cutting metals	CO ₂
Thin cutting plastics	CO ₂
Plastics	CO ₂
Metals	Nd-YAG, Ruby, Nd glass
Organics, nonmetals	Pulsed CO ₂
Ceramics	Pulsed CO ₂ , Nd-YAG

*See end gas-assisted cutting under LBT section 12.7

TABLE 12.6-4 Relative Power To Vaporize Equal Volumes In Equal Time

Aluminum	1.0
Titanium	1.5
Iron	1.8
Molybdenum	2.2
Tungsten	2.9

SOURCE: Metals Handbook, Vol. 3—Machining Metals Part. Ch. American Society for Metals, 1967, p. 254

14

22

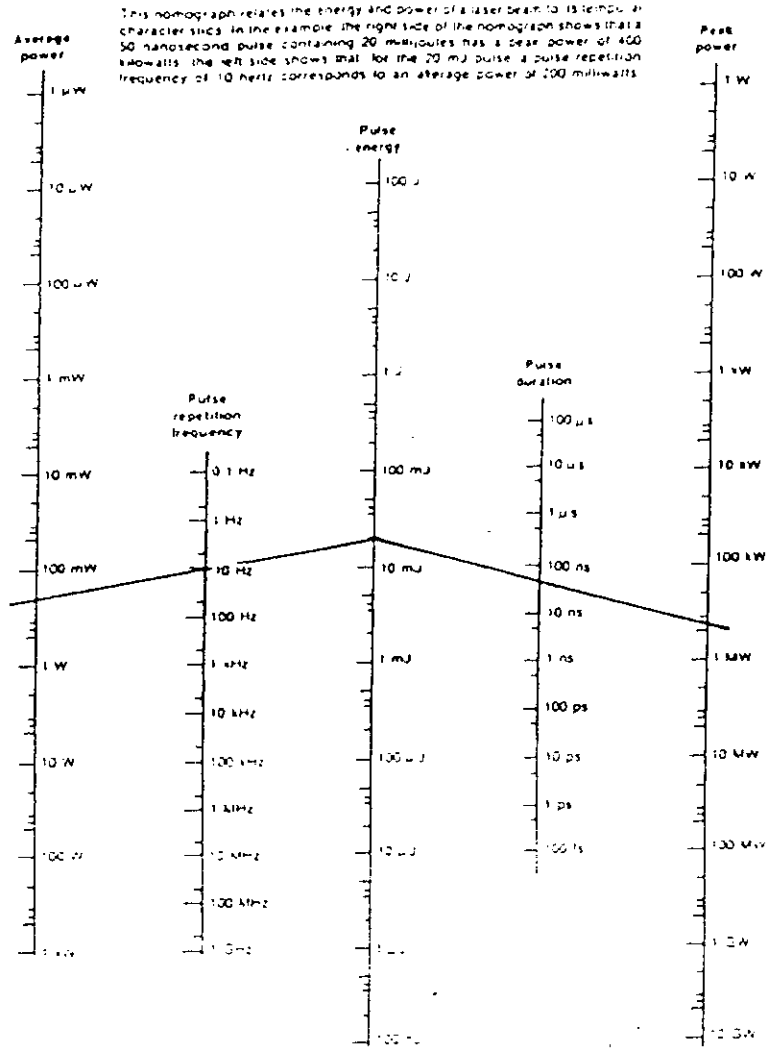


Figure 12.6-9 Pulse energy and power nomograph (Courtesy of Photonics Associates, reprinted from 1979 Laser Focus Buyers Guide).

Laser Beam Machining—LBM 12.6

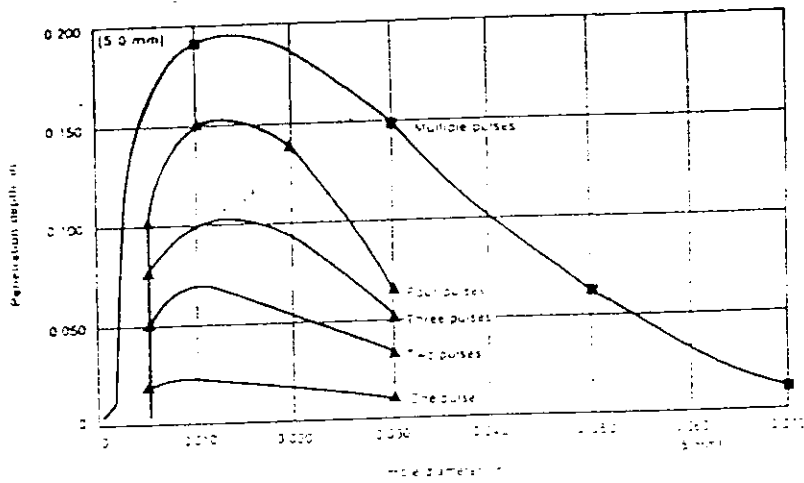


Figure 12.6-10. Typical penetration laser drilling of superalloys.

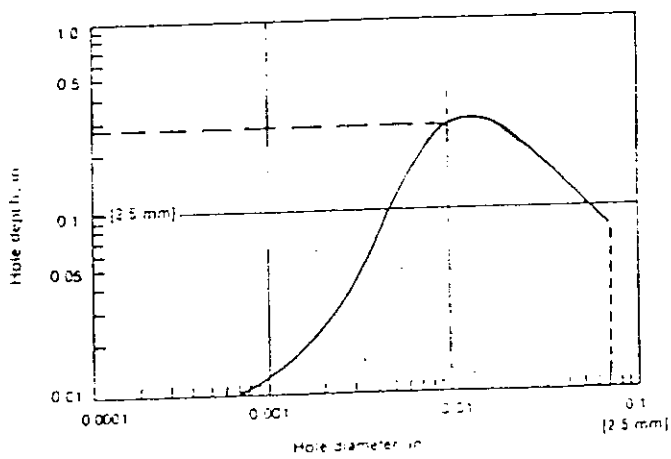


Figure 12.6-11. Typical depth and diameter values for pulsed laser drilling in ferrous alloys. (Adapted from S. R. Boun, p. 126.)

12-66

Figure 12-6-13 Surface effects from BM cuts 1975

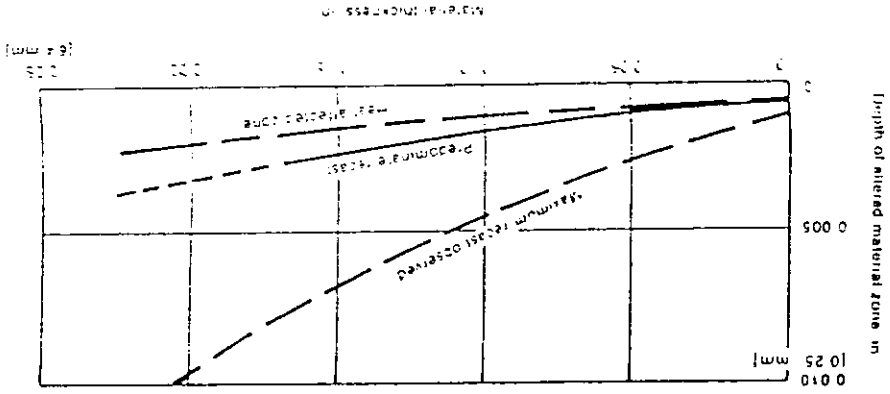
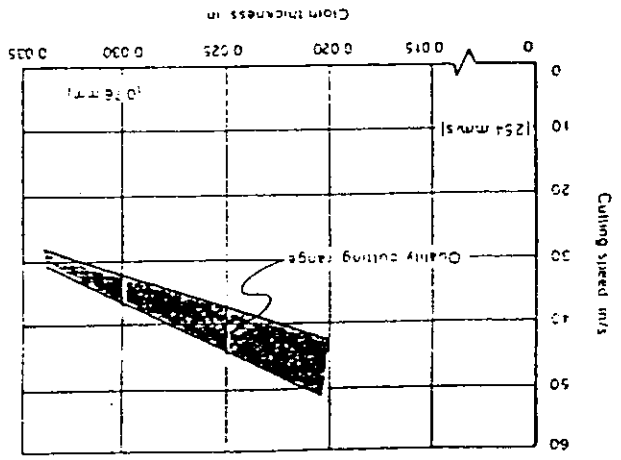


Figure 12-6-12 CO₂-laser beam cutting (250 watts TEM₀₀) (Courtesy of Concrete, Inc.)



Handwritten mark resembling a heart or 'D'.

Laser Beam Machining—LBM 12.6

TABLE 12.6-6 CO₂-Laser Drilling of Plastics

MATERIAL	THICKNESS		HOLE DIAMETER				PULSE LENGTH μs	POWER LEVEL W
			Top		Bottom			
	in	mm	in	mm	in	mm		
PVC	0.025	0.635	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
PVC	0.025	0.635	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
PVC	0.025	0.635	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
PVC	0.025	0.635	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
Acrylic	0.025	0.635	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
Polystyrene	0.025	0.635	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
Polystyrene	0.025	0.635	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
Polystyrene	0.013	0.330	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
Polystyrene	0.011	0.279	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
ABS plastic	0.030	0.762	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
ABS plastic	0.030	0.762	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
Acrylic	0.015	0.381	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
Acrylic	0.015	0.381	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
Polycarbonate	0.015	0.381	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100
Nylon	0.035	0.889	0.010	0.254	0.010	0.254	10	100

SOURCE: Coherent, Inc.

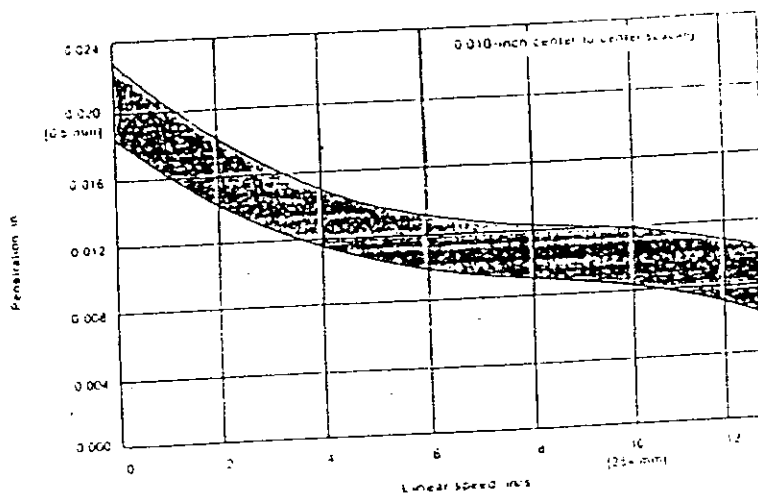


Figure 12.6-14 Ceramic scribing chart—penetration depth versus speed using 125-watt continuous-wave CO₂ laser. Shaded area reflects operating domain expected in production environment with a 1.5-inch focal length lens. (Courtesy of Coherent, Inc.)

۵۷

بسمه تعالی

درس تولید مخصوص
روش های پیشرفته ماشینکاری

ماشینکاری به روش پرتو یونی *Electron Beam Machining*

دکتر مرتضی صادق عمل نیک

دانشگاه تبریز

دانشکده فنی - گروه مهندسی ساخت و تولید

ترم پائیز ۱۳۸۰

Electron Beam machining (EBM)

اصول ماشینکاری با پرتو الکترونی

در ماشینکاری با پرتو الکترونی (EBM) بار برداری از طریق ذوب کردن و تبخیر قطعه کار در نقطه ای

که نقطه کانونی هر چیم الکتریته‌ای با سرعت بالا مینماید ^{انجام شود} جهت مذوب کردن و برکنندگی

پرتو الکترونی بدین واسطه تماس با موکولون ^{شماره} می‌کند، این کار در محیط بالایی از خلا انجام می‌شود

الکترون‌های صن در شده از تغذیه پرتو الکترونی تریود (triode) 10^4 تا 10^6 سرعت نور

در آن مرتب هدایت می‌کنند. برخورد الکترونها با قطعه کار با سرعت موجب تبدیل انرژی (kinetic)

به انرژی گرمایی می‌شود. پرتوهای با سرعت ^{پایین} low-inertia beam را می‌توان بدین واسطه میدان مغناطیسی

لنزهای مغناطیسی پرتو الکترونی را روی قطعه کار متمرکز می‌نمایند، بعد از آن استیج با قطر ۰.۲۵ میلی

متر می‌تواند با چگالی با انرژی 10^8 W/cm^2 وجود آورد و مواد را

ذوب و تبخیر نمود. با استفاده از کنترل کامپیوتر می‌توان تبخیر قطعه کار را به سرعت برکنندگی پرتو

کنترل پرتو شدت پرتو و حرکت قطعه کار را تحت کنترل در آورد. ارتفاع ده از سطح دید در این

نوع موجب کنترل مغناطیسی و برنام ریز پرتو در طرف دیگر و یک سطح کوچک می‌شود.

کاربردهای عملی ماشینکاری با پرتو الکترونی

دانشیه قدرت موجود در EBM موجب تبخیر مواد جدید می‌شود. رصیح به جدول ۱-۲-۳ این مسئله موجب

امکان صیقل رسیعی ^{بسیار} از روشهای سنتی را می‌دهد (جدول ۱-۲-۳). مانند ماشینکاری ^{بسیار} سطوح سرد تاگز، نظم زنی و

سوراخکاری از جمله کاربردهای این EBM است. سوراخکاری که نسبت عمق آن به قطر آن ۱۰۰:۱ می‌تواند

پرتو الکترونی ایجاد نمود. استفاده از EBM و ماشینکاری سوراخکاری نیز در ساخت قطعات با دقت بالا در کوره‌های

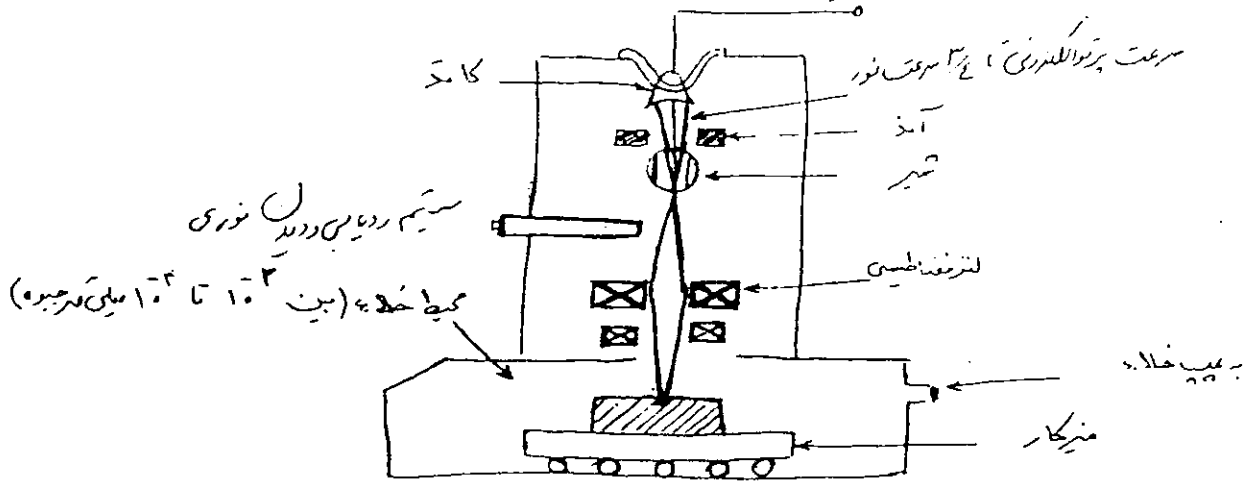
بردی خود را امکان پذیر است. همچنین امکان لحام ^{نقطه} فلزات مختلف با این روش وجود دارد. شکل ۳-۴

و نرخ کار و ماشینکاری با پرتو الکترونی با ابزار فولاد و نیکل تنان میدهد. عدم حضور تماس مکانیکی و فشار

کنترل اندک تمپ در این روش قابلیت فایده را افزایش داده است، اما ضرورت کار در خلا، لیزر و کار با انرژی

کمی از کارهای EBM ایجاد ۴۰۰۰۰ سوراخ (که طول نام تقو $2 \mu\text{m}$) در یک اینچ مربع به ضخامت 0.5 mm کار بردن ایجاد سوراخهایی به قطر 0.5 mm روی سواری به ضخامت 6.4 mm در عرض چندین برابر بر کنندگی

دما: ۱۵۰ تا ۱۵۰۰ سیدرت ۵۸



شکل (۱) اجزاء یک ماشین پرتو الکترونی

- ۱- تصفیه الکترونی از یک کاتد (نیلون) و قطب منفی یک آند (آلیاژ آلومینیم) تشکیل شده است. در دما ۱۰۰ تا ۲۵۰۰ درجه سانتیگراد و از شعور الکتریک به ترتیب می نماید. این الکتریک بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰۰ ولت است.
- ۲- الکتریک ها با سرعت $\frac{2}{3} c$ سرعت نور از قطب پرتو الکترونی به سمت آند پرتاب می شوند.
- ۳- جهت جلوگیری از پراکنش پرتوهای الکترونی در فضا و برخورد به سطوح فلزاتی است که در محفظه خلاء قرار می گیرند.
- ۴- پرتوهای با سرعت پایش توسط یک میدان مغناطیسی کنترل و بر روی سطح کار پس از قطع با قطر ۰.۲۵ میلی متر به جای و در نتیجه انرژی $1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ متمرکز می شوند.
- ۵- در استفاده از سیستم ~~کنترل~~ می توان میزان میدان مغناطیسی و برنامه ریزی پرتو الکترونی را اصلاح و تعداد و برای یک سطح کوچک برنامه ریزی نمود.
- ۶- برای برخورد الکتریک ها با قطعه کار، موجب تبدیل انرژی جنبشی به انرژی گرمایی می شود.
- ۷- اشعه الکتریک با یک ۱۰۰ تا ۲۵ میلی آمپر و در چگالی یا دانسیته حرارتی آن بین ۵ تا ۱۵ (A cm^2) پرتاب می شود.
- ۸- با استفاده از کاسیو متر می توان به سرعت پرتو الکتریک را کنترل کرد و حرکت قطعه کار را تحت کنترل در آورد و به سرعت نگاه قطعه کار را ماشین کاری نمود.
- ۹- با چگالی انرژی $1.5 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ تقریباً همان کطبه قطعات ساخته شده از مواد مختلف را ماشین کاری نمود.
- ۱۰- در استفاده از کنترل کاسیو متر امکان ایجاد ۵۰۰۰ سرداخ دیک مانیم بر فلزات نازک در سوله و جود دارد.

دسترسی مواد	مواد				
	آرسنیک	نیاسیم	مولیبدیم	تنگستن	آجر
درم نقطه ذوب مس	۶۶۰	۱,۶۶۸	۲۶۱۰	۲۴۱۰	۱۵۲۶
درم جوش C	۲۴۵۰	۳۲۶۰	۵۵۶۰	۵۹۳۰	۳۰۰۰
Cal/g C	۰/۲۱۵	۰/۱۲۶	۰/۰۶۱	۰/۰۳۲	۰/۱۱
انتگرال Cal/g	۹۴,۶	۳۶,۷	۷۰,۱	۴۴	۶۵
گرم تغییر Cal/g	۲۵۱۷,۶	۲۲۲۳,۴	۱۳۴۰	۱۰۰۵,۹	۱۵۱۴,۸
انرژی ویژه جهت تغییر ۳۰۰۰/۳۰۰۰	۳,۵۴x۱۰ ^۴	۵,۰۷x۱۰ ^۴	۷,۴۶x۱۰ ^۴	۱,۰x۱۰ ^۵	۶,۲۷x۱۰ ^۴
قدرت مورد نیاز جهت تولید (کلی)	۱۰۰	۱۵۰	۲۲۰	۲۹۰	۱۸۰

قدرت نسبی مورد نیاز جهت باربرداری حجم برابر در زمان برابر
جدول (۱) خصوصیات فیزیکی و مکانیکی مواد مختلف

نوع قطعه کار	ضخامت قطعه کار mm	قطر سوراخ mm	سرعت برساختی s	ولتاژ تست KV	معدل جریان برق KA	تعداد پالس ms	تعداد پالس Hz
فولاد ضد زنگ ۴۰۰	۰/۲۵	۰/۰۱۴	< ۱	۱۴۰	۶۰	۳	۳۰۰۰
آلیومین AL ₂ O ₃	۰/۷۴	۰/۱۳۰	۲۰	۱۲۵	۶۰	۸۰	۵۰
تنگستن	۰/۲۵	۰/۰۲۵	< ۱	۱۴۰	۵۰	۲۰	۵۰
مانتانیوم تنگستن ۹۰-۱۰	۱	۰/۱۴	< ۱	۱۴۰	۱۰۰	۸۰	۵۰
" " "	۲	۰/۱۳	۱۰	۱۴۰	۱۰۰	۸۰	۵۰
" " "	۲,۵	۰/۱۴	۱۰	۱۴۰	۱۰۰	۸۰	۵۰
فولاد ضد زنگ	۱	۰/۱۴	< ۱	۱۴۰	۱۰۰	۸۰	۵۰
" " "	۲	۰/۱۳	۱۰	۱۴۰	۱۰۰	۸۰	۵۰
" " "	۳	۰/۱۴	۱۰	۱۴۰	۱۰۰	۸۰	۵۰
آلومینیوم	۲,۵	۰/۱۴	۱۰	۱۴۰	۱۰۰	۸۰	۵۰
تنگستن	۰/۴۱	۰/۰۷۶	< ۱	۱۴۰	۱۰۰	۱۰	۵۰
کوارتز	۳,۱۸	۰/۰۲۵	< ۱	۱۴۰	۱۰	۱۲	۵۰

شکل (۱) سوراخکاری بر روی برندها لکترنی غیر در مواد مختلف

پارامترهای سوراخ ماشینی با پردازش لیزر

دستگاه آنتناب دهنده : بین ۵۰ تا ۱۵۰ KV
 جریان پرتو : بین ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ MA
 قدرت : ۰.۱۵ KW تا ۶ KW

رمان پالس : بین ۴ MS تا ۶۴۰۰۰ MS
 فرکانس پالس : بین ۱/۵ Hz تا ۱۶۰۰۰ Hz
 خلأ : بین ۱۰^{-۲} mm تا ۱۰^{-۴} mm

حد اقل اندازه است پرتو : بین ۰.۰۱۳ mm تا ۰.۰۲۵ mm
 طیف اشعاع پرتو : بین ۴%
 قدرت پرتو : بین ۱۰^۵ W/cm^۲ تا ۱۰^۹ W/cm^۲

عمق برش : تا ۶۴ mm
 زاویه برش : ۰.۰۲۵ mm بر اثرات با ضخامت ۰.۰۲۵ mm

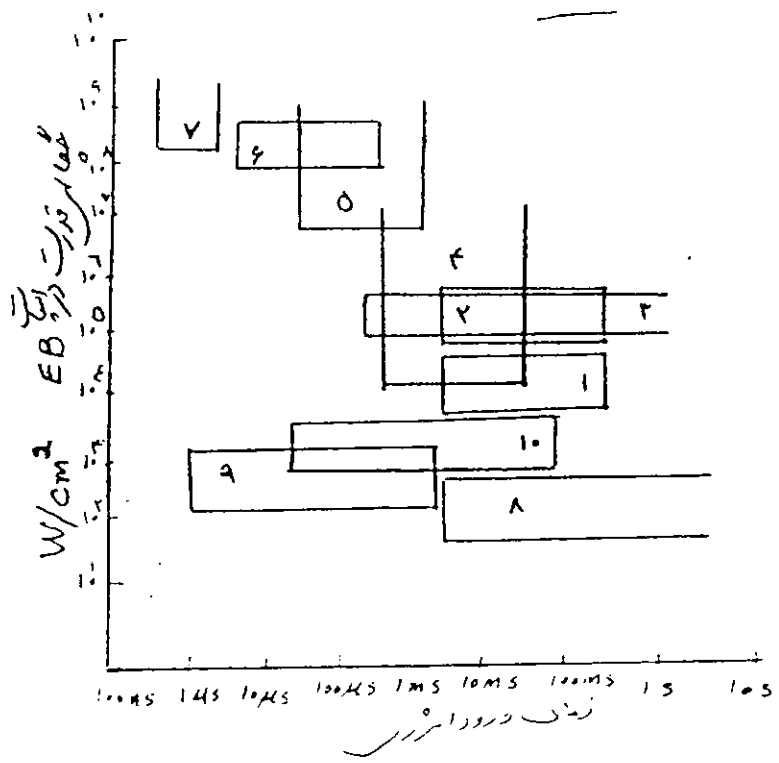
ضخیم قطر سوراخ : ۰.۰۲۵ mm برابر ضخامت ۰.۰۲۰ mm
 ۱ mm برابر ضخامت ۵ mm

این کدوب بدون سوراخ : بین ۱ تا ۲ درجه
 زاویه سوراخ به سطح : بین ۲۰ تا ۹۰ درجه

سرعت برش : حرم به جدول ۲ و ۴
 نرخ شار پرتو : تا ۴۰ mm^۳/s (حرم به جدول ۵)

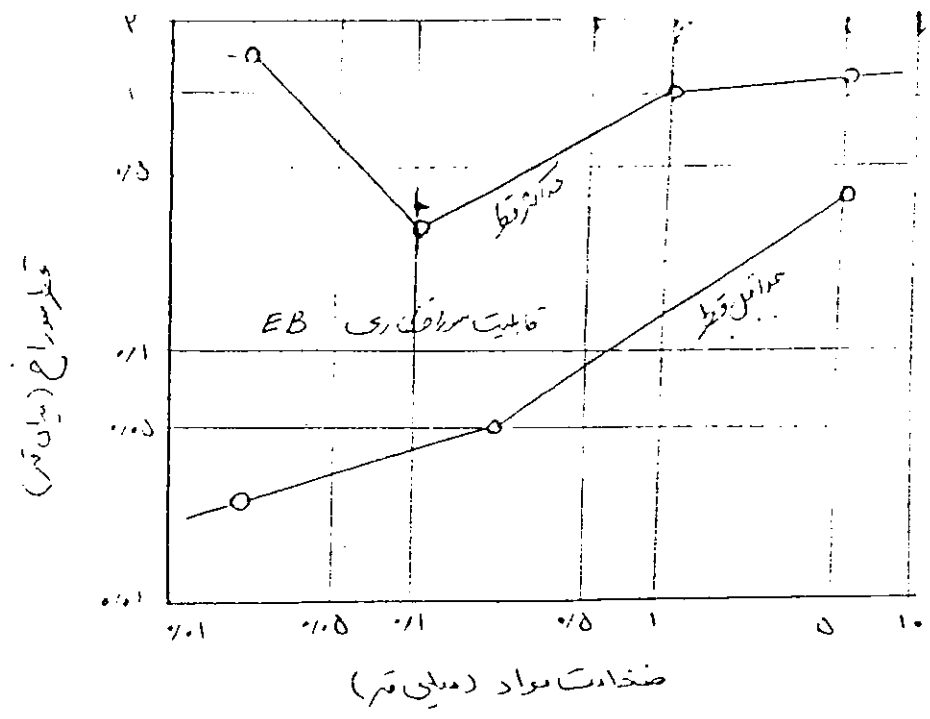
نرخهای پیشروی : تا ۲۵ mm/s
 نرخهای Perforation : تا ۵۰۰۰ سوراخ در ثانیه (در نقطه مکزک است و در حوله نمایی)

درانها : ± ۰.۰۲۵ mm بر قطر ۳۲ mm
 ± ۰.۰۱۳ mm بر قطر ۰.۰۱۳ mm (درصورت ۶)
 ± ۰.۰۲۵ mm
 ± ۰.۰۰۵ mm قابل حصول است



- نظرات
- ۱- سخت گازی
 - ۲- تبدیل لازر بزرگ
 - ۳- اتصال دارن
 - ۴- سوراخکاری
 - ۵- دریلینگ و میلینگ
 - ۶- فلزهای - کثرتکار
 - ۷- تصفیه
 - ۸- تراشیدن تراش زمان بلبری
 - ۹- تعادلت - الکتریکی
 - ۱۰- سوراخکاری بر پوستی

تعداد (۲) طیف کاربرد پرتوهای مختلف. طیف قدرت و زمان انکس



تعداد (۲) طیف سوراخکاری EB برای فولاد و شکل

حفره‌های صاف قطعه کار و سطح قدرت ^{راوند} EBم نقش این درز فنج باربرداری دارد.

تنگستن در این روش با نرخ 0.92×10^{-4} اینچ مکعب در ثانیه و 15×10^{-4} cm^3/s با یک مکعب در ثانیه

باربرداری می‌شود. در صورتیکه آلومینیم با نرخ 2.9×10^{-4} cm^3/s با همان میزان قدرت باربرداری می‌شود (۵۰٪)

در شکل (۶) تلانس‌های نوعی در حدود ۱۰٪ نهار است یا قطر سوراخ نشان داده شده است.

کونیک شدن (Taper) است (شکل ۷) و یا سوراخ موجب محدود کردن نسبت عمق به پهنا یا طول شده است.

با استفاده از کنترل میسر بر کوهها و پله‌ها و یک چاقی در صورت قطع کار، نرخ سوراخکاری ۵۰۰۰ سوراخ

در ثانیه برابر فلزات نازک و مجله سرامیک قابل حصول است.

تکنولوژی سطح

مراود زبری سطح برای سوراخها کونیک و برش در حدود $1 \mu m$ میکرومتر می‌باشد.

ماشین‌های پوزی الکترونی در رنج‌های مختلفی از چند صد وات تا ۶۰۰۰۰ وات با نسبت خلأ به عمل می‌آیند

که با حجم (۶ x ۹ ml). تجهیزات متعددی می‌توانند حل اندازه‌های با تفنگ الکترونی که می‌تواند در

منبع NC وارد شده شود و حرکت نماید و محدود دارد.

شخصیات برتویری

قطر برتو	۲۵ mm	۱۱۵ mm	۱۵۰ mm
دائیت جریان mA/cm	۱ @ ۲۵.۰ eV ۱۰ @ ۱۵۰.۰ eV	۱۸ @ ۱۰۰.۰ eV ۲ @ ۵۰.۰ eV ۴ @ ۱۵۰.۰ eV	۲.۵ @ ۱۵۰.۰ eV
یکنواختی Uniformity	± 1.0 OK ۱۲mm	± 0.5 ۱۰mm	± 0.5 ۱۲mm
دائمان برتویری	۱/۸۵	۱/۸۵	۱/۸۵

۶۱

بسمه تعالی

درس تولید مخصوص

روش های پیشرفته ماشینکاری

ماشینکاری به روش پرتو یونی Ion Beam Machining

دکتر مرتضی صادق عمل نیک

دانشگاه تبریز

دانشکده فنی - گروه مهندسی ساخت و تولید

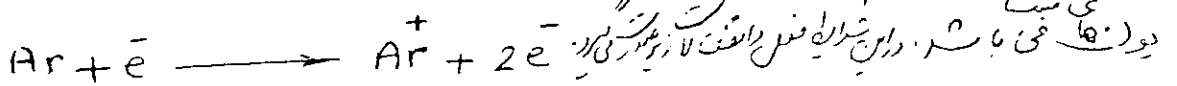
ترم پائیز ۱۳۸۰

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

نراند ما سنجاری با پرتو یون (IBM) Ion Beam Machining

در این روش از دو الکترود یکی مثبت و دیگری منفی استفاده می شود. الکترود منفی از جنس تنگستن میباشد. جریانات ولتاژی بین ۵ تا ۲۰ کیلو ولت بین دو الکترود برقرار می کنند. در اثر عبور جریانات الکتریکی مانند گداز می شود و اکثر تمام قسمت آند و کاتد و شتاب می گیرند. از بین دو الکترود جریان گاز آرگون را عبور می دهند. در اثر برخورد الکترودها با اتمهای گاز آرگون و ایجاد جرقه بین دو الکترود گاز آرگون یونیزه می شود. گاز یونیزه شده دارای اتمهای خنثی، الکترودها منفی و یونهای مثبت است. در این شرایط فعلی واکنشها به صورت زیر می باشد:



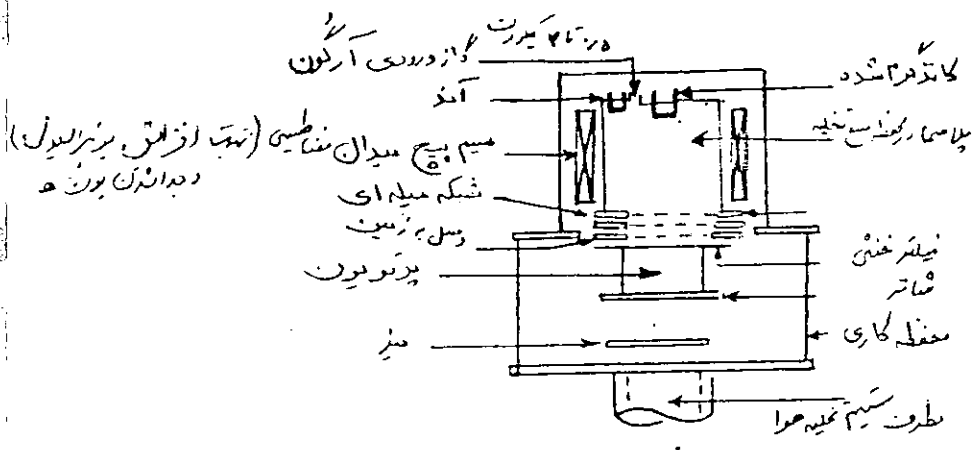
سپس توسط شکله میله ای یونها را از بالا سوراخها و قسمت قطعه کار حرکت و شتاب می دهند. شکلهها را معمولاً شکل ماتریس ۲ یا ۳ تایی (array) از صفحات کربن یا فولیومین می سازند. این مواد می توانند در مقادیر بخیری که توسط بیماران بویست انجام می شود مقاومت نمایند. کربن از جمله شکلهها، موازات صفحات درآید می باشد. شکل سوراخها و فاصلهها شکله نقش مهمی در تکنیکهای در این روش دارند.

در اثر برخورد یونها با سطح قطعه کار، آنها از سطح قطعه کار جدا شده و سطح قطعه کار سوراخها و شکلهها می شود. طبقه سطحی کما نیزم ما سنجاری با پرتو یون را می توان به قسمت های زیر تقسیم نمود:

- ۱- منبع یونها که تولید کننده یونهای می باشد
- ۲- شکله میله ای جهت استخراج و جدا کردن یونها از پلاسما و شتاب دادن آنها جهت قطعه کار
- ۳- منبسط کننده یونها جهت قطعه کار

زیادند حالتی که در آن برتری برتری برتری برتری باشد:

- ۱- بین دو الکترود و انرژی بین ۰.۵ تا ۲ کیلوولت برقرار می شود.
 - ۲- دو الکترود را در محیط خلاء با فشار 10^{-7} Pa قرار می دهند.
 - ۳- کاتد را از جنس تنگستن می سازند. در اثر عبور ولتاژ زیاد کاتد گرم می شود و الکترون های کاتد به سمت آنند مشتاب می گیرند.
 - ۴- گاز آرگون را بین دو الکترود عبور می دهند.
 - ۵- در اثر برخورد الکترون ها با اتم های گاز آرگون در منبج پلاسما و ایجاد جرقه بین دو الکترود یون های آرگون آزاد می شوند و گاز آرگون یونیزه می شود. فعل و انفعالات به سرعت زیر انجام می شود:
- $$Ar + e \longrightarrow Ar^+ + 2e^-$$
- ۶- توسط شبکه میله ای یون ها از پلاسما جدا و به سمت قطب کاتد راه می روند.
 - ۷- در اثر برخورد یون ها با سطح قطب کار، اتم ها از سطح کار جدا می شوند.
 - ۸- در شکل (۱۱) اجزاء یک ماشین پرتو یون نشان داده شده است.



شکل ۱۱ اجزاء یک ماشین پرتو یون

مشخصات منبع یون در جدول زیر نشان داده شده است.

قطر پرتو cm	ولتاژ پرتو KV	چگالی جریان پرتو mA/cm^2	جریان پرتو mA	Ion gun نوع یون
۵	۲-۱۵	۱۸۵	۱۰-۵۰	کاتیون گامفون Kaufman
در نقطه کانونی mm	۰-۲۵	۱۰ ^۴	۱۰	رشته دو لایه پلاسما Duoplasmatron

منبع پلاسما:

صافتر که در شکل (۱) دیده می شود، فیلامنت که از جنس تنگستن می باشد در اثر عبور جریان الکتریکی گرم می شود و به عنوان کاتد در زمان که ولتاژ بالایی ریزد الکترون ها از کاتد و به جهت آند حرکت و شتاب پیدا می کنند. در اثر برخورد الکترون ها با اتم های گاز آرگون در منبع پلاسما که دارای فشاری حدود 10^{-4} torr می باشد یون های آرگون در اثر تخل و انفجالات آزاد می شوند.

حجت ادراستی بریزاسیدون (توبه) در حال الکترودن فیس که در کاتد منفی میس را هم دریا
الکترون منفی ایجاد می شود و در الکترون ایجاد می نماید.

شکل میله ای

پرت ها از پلاسما بر سیده شده میله ای جدا می شوند. این شبکه معمولاً از ۲ یا ۳ طبقه از جنس کربن (Carbon) یا مولیبدن (molybdenum) ساخته شده است. این صفحات می توانند در مقابل پیماران های یونی مقاومت نمایند. شکل سوراخ ها و فاصله این شبکه ها نقش مهمی در حرکت و جریان یونی می نمایند. شکل میله ای پرتو (در شکل شبکه زیر) را به تینیل زمین وصل می کنند در نتیجه این شبکه دارای سطح منفی بیشتری نسبت به آند می باشد. بدین ترتیب این شبکه میدان منفی ایجاد می کند که جهت جدا کردن یون ها از پلاسما مورد نیاز می باشد.

درست شبکه میله ای را در پتانسیل کمتری نسبت به پتانسیل زمین نگه میدارند در

نتیجه از فشار الکترودن ها از پلاسما جلوگیری می شود.

مدیریت شبکه میله ای را در پتانسیل آند نگه میدارند تا موجب بهبود کار منبع شود.

در قوت یون ها اگر اثر مثبت قطعه کار جانبی که باید ماشینکاری شود کشیده می شوند

قطعه را نسبت صفر تا نود درجه روی فنر کار قرار میدهند

۱- شبکه زمین: یکی میدان منفی را در زمین یونها، که پتانسیل زمین است

۲- شبکه گرم: حدیثی از فشار الکترودن ۴۰ از پلاسما، که پتانسیل آندی است، شبکه زمین دارد.

۳- شبکه سرد: سرد کار منبع، هم پتانسیل با آند

شبکه گرم میله ای

و حدود دارد و

در این روش از درآوردن یکی مثبت و دیگری منفی
مصلح حذای بسیار 10^4 می باشد. بین الکترود و کاتر حدود 2×10^{-4} برقرار است
گاز آرگون وارد شده و در اثر ایجاد جرقه بین دو الکترود پرتیزه می شود. الکترودها توسط
قطب مثبت مرتبه می شوند و پرتیزه بر بورد آمده توسط کولر می ترانته جمع و باز ترانه. این یونها با
حریان لبه منفی حرکت می کنند (مثل ریش رانه کار براف) و وقتی به در افکار صاف در
بار منفی وارد می شوند از سد افق می شوند و اگر برخورد با بعضی پیش نماید الکترول میگذرند و

آزاده سطح قطعه کار حرکت باشد برخورد این آهن با سطح قطعه کار باعث می شود تا آهنهای سطح به پرت
پرت شوند و باز بر بار فرین ظرف و آهسته انجام گیرد و خوردن هم پس از برخورد به طرف دیگر پرت شوند.
گاهی اوقات لختن از این آهن با سطح قطعه کار نفوذ می کنند عمده نالین از برخورد بر میگذرند. از نالین
لخت و شد از تمام سطح و اکثر آن لخت باشد از تست لخت با برابر می شود. سوال سطح قطعه کار
در سطح ماسکوی پوشش داده در مقابل فرج آهن آرگون معافند و درین ترتیب فقط از نالین مورد نظر
باید صرفت بگیرد. نا این روش می توان با لختی بسیار لخت در حد آن تست را انجام داد و چون در این
می می صرفت می گیرد حقیقتاً فایده کند است.

با این پرده می توان بسیار از قابلیت ها را در مقابل کوچک جابجای داد (مثلاً در ساخت میکرو پروسسور)
ساز می توان ماسک روی به اثر در نیاز است که با این روش پرتو کاتد لب این کار را انجام داد.

شدت جریان یونی مثبت بسیار کم در حدود 10 mA تا 50 mA و در حقیقت جریان بین 10^{-8} تا 10^{-10} mA
می باشد و می توان دایره از قطر 3 تا 150 mm را همزمان با لختی را کرد. با دانه و لختی در می توان

در برابر ابعاد داد و تا حدود میلی متر با بر بار نمود لکن زمان زود نیاز دارد

شکله بر روی راصه در پهنای زمین کشیده اند که با سطح منحنی شیبه نسبت به آن کشیده می باشد. در نتیجه این شیبه میدان منحنی ایجاد می کند که جهت جابجایی یونها از پلاسمای مورد نیاز است.

در این شکله راصه در پهنای زمین کشیده اند که با سطح منحنی شیبه نسبت به آن کشیده می باشد. در نتیجه از فرکانس الکترودها از پلاسمای جابجایی می نماید زیرا از انحراف

شکله هم راصه در پهنای زمین کشیده اند که با سطح منحنی شیبه نسبت به آن کشیده می باشد. در نتیجه از فرکانس الکترودها از پلاسمای جابجایی می نماید زیرا از انحراف

در این شکله راصه در پهنای زمین کشیده اند که با سطح منحنی شیبه نسبت به آن کشیده می باشد. در نتیجه از فرکانس الکترودها از پلاسمای جابجایی می نماید زیرا از انحراف

در این شکله راصه در پهنای زمین کشیده اند که با سطح منحنی شیبه نسبت به آن کشیده می باشد. در نتیجه از فرکانس الکترودها از پلاسمای جابجایی می نماید زیرا از انحراف

در این شکله راصه در پهنای زمین کشیده اند که با سطح منحنی شیبه نسبت به آن کشیده می باشد. در نتیجه از فرکانس الکترودها از پلاسمای جابجایی می نماید زیرا از انحراف

$$I = \frac{\pi \epsilon_0 V^{3/2}}{4} \left(\frac{2q}{m} \right)^{1/2} \left(\frac{d}{I_e} \right)^2$$

ϵ_0 Permittivity دی الکتریک
 V اختلاف پتانسیل بین شکله ها
 d (بار) فاصله بین
 m جرم یون
 d قطر آبجکت در شکله
 I_e فاصله مؤثر شکله

از جمله طرز نگارش، بسته به جریان یونها در پهنای زمین کشیده اند که با سطح منحنی شیبه نسبت به آن کشیده می باشد. در نتیجه از فرکانس الکترودها از پلاسمای جابجایی می نماید زیرا از انحراف

در اینجا نحوه برخورد بین یون و اتمی بررسی می شود

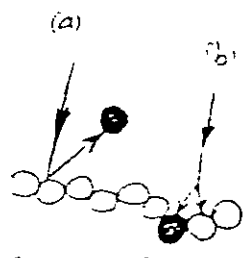
اولاً در زمانیکه یون یک قطره طبیعی به یون قابل مقایسه با اندازه اتم باشد
 تا این وقت که یون، سطح یک ماده برخورد می کند معمولاً با اتم در سطح قطعه برخورد می کند

این برخورد غالباً در جهت بلعینی حرکت یون به سطح قطعه اتفاق می افتد
 به عبارتی برخورد

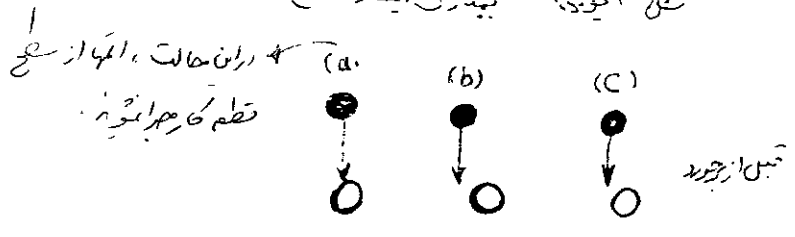
به معنی آنکه اثر جرم یون که بیشتر از جرم اتم سطح قطعه باشد، یون از سطح قطعه کار دوری شود. و
 اتم بداخل قطعه کار بسته فرو می رود. این مسئله در شکل (۲a) نشان داده شده است.

به معنی آنکه اگر جرم یون نزدیکتر از جرم اتم سطح قطعه کار باشد، بعد از برخورد با آن، یون و اتم از محل
 برخورد با یکدیگر جدا می شوند. معمولاً خوردن بداخل قطعه کار (این در صورتیکه انرژی یون در سطح قطعه کار) این مسئله در شکل (۲b)
 نشان داده شده است. معمولاً خوردن بداخل قطعه کار تا آنقدر که کمتر از انرژی یون *incident* یعنی می تواند فرو رود

اگر اتمی نزدیکتر از انرژی *lattice*



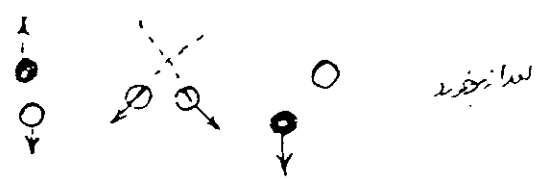
شکل (۲) یون و اتمی
 یون بزرگ، یونید سطح قطعه کار را



شکل (۲) یون و اتمی
 یون کوچک، اتمی از سطح
 قطعه کار جدا می شود



در جهت برخورد



لغزانه خورد

شکل (۲) سطح برخورد بین یون و اتمی (۲) یون کمتر از جرم اتم است

نوع برخورد با یون و اتمی، اتمی را از سطح قطعه کار جدا می کند. اما اگر یون با زاویه *glancing* یا اتمی سطح قطعه برخورد کند

تعمیرات

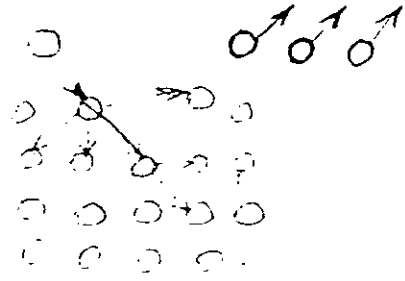
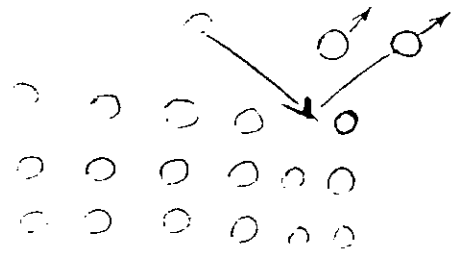
در صورتی که در (۱) قرار داده شود در سال اول در هر دو طرف تا آنکه سطح مقطع تا زاویه ۶۰ درجه است
این اتم در هر دو طرف از آن که در ابتدا در سطح مقطع کار دور رود.

در صورتی که در (۲) قرار داده شود در سال اول در هر دو طرف تا آنکه سطح مقطع تا زاویه ۶۰ درجه است
در صورتی که در (۳) قرار داده شود در سال اول در هر دو طرف تا آنکه سطح مقطع تا زاویه ۶۰ درجه است

در صورتی که در (۴) قرار داده شود در سال اول در هر دو طرف تا آنکه سطح مقطع تا زاویه ۶۰ درجه است

در صورتی که در (۵) قرار داده شود در سال اول در هر دو طرف تا آنکه سطح مقطع تا زاویه ۶۰ درجه است

در صورتی که در (۶) قرار داده شود در سال اول در هر دو طرف تا آنکه سطح مقطع تا زاویه ۶۰ درجه است



در صورتی که در (۷) قرار داده شود در سال اول در هر دو طرف تا آنکه سطح مقطع تا زاویه ۶۰ درجه است

در صورتی که در (۸) قرار داده شود در سال اول در هر دو طرف تا آنکه سطح مقطع تا زاویه ۶۰ درجه است

۴۴

بسمه تعالی

درس تولید مخصوص
روش های پیشرفته ماشینکاری

ماشینکاری به روش التراسونیک Ultrasonic Machining

دکتر مرتضی صادق عمل نیک

دانشگاه تبریز

دانشکده فنی - گروه مهندسی ساخت و تولید

ترم پائیز ۱۳۸۰

ماشینکاری (از طریق مافوق صوت) - Ultrasonic machining (USM)

شددت روش های نوری و لیزر و روش های مخصوص ماشینکاری جهت ماشینکاری مواد سخت و شکننده محققین را به ساخت توسعه ماشینهای فراصوتی (ماشینکاری مافوق صوت) هدایت نمود. اویس بالاموث Lewis Balamuth این فرایند را در حدود پنجاه سال پیش کشف کرد و در سال ۱۹۵۰ میلادی سخت ماشینهای فراصوتی شروع شد. ملین وسیعی از مواد سخت (مانند steel, titanium carbides و tungsten و غیره) و مواد شکننده (مانند ceramium, quartz, Glass, Ceramics, ferrites, silicon و غیره) را می توان بصورت موثری با این روش (ماشینکاری از طریق مافوق صوت) ماشینکاری نمود.

بر خلاف روش ECM و EDM، نرخ برابری مواد از روی قطعه در روش USM نسبتاً به همگامی شکلندگی قطعه دارد. از روش USM در صنایع مختلف مانند صنایع هوافضا، الکترونیک، نوری و صنایع خودرو سازی و غیره استفاده می شود. رشد در رسم این روش ماشینکاری بصورتی بوده که تا سال ۱۹۶۰ میلادی بیش از ۵۰٪ تقاضا در رابطه با USM به چاپ رسیده.

در روش ماشینکاری مافوق صوت (USM)، جدا کردن مواد از قطعه از طریق چکش کاری یک ابزار ارتعاشی (مافوق صوت) بر ذرات مواد ساینده (abrasive Particle) در روی قطعه کار و فروردن ذرات مواد ساینده در درون قطعه کار انجام می شود. بطور کلی در فرایند ماشینکاری USM سه فعالیت زیر انجام می شود:

- ۱- وارد کردن فرکانس متغیر (چکش کاری متغیر) به ماده ای مواد ساینده بین ابزار و قطعه کار
- ۲- جدا سازی براسه های ریز (microchipping) در اثر فروردن ذرات مواد ساینده با قطعه کار
- ۳- در اثر عبور ذرات مواد ساینده در بعضی از مواد مانند سرامیک موجب فرسایش آن می شود.

در عوامل فوق الذکر مهمترین فاکتور در برابری در USM می باشد. او فاکتور مهم فقط در بعضی از مواد مانند گرافیت اثر دارد.

پسین کاری از طیف اولتراسونیک یکی در مسیر از روش های پیشرفته ماشینکاری یا تولید محصول است که در آن اسراج اولتراسونیک به همراه ابزار انتقال شده و با استفاده از اصل ساینده در فضای بین ابزار و قطعه کار، ذرات بزرگ کوچک (در هر کوشن نوسان ابزار) از سطح قطعه کار جدا شود. در این فرایند معمولاً بارهایی بر ابزار اعمال می شود بعد از آن که در طول زمان ماشین کاری ابزار (یعنی بر سطح قطعه کار) وارد می نماید و سوار شده (abrasive Particle) را مداخل قطعه کار فروری برد. تمام اینها در حین جدا کردن ذرات میکروکلون از سطح قطعه کار در هر کوشن نوسان می شود.

اسراج اولتراسونیک دارای فرکانس زیاد و دامنه نسبتاً کم میباشد که منبسطی از اسراج صدای خفیف ها را (۱۲ هرتز تا ۷ مگایهرتز) تشکیل می دهند.

- اولین بار ردولف کوئینگ Rudolph Koenig ارتعاش اولتراسونیک را در ۱۳۰ سال پیش تولید نمود.
- در سال ۱۸۸۴ گالنت Galton در زمینه تولید اسراج اولتراسونیک در هوا فعالیت نمود.
- در سال ۱۹۰۷ آلتبرگ Altberg در زمینه تولید اسراج اولتراسونیک در هوا و اندازه گیری آن تحقیق و فعالیت نمود.
- در جنبه جهانی اولن پروفسور لانگوین P. Langvin با استفاده از کرسنال کوآرتز اسراج اولتراسونیک بر روی درایو تولید در طول سبب جهانی اول از اسراج اولتراسونیک جهت یاتسج زیر دره های ارتعاشی شد.
- در سال ۱۹۲۷ خواص و اثرات اولتراسونیک در جمله ذره زرد پستول اچ ام کلننده توسط وود و لومیس Wood & Loomis بر کاشه شد.
- در سال ۱۹۲۹ سوکولو Sokolov از اولتراسونیک پیوسته جهت سرت غیر فرب بار ادرین با استفاده شد.
- در سال ۱۹۴۶ اولتراسونیک عبدال تک وسید ماشینکاری وارد بازار گردید.
- عبدالمصیب جهانی دوم ماشینکاری زرد پستول و با عارضه شد.
- سال ۱۹۶۰ رشد و توسعه اولتراسونیک بعد از آن بزرگترین بیش از ۵۰ مقاله علمی چاپ رسید.

کاربرد های اولتراسونیک

از اولتراسونیک در موارد زیادی استفاده رومی شود. لغذات مثال

- جهت سوراخ های سوراخ کننده
- جهت ماشینکاری سوراخ های نقطه عارض و شکسته ای که به روش های سنتی در برش های مختلف قابل ماشینکاری است
- جهت جوش دادن پلاستیک ها بدون حرارت و چسب
- از لرزه های اولتراسونیک جهت پاک کردن فسیل ها در ژئولوژی و مثال مثال استفاده رومی شود.
- در صنایع نوردن لایه های نازک تر از کشتن محلی و کشتن سیم و غیره جهت لرزه های قابل مشاهده و کاهش اصطکاک و
- در زمینه پودر شده سوخت و کامل کننده احتراق در موتور ها و کاهش آلودگی محیط زیست
- در تست غیر تخریب NDT و هولوگرافی Holography جهت عیب یابی درون بدنه قطعات
- در عکسبرداری از درون اجسام (های اشعه X)
- در کشتن سلول ها و باکتری ها در تحقیقات بیولوژیکی
- استفاده در اولتراسونیک در درزگیرها
- در دستهای شیمی سیر یاب برای نابینایان
- در رادار های آموزشی
- در کشف زیر دریایی ها
- مایه های کاری قطعات سرامیکی و کربن دیتی

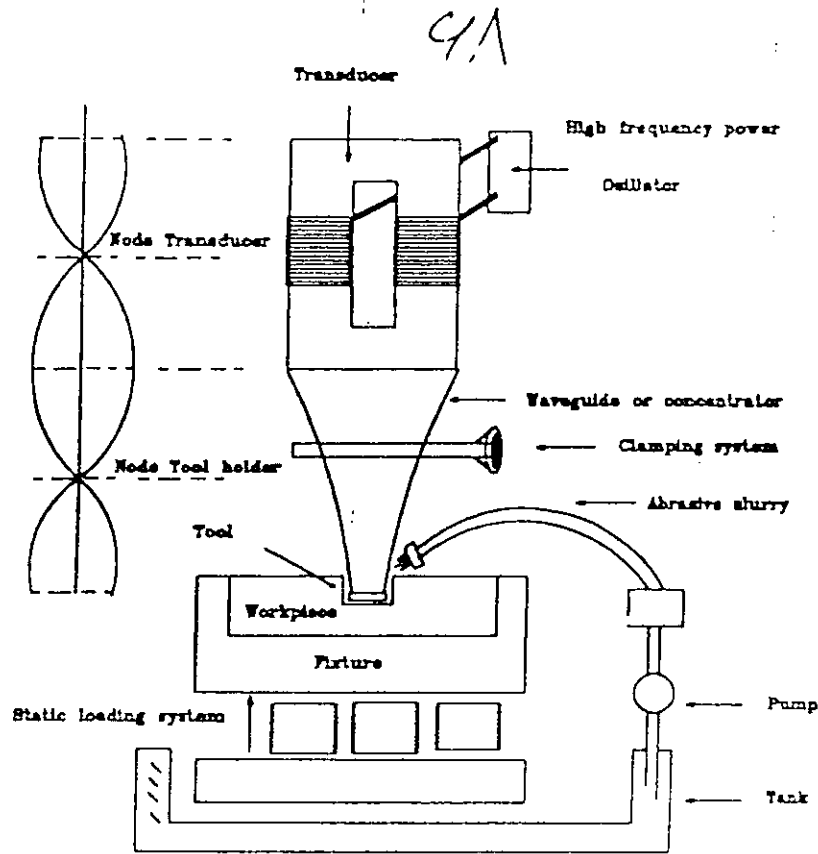


Fig. 2 Schematic diagram of ultrasonic machining

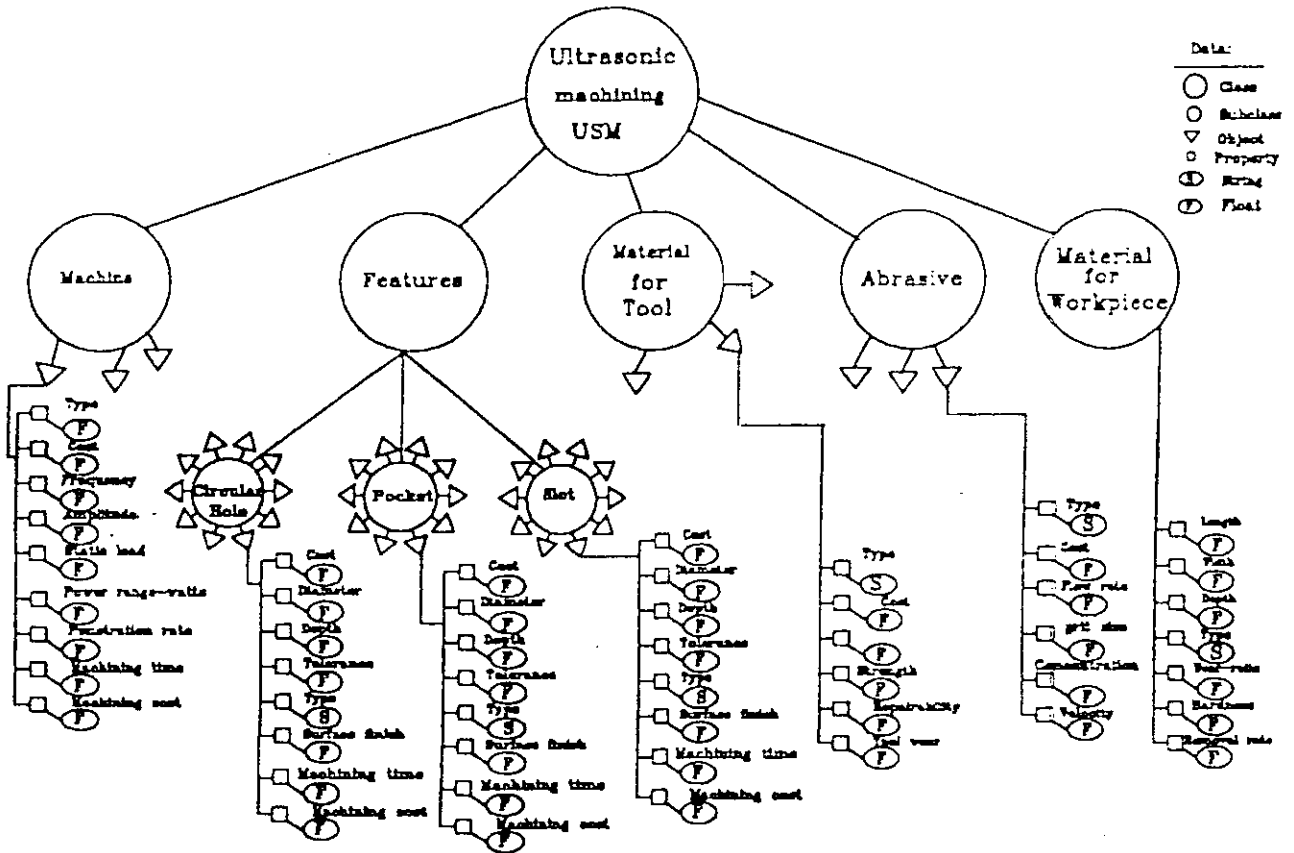


Fig. 3. USM object oriented diagram

طیبر کل ماشین های ادوات سونیک از سمت زیر تشکیل می شوند

- ژنراتور قدرت مدار جریان نوسانی (Power Generator)

- تبدیل کننده یا مبدل جریان الکتریکی به میدان نفاذی در سوناسونیک (Transducer)

- متمرکز کننده انرژی نوسانات (Concentrator) یا (Mechanical amplifier)

- سیستم اعمال بار ثابت بر ابزار که بر سطح قطعه کار وارد می کند static loading system

- سیستم گردش گِل ساینده abrasive slurry system

- ابزار tool

- قطعه کار از جنس شکننده، ترد و یا سخت work piece

در این فرایند توسط اسپلاتری با فرکانس حدود ۲۰ کیلوهرتز جریان الکتریکی تولید می شود

این جریان نوسانی توسط مبدل (Transducer) تبدیل به میدان نفاذی در سوناسونیک می شود

سپس توسط متمرکز کننده انرژی نوسانات (Concentrator) واحد نوسانات مکانیکی تقویت شده و بر

ابزار منتقل می شود. و ابزار با راننده بین ۰.۵ تا ۰.۱۴ میلی متر به نوسان در می آید. معمولاً ابزار

برای سیم و یا پیچ و میله و غیره متمرکز کننده منتقل می شود. در سطح مورد اختاری معمولاً قطعه ابزار ۱ تا ۱۰ میلی

کوچکتر از قطر سوراخ در قطعه کار در نظر می گیرند. هر چه قطر گِل ساینده ترا شود تا به حدی توان نوسان و سوناسونیک

۰.۱۳ تا ۰.۱ میلی متر در آن آورده می شود. و در این روش ۲۰ تا ۱۰۰۰ اختلاف می شود. جهت این امر

مکانیزم در واقع تراش ابزار و فرسایش کار و پرداخت (در ابزار باقیمانده) ارتقا ده می کنند. جهت داشتن ماشین کاری

بهینه لازم است سطح اعمال بار ثابت در طول فرایند ماشینکاری به سستی در حد معین و ثابت که دائمی شود

همچنین سیستم گردش گِل ساینده باید به صورتی باشد که همواره گِل نورا به محل ماشین کاری آورده و محل آن

تازه را همراه با مواد حاصل از فرسایش کاری از محل براده برداری دور نماید

زیراقتور الکترواستاتیکی

زیراقتور الکترواستاتیکی تابعی گننده انرژی برعین هسته اولتراسونیک است. در راه
رابطه زیر اکتور تابعی انرژی فوسانی هسته اولتراسونیک است. زیرا اکتور از
حید نسبت زیر تشکیل می شود

- ۱- اوسیلاتور یا نوسان ساز (مؤلفه اوسیلاتور ایجا مروج لغویس با فوکانس دنگوله در مورد سن ۱۹۶۸)
- ۲- تقویت وکنر (کرمؤلفه تقویت دامنه مروج لغویس حاصل از اوسیلاتور را بهبود دارد

۳- تقویت جریان

۴- تقویت زمانی جریان (در صورت نیاز)

مشکلترین قسمت تراکتور قسمت تقویت زمانی جریان است. زیرا با هر که مجموعی تراکتور
وصل می شود یک بار اهن مت ده نسبت بکم یک اهن وکنس تقریباً بزرگ و در فوکانس نسبتاً
که اوسیلانس آن از رابطه $L \omega = 2\pi f L$ است می آید. چون هم L هم f
ضیی زیاد است بار دارای اوسیلانس ضیی زیاد است و برابر این که جریان مثلاً ۱۰ آمپری
به آن تریوی شود به دنگه ~~خوبی~~ نیازی است (دنگه در زیر از کنگولات) که این مسئله
در راه تراکتوری ممکن نیست. پس باید با اصلاحی در دنگه اثر سلسی را تقلیل داد. این
مسئله با استفاده از خازن امکان پذیر می باشد. مسئله که مانده آن تراکتور را لغویس می کند
نسبت تقویت کرده وین است.

مدل یا تراکتوری

صحت مدل غیر با ذات الکترونیکی به ارتفاعات مکانیکی دورا وجود دارد!

- ۱- استفاده از خاصیت پینرالکترونیک لغویس کرسالی
- ۲- روش مضاطیسی (استفاده از یک سیم بیچ که بدو جهت ای مضاطیسی بعبیده شده است
حسته مضاطیسی در اثر عبور یک جریان متناوب با فوکانس بالا از سیم بیچ تغییر طول می
دهد همین ترت در سلسی ها هر چه پینرالکترونیک از این روش به جهت تولید ارتعاش استفاده می
گشته مدل ت بل یک سیم در دنگه در دنگه نازک است که از یک طرف فقه شده است که در این سیم
الکترونیکی و جداول سطح هسته سیم می باشد. حسته را در دنگه در سیم سازه تا بتوانند افت فیلو (جول)
لتن (eddy current) را کاهش دهند. و انرژی انتقالی را حداقل برسانند و همچنین حسته بتوان

۴۹
 یکی از روش‌های انتقال انرژی از یک نقطه به نقطه دیگر موج است. بطور کلی انتقال انرژی به دو طریق انجام می‌شود

۱- بوسیله انتقال ماده (مانند همراه انرژی جنبشی و انرژی درونی و عملی محل در انتقال می‌شود)

۲- انتقال انرژی بوسیله موج (در این روش ماده به همراه انرژی منتقل نمی‌شود)

در اثر حرکت ارتعاش ماده موج ایجاد می‌شود و انرژی حاصل از منبع ارتعاش بوسیله محیط منتقل می‌شود

این موج موجب می‌شود در محیط یک تغییر وضعیت (تغییر فشار، تنش، سرعت و یا تغییرات دیگر) ایجاد شود

اگر راستای امواج و ارتعاش ذرات موازی هم باشند امواج را امواج طولی و اگر راستای

انتقال امواج عمود بر راستای ارتعاش ذرات باشد امواج برشی یا عرضی می‌نامند

امواج طولی برآفتی در فضا است و اجزای ذرات موازی جهت ارتعاش و با سرعت بالا حرکت می‌کنند و در آن تولید می‌شود

طول موج طولی در آنرا هم کوچک است و سرعت آن در یک جسم جامد از طول موج در مایع و در هوا بیشتر است

$$C = \sqrt{\frac{E_r}{\rho} \frac{(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)}}$$

C سرعت
 ρ دانسیته یا چگالی جسم
 E_r مدول یانگ
 μ نسبت پواسون

سرعت انتقال موج تابع نسبت قطر مقطع عمود بر انتقال امواج است و با افزایش این نسبت زیاد می‌شود

سرعت این امواج در مایعات و گازها از طریق رابطه زیر بدست می‌آید

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho \Delta s}} \quad C = \sqrt{\frac{K \rho_0}{\rho}}$$

$$C = \sqrt{\frac{1}{\rho B_{ad}}}$$

B_{ad} تراکم پذیری آدیاباتیکی
 B_{is} تراکم پذیری ایزوثرمالی
 ρ₀ چگالی
 K نسبت گرماهای ویژه

ρ دانسیته یا چگالی جسم
 E_r مدول یانگ
 μ نسبت پواسون

امواج عرضی یا برشی با اثر حرکت ذره حول محور موج عرضی تولید شده در جسم، بوسیله یک تغییرات

برش روی یک صفحه از جسم می‌باشد. در این روش کل جسم بصورت عرضی ارتعاش می‌نماید. در این

الاستیته ای در برابر برش ندارد و تغییرات در آنجا زیاد است. امواج عرضی غیر ممکن است. بطور کلی سرعت

در شکل () نسبت های اصلی یک ماشین اولیه است و نشان داده شده است.
 که ادبی مناسب اولیه است ممکن است با ساخت عناصر زیر تعیین شود.

ابزار:

ابزار بازرگانی: ۲۰ تا ۳۰ کلوهر نوسان می کند. ابزارهای توانا بصورت جداگانه

طراحی و بدنه بیج: بصیرت و یا جوش برنج، سیم کشنده، متصل نمود. همچنین شکل گرفته را

می توان بصورتی طراحی نمود که مهارت آن را ابزار تشکیل دهد. در دو حالت با مجموع طول سیم کشنده

و ابزار بصورتی باشد که از کل در می کشد مربوط به طول سیم کشنده ایجاد نکند. اتصال ابزار به سیم کشنده

بدنه بیج از بی فایده است نسبت این اعداد در نوع خاصی با راننده حدود ۱۰۷۶ میلی متر مربع سطح می شود.

مقدار مجموع ابزار و سیم کشنده را کمی بزرگتر از طول در دو حالت (نصف طول موج) انتخاب می کنند تا بتوان

در زمان طولانی تر ~~در~~ طول تعویض ابزار ماشین کاری نمایند. این اضافه طول تا اثر اندکی بر راننده

اثر ندارد و با داشتن ابزار و کوبه شدن طول، راننده افزایش یافته و تا اندکی کوتاه تر و طول

در دو حالت هندسی در آن ابزار در ماشین در استفاده نمود. در استفاده کار ابزار و قبل از کشیده شدن آن

لازم است از طول آن کمی تری ارتقا دهد نمود و هر چه از طول ابزار کم می شود لازم است در جابجایی

و افزایش داد. بطور کلی ابزار باید دارای هندسه و تقادد در برابر سایش و دارای استحکام در برابر شکنندگی باشد

سایش ابزار را باید مستقیماً با سایش ابزار و قطعه کار و محل سایش دارد. سایش ابزار در آن برنج

مس، فولاد نرم، فولاد فولاد و سلسله کار با هم باشد. ابزار با سایش آسان قابل استیغاری و حداقل سایش را در عمل

نسبت سایش ابزار به سایش قطعه کار برابر ابزار و قطعه مختلف از نظر سایش به هم فرق دارد. این سایش

در جدول زیر مشخص شده است.

جنس ابزار	جنس قطعه کار	
	سلسله کار باید	سسیم
برنج مس	۱ : ۰/۷	۱ : ۵۰
		۱ : ۲۰
فولاد نرم	۱ : ۱/۴	۱ : ۱۰
فولاد فولاد (SA)	۱ : ۴/۸۵	۱ : ۲۲
فولاد ضد سایش	۱ : ۲/۸۱	۲ : ۱۴۵
سلسله کار باید	۱ : ۰/۹	۱ : ۱۰۰

جنس ابزار
 سیم ابزار
 جنس قطعه کار
 سلسله سیم

طول کانال را با عمل نقش ها و حداقل آسب پذیری در میدان منفی طوسی دهد. همین مورد
 استفاده هستند. در مقادیر خوبی در مقابل خشکی داشته باشد. در میان مواد و فضاهای
 عمده از شکل و مکانیزم آن استفاده می کنند

تمرکز دهنده Concentrator ابزار قدر دار در انتقال بار در معین بر فوره زایش کننده است
 تمرکز دهنده بین جدول یا براسند بوسه و ابزار قدر دار در انتقال بار در معین بر فوره زایش کننده است
 تمرکز دهنده عمل هدایت و انتقال و تمرکز اسراج اولتر استونیک را در یک سطح کوچک میده دارد
 در واقع نقش تمرکز کننده تقویت دهنده استقامت و تمرکز انرژی، برای حرکت در آوردن ابزار است
 مستند کننده بین هسته و ابزار واقع می شود. تمرکز دهنده با این ابزار در نقطه شکره در مقابل خشکی
 را در مقادیر زیاد باشد. موج رفت حتماً رسیدن به انرژی تمرکز کننده و ابزار به تمام الکتریسیته
 بر روی سطح نرم عمل مود و تکمیل شکل هدایت کننده بوجود آید.

تمرکز دهنده ← هدایت و انتقال و تمرکز امواج الکترونیکی در یک سطح کوچک
 تقویت دهنده استقامت و تمرکز انرژی برای حرکت در آوردن ابزار

۷۱
نظریه کلی در فرآیند ماشینکاری USM ، پارامترهای مختلفی در فنون کاربرد برای توجیه شده که عبارتند از:

- ۱- فرکانس ، دامنه ارتعاش و فشار ابزار
- ۲- نوع و اندازه دانه مواد ساین
- ۳- ^{حجم} غلظت مواد ساین و جهت حرارت آن (که معمولاً بین ۲ تا ۵ درجه سانتیگراد است)
- ۴- نوع مواد (قطعه کار) و مشخصات و ویژگی‌های آن
- ۵- شکل هندسی و مشخصات شیخه (اشکال هندسی) ابزار و قطعه کار

- ۶- زمان ماشینکاری ، بهره‌وری و نرخ پیش روی ابزار
- ۷- بررسی نیروی متحرک

در این روش ماشینکاری از یک تبدیل ارتعاش صدا resonance transducer

جهت انتقال ارتعاشات با فرکانس بالا به ابزار ساین استفاده می‌شود، تا انرژی الکتریکی دریافت شده از اوسیلاتور را به ارتعاشات مکانیکی تبدیل نماید. جهت ماشینکاری USM خروجی مدول جهت ارتعاش در آورده می‌شود. این خروجی با سینی به اندازه ای اغذیه شود تا خروجی و دامنه ارتعاش را به اندازه از نیاز نماید که برابر ماشینکاری نماید. جهت انتقال از وسیله ای به نام ابزار در Horn یا tool holder استفاده می‌کنند. ابزار ساین یا Horn یک وسیله ای جهت هدایت موج و فشرده کردن موج می‌باشد که از یک طرف به انتهای تبدیل و از طرف دیگر به سر ابزار وصل می‌شود. ابزار در صورتیکه ^{خوب} ~~مکمل~~ ناقص می‌باشد (که فایده استغای نیز نباشد) سطح مقطع آن به تدریج از سمت تبدیل به سمت سر ابزار کم می‌شود. شکل هندسی ابزار مکمل شکل هندسی طراحی (قطعه) شده (Complementary) می‌باشد و از سر ابزار به انتهای ابزار در وصل می‌شود. و مواد ساینده سخت و نرم بین ابزار و قطعه کار هدایت می‌شود.

جدت عملیات موثر ماشینکاری مانوفکتورینگ USM - ماشین ابزار مورد استفاده با سینی کار باشد
 ابزار را با انرژی الکتریکی و در فرکانس داده شده به ارتعاش درآورد. فشار استاتیکی اثر زبری
 روی خوردگی ابزار و نرخ باربرداری ایجاد کردن بود از روی قطعه کار دارد. افزایش فشار استاتیکی
 تا حد معینی موجب افزایش خوردگی ابزار و نرخ باربرداری می شود، اما در حدی که فست راست می
 از حد معینی بگذرد، آن پس نرخ باربرداری کاهش می یابد.
 دامنه ارتعاش نیز اثر مستقیمی بر نرخ باربرداری دارد. افزایش دامنه ارتعاش تا حد معینی موجب
 افزایش نرخ باربرداری می شود، اما اگر دامنه ارتعاش از این حد معین شده افزایش یابد نرخ باربرداری کاهش می
 با استفاده از ماشینکاری التراسونیک می توان سردانه های از قطر 0.076 mm تا 89 mm میل
 و به عمق 6 mm میلی فر را در قطعه کار ایجاد نمود. در این روش ماشینکاری می توان به
 صافی سطحی بین $0.2 \mu\text{m}$ تا $1.5 \mu\text{m}$ میکرو متر در این هیچلند اثرات نامطلوب شدیدی
 حرارتی یا الکتریکی نیست آورد. در این روش می توان با دقت 0.13 mm ماشینکاری
 نمود و برای کاربردهای مخصوص تلرانس هایی در حد 0.005 mm \pm را بدست آورد.
 در این روش ابزار مورد نیاز را می توان با استفاده از EDM ساخت. اندازه دانه های
 مواد سازنده اثرات اساسی در زبری یا دانه های سطح سطح ماشینکاری شده دارد. تغییر دانه های مواد
 سازنده از $20 \mu\text{m}$ به $600 \mu\text{m}$ (که دانه های ریزتری دارد) موجب افزایش زبری سطح و
 از $1 \mu\text{m}$ به $5 \mu\text{m}$ مگر در حدی می شود.
 در فرایند USM - سله بیت ابزار و قطعه کار (GAP) در طول زمان ماشینکاری با سینی کنترل و
 مقدار را تعیین باشد. فرایند USM دارای معاسن زیادی می باشد. اولی آن است که
 * یک از محدودیت های USM، کاهش نرخ باربرداری در زمان افزایش عمق پیشروی
 میباشد. همچنین جریان مواد سازنده موجب خوردگی دیدار سرداخ و استیجاری شده (در صورت
 ساخته بر مبنای سطح قطعه) و دقت آنرا مخصوص برای سردانه های کوچک مورد نیاز است. از محدودیت
 های دیگر USM خوردگی ابزار است که موجب شکل زبری در پشت کردن تلرانس های بسته می
 شود.

در شکل () مغزس قسمت های $\frac{V_2}{V_1}$ و همین القاسونیک نشان داده شده اند که شامل:

- ۱- ادرسیلاتور الکترودینامیکی (نوسان دهنده) با تقویت کننده و وسیله تنظیم ولتاژش
- ۲- مبدل (یا ارتعاش کننده)

۳- قسمت مفصلی Horn یا هدایت موج Waveguide که موج را متمرکز و در اندازه ارتعاش را تقویت می کند تا جهت ماشینکاری مناسب باشد

۴- ابزار ارتعاشی که طبق شکل نگینداری شده ابزار به انتهای قسمت مفصلی Horn متصل می شود

۵- سیستم جریان مواد ساخته شده از طریق کانک ۶- و یکپس مواد ساخته شده را به جوش درج آورد

استفاده از دانه های کوچک در برابر این سطح صاف به سطح لپه می شود که در این فرایند می شود.
با افزایش اندازه دانه های مواد ساخته شده با اندازه مغزس میزان باربرداری افزایش می یابد

اما با بزرگتر شدن دانه ها از اندازه ۲۰۰ میکرومتر فرخ باربرداری کاهش خواهد یافت و زیرا دانه عمر کوتاهتری دارد پس این ابزار در قطعه کار برود (دانه ها در زمانی که فرخ پیشروی افزایش می یابد)

عزیمات مورد استفاده در عملیات USM بین ۱۰ تا ۴۰ کیلوهرتز است. بیشتر ولتاژش در دانه ۲۰ KHz کیلوهرتز می باشد.

دامنه ارتعاش در فرایند USM بین ۰.۱۳ تا ۱۰ mm است.

نیروی وارد بر ابزار معمولاً کمتر از ۴۴۵ N است، اما از نیروهای بزرگی ۴۴۵ N نیز امکان پذیر است.

$$F = mg$$

سطح ایجاد شده توسط USM معمولاً دارای عمق کم و دارای تنش عمیق باقی مانده می باشد.

۱- همین فرخ باربرداری در زمان ارتعاش عمیق می شود

مغزس ۲ USM
- مغزس دیوار سوراخ، شکاری شده در اثر جریان مغزس دانه های ریز و مکرر بر روی دیواره سوراخ
- مغزس ابزار که ایجاد مکرر بر روی سطح ایجاد می کند

حجت رفیع مشلات ماشینکاری، روش التراسونیک USM، روش ماشینکاری از طریق
التراسونیک چرخشی Rotary Ultrasonic Machining یا RUM توسط بری تیک
Percy Legge در سال ۱۹۶۴ معرفی شده. او یکی از سزدهن نفری انجمن علمی

امروزه سرامیک ها در زمینه های دارویی دارو سازانها در صنایع مختلف مضامیر و بیرونی های آنها
دیگرین های مواد سرامیکی شامل استخوان، مقادیر در برابر سایشی، تقویت در برابر
می باشد. تنها شکلی این مواد بلا بودن خورنده ماشینکاری آن می باشد بعدی که خورنده ماشین
کمی قطعه سرامیکی با دقت ۹۰٪ درصد مجموع خورنده قطعه می باشد. امروزه حجت
ماشینکاری قطعات سرامیکی از روش التراسونیک چرخشی RUM استفاده می کنند

در این روش دارای نرخ بار برداری بالاتر و فشار کم ابزار بر قطعه کار موجب
کاهش در آسیب دیدن سطح قطعه می شود که بعد از آن در تولید قطعات سرامیکی می باشد
ابزار سرامیکی امروزه در زمینه های مختلف از قبیل دندان مصنوعی، artificial teeth،
استخوان bones، المفاصل Joints، موتورهای احتراق درون موتور، پوشش داران
مختلفی که در مصارف وایت قرار می گیرند، ابزارهای شیمی جهت دندرات سخت و سخت و غیره
می کنند.

نخبره های عملی نشان میدهد نرخ ماشینکاری از طرف RUM ده برابر
از ماشینکاری از طرف USM می باشد.

در روش ماشینکاری RUM، از ابزار چرخشی که از مواد سایشی خورنده مناسب پوشش
است و در حالی که ابزار به ارتعاش در آمده قطعه کار را بطرف ابزار با فشار ثابت هدایت
می نماید. جهت خنک کردن ابزار، مواد خنک کننده از داخل سوراخ وسط ابزار
پمپاژی شود و مواد برداشته از قطعه را از سطح دور می کند. پمپاژ مواد خنک کننده
گاهش در صورت ابزار و جلوگیری از تجمع ذرات در داخل قطعه می شود.

شکل ابزار در RUM بر اساس مشخصات هندسی طراحی و تعبیر در ابزار ساخته می شود. با ارتقا یافتن ابزار و پیش آن و جریان کنترل شده مواد خنک کننده در بین ابزار و قطعه کار موجب می شود مواد مذاب از بین برود و در نتیجه قطعه له و خرد نشود.

سیستم } تفاوت در ابزار استیل
درجه حرارت مواد راکسی } تفاوت در ابزار خوراک

↓
رنگ داز USM و ابزار چرخش نام RUM

نرخ برداشتن
فشار ابزار بر قطعه کار

↓
مواد مخورده اول

↓
مواد سخت تره از فلز مورفولوژی ابزار
در مغزوت خنک کردن و دور کردن
اتصال ابزار به قطعه کار

تسیم گل ساینده :
تسیم گل ساینده بطور کلی از قسمت های زیر تشکیل می شود

- ۱- گل ساینده
- ۲- وات ماشین کاری
- ۳- لوله های حمل گل ساینده
- ۴- بیب
- ۵- مخزن گل ساینده
- ۶- تسیم مواد حاصل از ماشین کاری

مصوبه مانع حمل کند و ذرات ساینده را که می تواند در آب باران یا در اطل سنده می نماید.
ذرات ساینده بر اثر نفوذ عمده از جنس المانس برن کار ناید، سیلیکون کار ناید و کونیتوم اکسید
و برن نیزات می باشد. از بین ذرات فوق المانس بهترین توانایی بار بردار را دارد.
در جدول () انواع ذرات ساینده، مشخص و توانایی براده بردار کننده نشان داده شده است.

در بیشتر عملیات ماشینکاری از برن کار ناید استفاده می شود زیرا ذرات برن کار ناید به آسانی شکسته می شوند
و هر کدام می توانند تیزی لازم را حفظ نمایند. چرا ^{تعیین} برن کار ناید کم می باشد و در تیزی توانه در مانع حمل کننده
بومی نماید و خارج شود. جهت ماشینکاری قطعاتی از جنس تیتان کار ناید، فولاد آبدیده و شیرین
از برن کار ناید استفاده نمی شود. در جدول () قطعات قابل ماشین کاری بر رویه ذرات مختلف براده بردار کننده مشخص شده است.

بملاحظه که در دو جدول قبلی دیده می شود سیلیکات کار باید به سختی برون کار باید نباشد
 زیرا در آنی شکسته می شود و کیفیت فالتیج را خود را برای وقت طولانی حفظ می کند. از اکسید آلومینوم
 که بین رازان می باشد در فالتیجاری نیمه ها و کمپوزیت ها استفاده می کنند .
 سرعت برش نیز برای قطعات ترد یا شکسته با استفاده از بزرگ کار باید وسیله ای در جدول (آنگاه ۱ -

حسب سرعت برش نیز و با برنهایزات و پرده برنهایز در جدول (نشان داده شده است.

در جدول () سرعت برشی نسبت به قطر انواع سرامیکها آمده است.

همچنین اندازه دانه ها مانوس به کاربرد آنها در جدول () داده شده است.

حجت بالا بودن سرعت براده برداری باید از زمانه کار نیز کمتر استفاده شود. حجت داشتن سرعت براده برداری

لازم است اندازه دانه و از وی که صلیبتر از زمانه ارتفاعات سرامیکها باشد (صفت Peak to Peak) را لحاظ

در اندازه دانه ها باید کمتر از ااره حداقل انفرخانه بی انبار باشد.

اگر اندازه دانه ها خیلی کوچکتر از دامنه ارتفاعات باشد براده برادر انجام نمی شود و عمل بند بوسیله حرکت
در عاقلی با ابزار از عمل ماشینکاری دور می شود.

در شکل ها زیر تاثیر اندازه دانه ها را بر زبری سطح ماشینکاری شده نشان میدهد.

در شکل () تاثیر اندازه دانه ها بر زبری سطح شیشه x، سلیکون نیمه هارن = ۵، سرامیک = ۵ و فولاد سخت = ۵ نشان میدهد.
و موارد بنده بر آن کارهای

حقیقت در شکل () تاثیر اندازه دانه ها بر زبری سطح قطعه ماشینکاری شده از جنس شیشه و نئوسن کاراید نشان میدهد.

در شکل () نشان میدهد هر چه در اندازه دانه ها کوچکتر باشد زبری سطح کمتر در قطعه کار ایجاد می شود.

روشن است که اندازه دانه ها بنده بر میزان و نوع ری جانبی over cut قطعه کار ماشینکاری شده تاثیر دارد.



رداف که نیاز به صافی سطح خوب ریادفت ایجاد می نماید باشد لازم است از بیش از یک ابزار و اندازه رانه

استفاده شود. طول ابزار خشن کاری حاصل از بین ۳ تا ۴ برابر اندازه متوسط رانه کار شده باشد.

* سوراخ عمیق لازم است در مرحله ایجاد گردد. در مرحله اول از ابزار کمتر از اندازه قطر سوراخ با رانه غیر سنبه

بزرگ و رانه ارتعاش زیاد؛ در مرحله دوم با ابزار کوچکتر از اندازه قطر سوراخ با سنبه از رانه غیر سنبه کوچک

و رانه ارتعاشات متوسط؛ و در مرحله سوم با اندازه ابزار زبانی (اندکی کوچکتر از اندازه قطر سوراخ) با سنبه از

رانه غیر سنبه ضعیف کوچک و رانه کوچک کوچک. در این مدت آلودگی از ذرات سنبه با مش

۲۸۰ در حدود ± 0.0254 میلی متر و با مش ۸۰۰ معادل ± 0.125 میلی متر می باشد.

جهت حمل مواد سنبه به ناحیه ماشینکاری باید مایع حمل کننده نیز می باشد تا ذرات با مایع مخلوط شده و

بیل ساینده را بوجود آوردن این بیل با مایع به زیادت نیز توجه شود.

۱- بیل ساینده باید درجه قابل قبولی دارد سنبه را به محل ماشینکاری بیاورد. درجه ذرات بیل سنبه همگی در

۲- بیل ساینده باید قابلیت سیلان و نفوذ خوب باشد.

۳- با افزایش درجه جرمی ذرات ساینده سرعت براده برداری مانند شکل در این دوران افزایش را دارد.

۴- درجه بیل سنبه نیز باید مایع با ویسکوزیته کم استفاده شود که در این خصوصیت سنبه در خوب و ضعیف جرمی در کوشش

۵- بیل ساینده باید از آلومینیوم به روغن و گریس محفوظ باشد. آب درج

۶- درجه جرمی که برابر بیل ساینده توصیه می شود بین ۲ تا ۵ درجه است. این درجه طریقت باید

در شکل برش بیل ذرات سنبه داشته شود.

۷- ذرات سنبه را پس از تمهیداتی به دلایل زیر دوری از سنبه

- اولاً ذرات اندکی شوند و تیز لازم را از دست بدهند.

- ثانیا براده در حاصل ماشینکاری در بیل بصورت قندور در آمده و فراموشی بیل سنبه از دست می رود.

۸- اگر ذرات نامش از شدتکاری از مواد فرود می آید (آهن، نیکل، کربن) باشد می توان بر وسیله آهن را

آنها را از بیل سنبه جدا نمود.

۹- علت آنکه سایش مکانیکی Erosion و سایش شیمیایی Corrosion به نام سنبه لازم است از محیط بیرون سنبه

محیطین کلیه اجزا استیم بیل سنبه نظیر لوله یا انتقال بیل، و آل ماشینکاری، محل حمل و دستگیر کردن براده را براده برداری

ابع حمل کننده ذرات سائیده با ابزار مخصوص زیر باشد :

۱- خاصیت خمد کنندگی خوب (تعداد کم شدن مصل ماشینکاری باعث نرم شدن ابزار و قطعه کار)
در این مورد ارتفاع ابزار موجب فرود رفتن ذرات سائیده داخل سطح قطعه شده و یک لایه سخت
بر روی قطعه کار بوجود آورده که عملاً براده برداری را متوقف می کند .

۲- قابلیت ترک نشدگی و نفوذ خوب به مراعع تنگ

۳- داشتن ضریب هدایت حرارتی بالا

۴- داشتن هدایت الکتریکی خوب . علت اینها در اثر انقباضات ابزار الکترود است که این نیز در م آید که

با ابزار مصل ماشینکاری تخته گردد و غیر انقباض ذرات سائیده تحت عمیق الکترونیک بهم می چسبند

ابع حمل کننده ذرات سائیده :

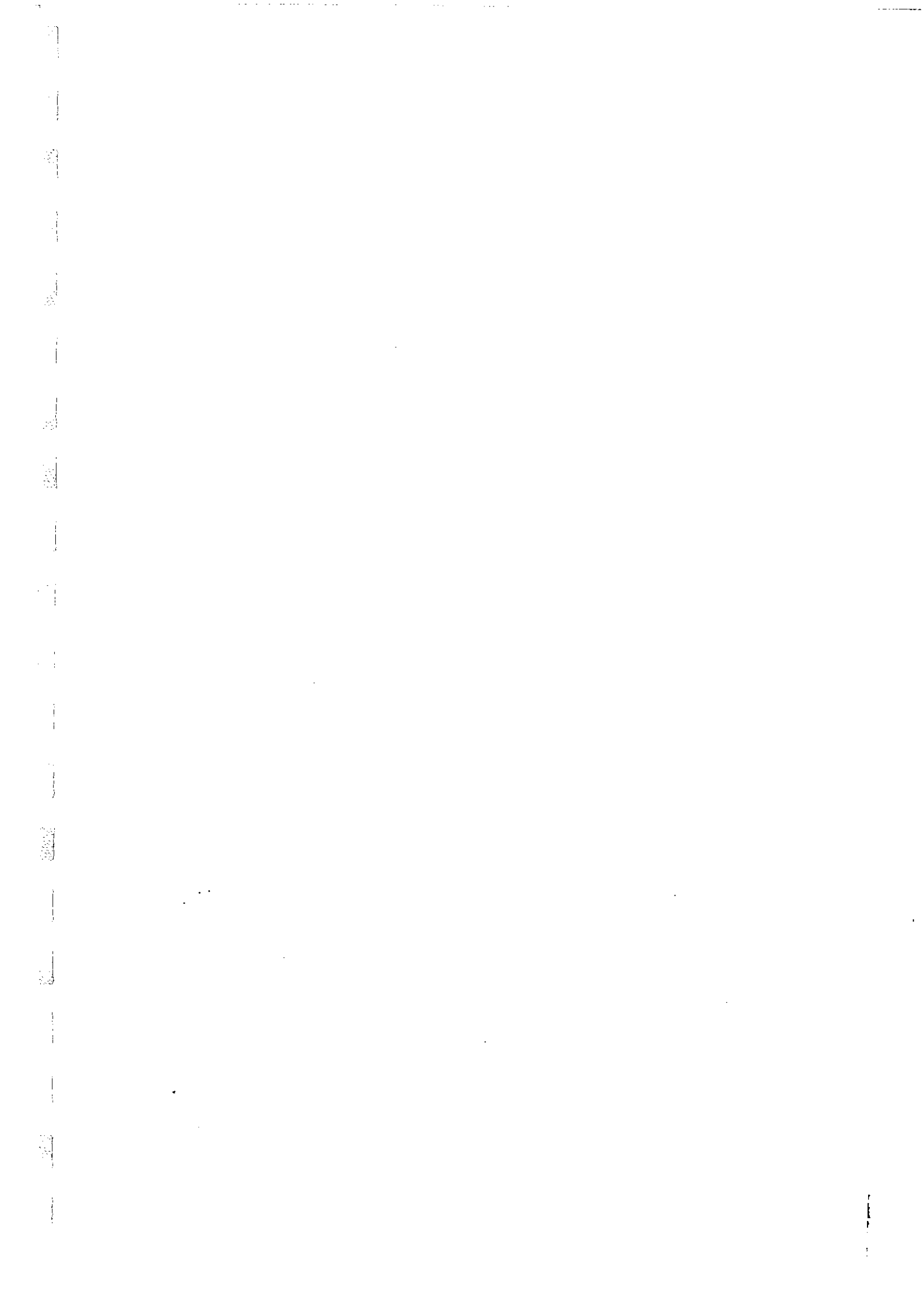
- ۱- خاصیت خمد کنندگی خوب
- ۲- قابلیت ترک نشدگی و نفوذ خوب به مراعع تنگ
- ۳- داشتن ضریب هدایت حرارتی بالا
- ۴- داشتن هدایت الکتریکی خوب

بازارچه، تولید و توزیع محصولات اورگانیک

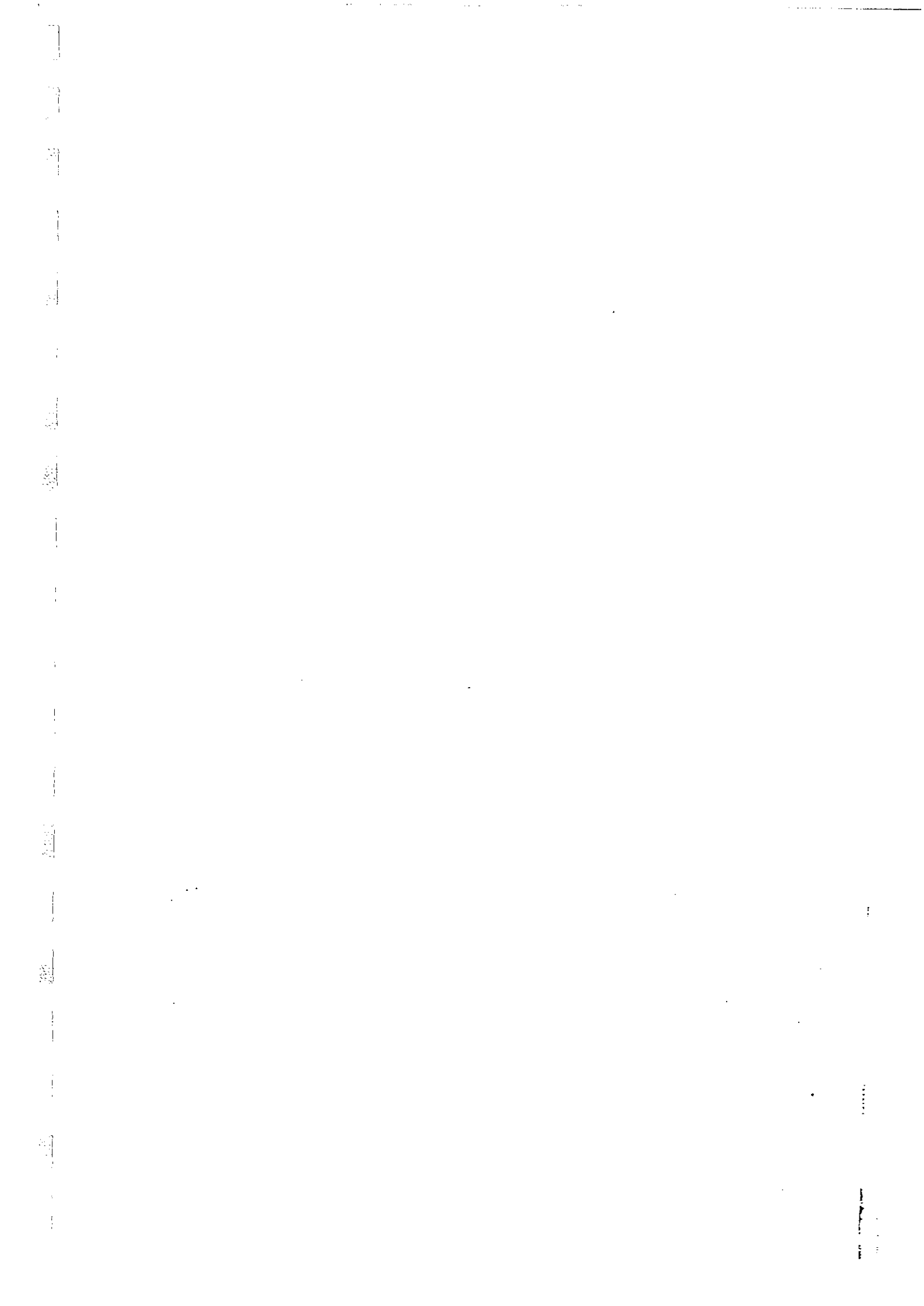
نوع محصول	قیمت تولیدی	قیمت کار	بازار
سبزی (میلن متر)	۰/۰۱۲۵	۰/۰۲۵	
زبری (میکرو متر)	۰/۰۶۲۵	۰/۰۷۵۰	
شماره اندازه دان	۴۰۰	۲۴۰	
اندازه معدل دان (میکرون)	۲۳	۶۳	
رطوبت مراد سفید	۴۵	۵۵	
گشادی جانبی (میلن متر)	۰/۰۵	۰/۰۱۲۵	
ماشین آشپز	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۲۵	

تطعمه کار:

انواع قطعات شلنده و تود که هادی الکتروسیستم نمی باشند و یا قطعات نسبی که می توان با استفاده از روش اولتراسونیک ماشینکاری شوند در جدول () مشخص شده اند. قطعات نرم به پیوسته همین قابل ماشینکاری است زیرا ذرات ساینده در حین ماشینکاری در آن فروخته و عمل براده برداری متوقف می شود.

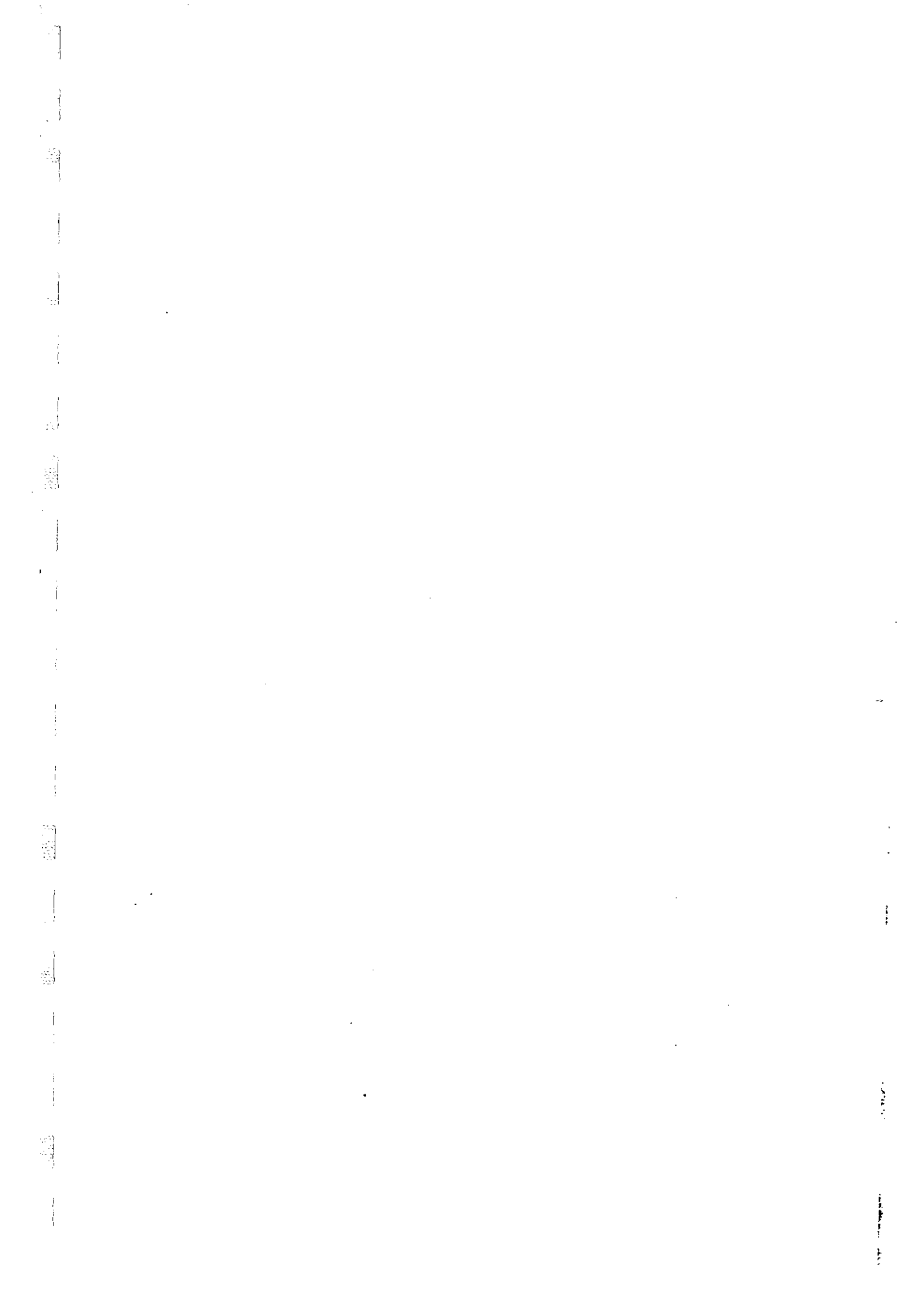


انبار نیالین هیچگونه خرابی و یا ترک در آن نبوده زیرا انبار در اثر خستگی خیلی سریع شکسته می شود.
 همه انبار بلندتر از سقف است و تغییر فرم الاستیکی جانبی که انبار هنگام کاهش و افزایش طول می رود
 احتمال دارد سوراخ ماسینکارت شده گشاد شود. این پدیده در اثر ضربه خارجی انبار به محل سینه
 و دیواره اطراف سوراخ بوجود می آید. جهت کم کردن این احتمال بهتر است از انبار کوتاه استفاده شود.



اثر هئیس (بزرگ رادوی نرض با براری در جدول د) نشان داده شده است.

همچنین میزان مادی ابرار با هئیس های مختلف را شکل مختلف در جدول ا) نشان میدهد.
در این جدول فرمت برای آن که از زرات ماسیذ B4C (ماروم کانیسیکیش ۱۰۰) استفاده است.



$\frac{10}{\text{مادهای پارامترهای عملیات در ماشینکاری ارتزادزیر}}$

قدرت	۲۰۰ تا ۴۰۰۰ وات
فرکانس	۱۰ تا ۴۰ کدوهرتز (عملاً ۲۰ کدوهرتز)
سرما ساینده:	
نوع	از برن کرباید غالب استفاده می شود.
اندازه	۱۰۰ تا ۲۰۰
غلظت	۲ تا ۶٪ حصبی در آب
درجه حرارت حرارت ساینده	هبت ابزارها نیز بالاتر از غلظت پاشن تراشیده می شود ۲ تا ۵ درجه سانتی گراد
دامنه ارتعاش	از ۰/۰۱۴ تا ۰/۰۶۳ میلی متر
اندازه رانه	تقریباً برابر دامنه ارتعاش
سبب در ارتعاشی دار ابزار	بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۵ کدوهرتز
حسین ابزار	فولاد نرم، فولاد ضد زنگ، فولاد سولید
گت در شیب و سبب	تقریباً در برابر اندازه رانه
سبب خوردگی	۰/۰۷ تا ۰/۰۱
نوع پیشروی	بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۲۵ میلی متر در تقدم
عمق ماشینکاری	تا ۶۴ میلی متر
سطح ماشینکاری	تا ۸۹ میلی متر
دقت ماشینکاری	± ۰/۰۲۵ میلی متر انانیت ± ۰/۰۰۵ میلی متر انانیت
کوئیک بود Taper	تا ۰/۰۰۵ میلی متر در میلی متر
زبری سطح R_a	بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۷۶ میکرو متر

Ultrasonic Machining—USM 10.7 and Rotary Ultrasonic Machining—RUM

PROCESS SUMMARY

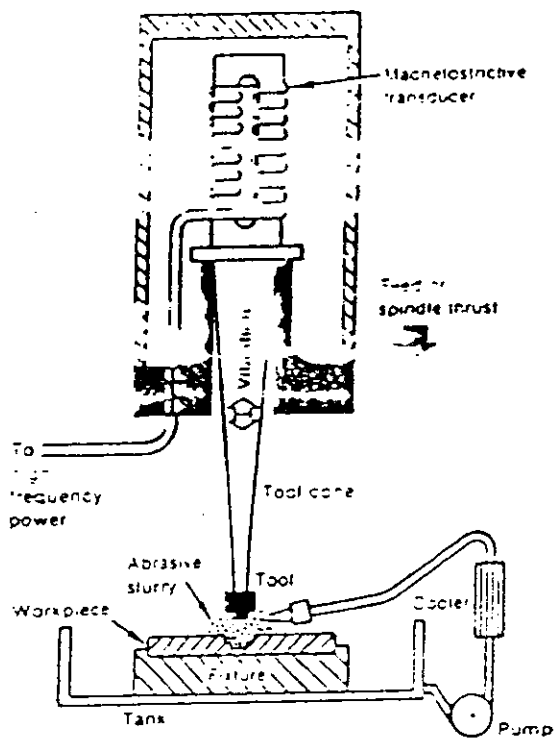


Figure 10.7-1 USM schematic.

Principles

Ultrasonic machining (USM) is the removal of material by the abrading action of a grit-loaded liquid slurry circulating between the workpiece and a tool vibrating perpendicular to the workface at a frequency above the audible range (see figure 10.7-1). A high-frequency power source activates a stack of magnetostrictive material, which produces a low amplitude vibration of the toolholder. This motion is transmitted under light pressure to the slurry which abrades the workpiece into a conjugate image of the tool form. A constant flow of slurry (usually cooled) is necessary to carry away the chips from the workface. The process is sometimes called ultrasonic abrasive machining (UAM) or impact machining.

A prime variation of USM is the addition of ultrasonic vibration to a rotating tool—usually a diamond-plated drill. Rotary ultrasonic machining (RUM) substantially increases the drilling efficiency. A piezoelectric device built into the rotating head provides the needed vibration. Milling, drilling, threading, and grinding-type operations are performed with RUM (table 10.7-15 and figure 10.7-15).

Practical Applications

While USM can cut any material, conductive or non-conductive, metallic, ceramic or composite, it is most effective on materials harder than 40 Rc. Holes, slots and irregular shapes can be produced in delicate ceramics. Tool wear and taper in the cut can be limiting factors. A prac-

tical depth-to-width ratio is 2.5:1. Holes as small as 0.003-inch to 0.75-inch diameter have been made. Current practical limits are 3/8-inch (9.5 mm) diameter tools operating in 2.5-inch (64 mm) deep cavities. Trepanning is preferred to solid drilling. Threading of ceramics can be accomplished with a rotary tool or part. Slitting, coning, dieing, lapping, engraving, deburring, broaching, boring and trepanning operations are also practical. An ultrasonic assist is sometimes used in the manufacture of conventional cutting tools and tooling operations.

Operating Parameters

TABLE 10.7-1 Typical Values for USM Operating Parameters

Power	200 to 4000 watts
Frequency	10 to 40 kHz (most frequently 20 kHz)
Abrasive type	Boron carbide (most frequently) (see tables 10.7-5 and 10.7-6)
size	100 to 2000 (see table 10.7-10)
concentration	20% to 60% by volume in water (use lower percentage for the larger tools). Oil is used sometimes for finishing.
flow	Ample, sharp and cool (replenish as becomes worn); 65° to 40°F (2° to 5°C) desirable
Vibration amplitude	0.0005 to 0.0025 inch (0.013 to 0.063 mm) (mean diameter of grit should be approximately equal to the vibration amplitude)
Tool tip force	1 to 100 lb (0.45 to 45 kg) (generally less than 10 lb (4.5 kg))
Tool material	Mild steel, 303 stainless steel, Monel, 52100 steel, molybdenum
Overcut and cutting gap	Approximately 2 times grit size
Wear ratio	0.7:1 to 1000:1 (see table 10.7-16)
Feed rate	0.002 to 0.10 in./min (0.05 to 2.5 mm/min) (sensitive to debris accumulation in gap, to sharpness of grit and depth of cut)
Depth of cut	Up to 2.5 inches (64 mm)
Area of cut	Up to 3.5-inch (89 mm) diameter
Accuracy	± 0.001 inch (± 0.025 mm) typical; ± 0.0002 inch (± 0.005 mm) possible
Taper	Up to 0.005 inch/inch (0.005 mm/mm)
Surface roughness R_a	20 to 30 μ m (0.51 to 0.76 μ m)

SELECTED DATA

There are several valid techniques for selecting operating parameters for USM. The steps in table 10.7-2 are recommended as one logical sequence. Supporting data come from the other figures and tables in accordance with the terms as explained in figure 10.7-2.

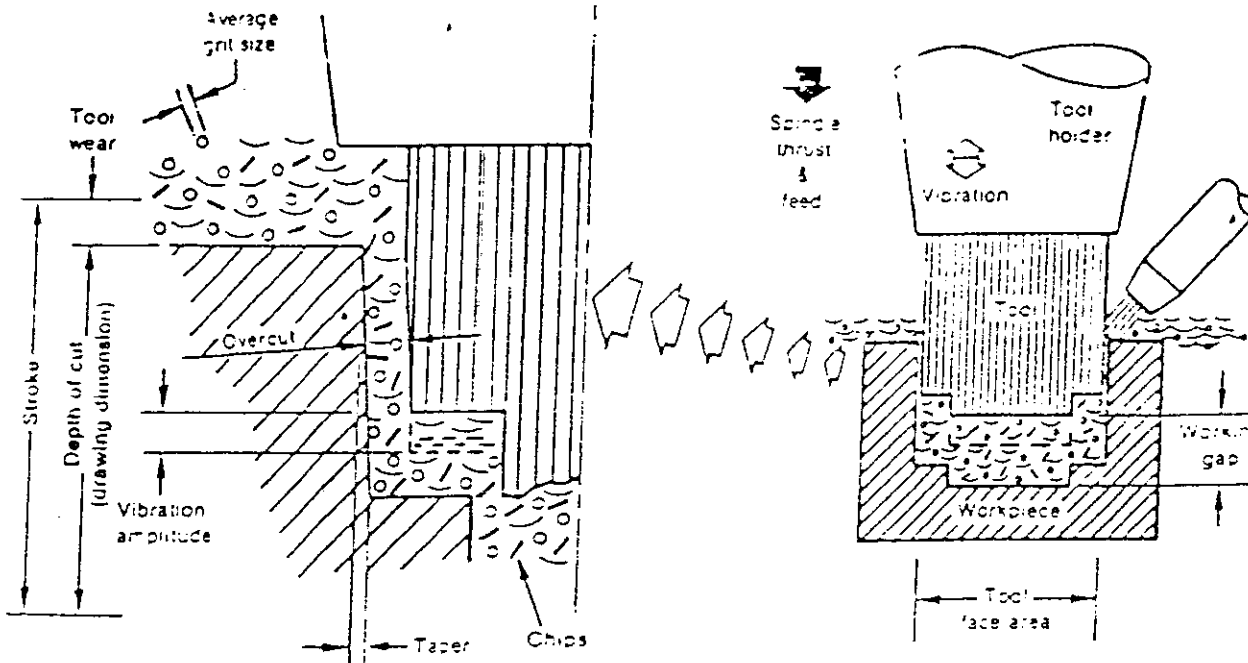


Figure 10.7-2 USM parameter terminology

Material
Respecta
good fine
vibration
load are
the type
use app
fional to
ind the se
avities
ing rates
essence
to cutting
nd accou
for the am
he densi
oval rate
facturing
sing of exi
pimented to
accuracy is
there = 0
typical ope
te of remo
pendent up
strated in
Surface Tec
face roug
ller size gr
quencies (sk
aves roug
76 um). S
bottom fac
no chn ga
ed. The
pressive re
s promote
s of the
18.3-7). S
vitation bu
ive grit.

10.7 Ultrasonic Machining—USM and Rotary Ultrasonic Machining—RUM

Material Removal Rates and Tolerances

Respectable machining rates can be obtained with accuracy and good finishes can be achieved for many hard work materials. Vibration amplitude and frequency, area of cut, and static load are principal considerations.

Also types of work material, brittleness, and depth of cut are also important. The rate of penetration is inversely proportional to the area of the cut and proportional to the grit size and the square of the amplitude of vibration. Spanning of cavities in slurry is preferable to the use of solid tools. Cutting rates increase with the hardness of the abrasive grit. It is essential to maintain a good flow of fresh, sharp grit at the cutting interface and to flush this away free from chips and accumulations of debris. Excess static load can compact the grit and slow the penetration rate.

The delicate touch of USM, while slower in volume removal rate, can be especially valuable for reducing manufacturing losses of fragile workpieces. Breakout and chipping of exits of cuts can be a problem. Thin parts often are cemented to a sacrifice plate.

Accuracy is typically ± 0.001 inch (± 0.025 mm) and can achieve ± 0.0002 inch (± 0.005 mm) with special care. Typical operating conditions are listed in table 10.7-3. The rate of removal and other specific operating conditions are dependent upon the work material characteristics, as demonstrated in table 10.7-20.

Surface Technology

Surface roughness decreases and finish improves with smaller size grit and smaller vibration amplitudes or higher frequencies (see figures 10.7-3 to 10.7-5). USM typically achieves roughness values of 20 to 30 microinches R_a (0.51 to 0.76 μm). Side walls of deep cavities can be rougher than the bottom face. There is no heat-affected zone, and there are no chemical or electrical alterations in the surfaces produced. The multitude of small impacts imparts a shallow, compressive residual stress to the surface. This residual stress promotes an increase in the high cycle fatigue strength of the work material after USM (see section 18.3, table 18.3-7). Side-wall channels can occur from the action of cavitation but will only be approximately the size of the abrasive grit.

Equipment and Tools

USM equipment is available in a wide range of sizes and in a power range from 200 to 2400 watts and, with special engineering order, up to 4000 watts. The most common frequency is 20 kHz which can be adjusted about plus or minus 10 percent to attain better tuning for specific cutting. Special attachments or equipment adaptations provide ultrasonic assist for conventional drilling, grinding, forming and drawing. Tool material and grit are matched to the application, and for the best productivity, great care should be exercised in selecting and maintaining the amplitude of vibration. The tool should be designed to resonate at the desired frequency for best results, and it must be strong enough to resist fatigue failure. Tool materials are selected on the basis of ductility and toughness rather than hardness. The overcut between the tool form and workpiece shape is approximately equal to twice the size of the abrasive grit. Tool storage needs attention in order to reduce nicks and scratches that can cause early fatigue failure. Most forces are low, so workpiece clamping can be minimal. Fixturing should be positive so as to eliminate vibration of the workpiece. The slurry recirculation system should have cooling capability.

RUM equipment is available in a range of sizes and accessories as well as in portable units. Practical limit to tool weight is 1.4 or 140 gm. The rotary heads provide capability for threading.

Machining Characteristics

There are no unusual safety considerations in USM, and the simplicity of the operation reduces the training or skill requirements. A good flow of slurry is desirable in order to maintain the cutting rate. Replenishment of the grit is needed at regular intervals. With water-based slurries, a rust preventive treatment is desirable following the wash-out of the slurry. The proper choice of tool material and abrasive grit will result in satisfactory wear ratios between the workpiece and the tool. Taper in deep cuts can be relieved by the use of roughing and finishing tools. Because tool wear occurs mostly on the bottom face of the tool, profile precision is maintained.

AY

SELECTED DATA

There are several valid techniques for selecting operating parameters for USM. The steps in table 10.7-2 are recommended as one logical sequence. Supporting data come from the other figures and tables in accordance with the methods explained in this section.

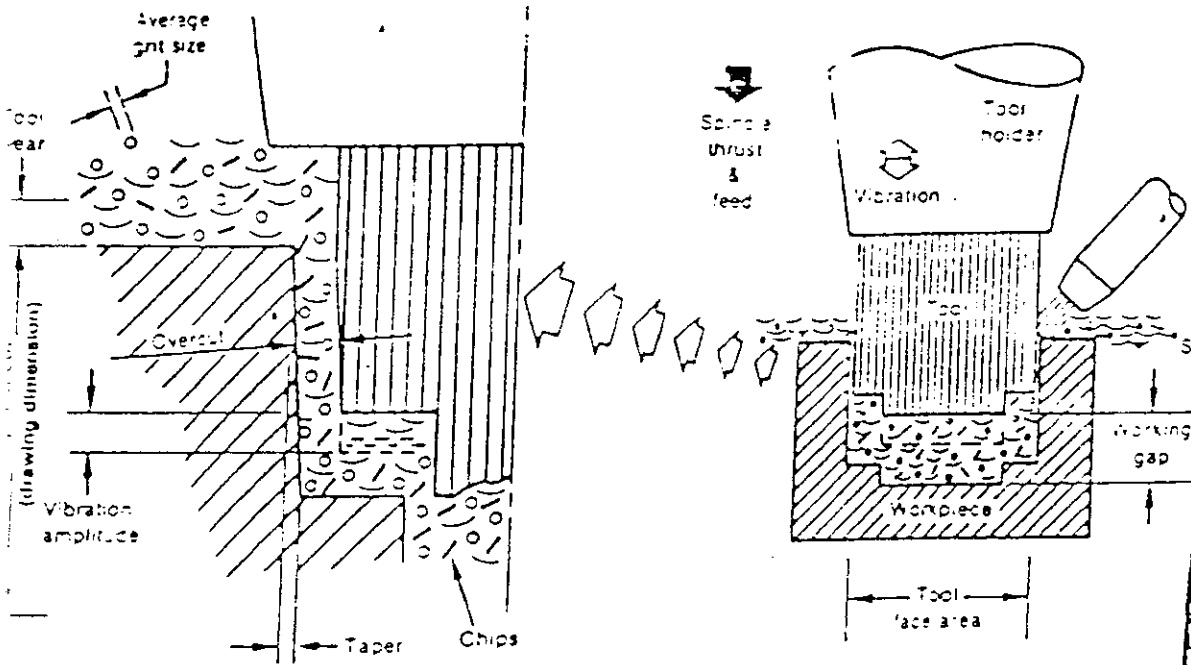


Figure 10.7-2 USM parameter terminology

Material
Respects
flow time
vibration
load are
and time
1.50 comp-
sional to ti
and the se
cavities
ing rates
s essential
be cutting
and accur
bet the
the delicate
oval rate
ensuring lo
ing of exit
s mented to
accuracy is
above 10
typical ope
le of remo
pendent up
strated in
Tech
rough
size gr
encies (e
seves roug
To μ m). Si
bottom fac
no chem
ed. The in
pressive re
is promote
gth of the
18.3-7). S
vitation bu
ive grit.

AY

10.7 Ultrasonic Machining—USM and Rotary Ultrasonic Machining—RUM

TABLE 10.7-2 Steps to Select USM Operating Parameters

ITEM	DATA
1. Workpiece material type, hardness, metallurgical state	From engineering drawings or specifications. Preferably hardness greater than 40 Rc. See table 10.7-4.
2. Contour, finish, and tolerance	From engineering drawing: Maximum contours depth-to-width = 2.5:1 Maximum dimension 4 inch (100 mm) Minimum width cut 0.003 inch (0.076 mm) Limited by tool type and shape. Consult machine vendors.
3. Area of cut	From engineering drawing: Calculate from part configuration. Minimize area by use of tapering where possible.
4. Select type abrasive	Tables 10.7-5 to 10.7-10
5. Select abrasive grit size	Table 10.7-10; figures 10.7-3 to 10.7-5. Base on surface roughness and tolerance needs.
6. Select % concentration of slurry	Figure 10.7-6 Lower %'s for larger tool areas. Water base generally; oil or alcohol sometimes used when water will dissolve workpiece.
7. Select tool material	Tables 10.7-11 and 10.7-12
8. Estimate penetration rate, vibration amplitude, static load	Tables 10.7-13 to 10.7-15; figures 10.7-7 to 10.7-11
9. Select tool design	Allow overcut of 2 times grit size. Figure 10.7-12
10. Select equipment size	Table 10.7-19
11. Vary vibration frequency and amplitude. Refine other operating settings.	Trial cut and tuning of system. Establish wear rate.
12. Select depth of cut	Depth of cut or stroke equals drawing requirements plus tool wear allowance. Measure or estimate wear ratios. Tables 10.7-16, 10.7-17 and 10.7-18; figures 10.7-13 and 10.7-14

TABLE 10.7-3 Typical USM Operating Conditions

PARAMETER	ROUGHING	SEMI-FINISHING	FINISHING
Tolerance, inch	± 0.001	± 0.0005	± 0.00025
Roughness, microinch R_a	30	25	20
Grit size number	230	400	600
Grit average size, inch	0.00248	0.00090	0.00044
Grit average size, micron	63	23	11.2
Abrasive concentration, %	55	45	35
Overcut, inch	0.005	0.002	0.0005
Machine stroke	0.0025	0.0015	0.0005



TABLE 10.7-4 Materials That Have Been Successfully Machined Ultrasonically

Aquile	Diamonds	Limestone	Silicon carbide
Alumina	Gold-colored steel	Lithium fluoride	Silicon nitride
Aluminum oxide	Epoxy	Mica	Stainless steel—hardened
Barium titanate	Ferrite	Molybdenum	Stellite
Beryllium oxide	Formica	Molybdenum disulfide	Steel-hardened tools
Boron carbide (B ₄ C)	Graphite	Monel metal	Tungsten
Boron compounds	Germanium	Plaster of Paris	Tungsten
Brass	Glass	Pyrolytic graphite	Tungsten carbide
Calcium carbide	Glass-bonded mica	Quartz	Thorium oxide
Carbon	Graphite	Titanium	Uranium oxide
Ceramics	Hardened 1095 steel	Sapphire	Uranium carbide
	High pressure 07-1035	Silicon	Zirconium oxide

10.7

TABLE 10.7 Parameters

ITE
type, hard
allurgical

TABLE 10.7-5 Abrasives Used in USM

ABRASIVE	KNOOP HARDNESS	RELATIVE CUTTING POWER
Diamond	5500-7000	1.0
Cubic boron nitride (CBN)	4700	0.95
Boron carbide (B ₄ C)	2800	0.50-0.60
Silicon carbide (SiC)	2430-2500	0.25-0.45
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	2000-2100	0.14-0.16

TABLE 10.7-7 USM Cutting Speed Index for Brittle Work Materials

(Soda glass, using 100 mesh B₄C abrasive = 100)

WORK MATERIAL	ABRASIVE		
	Boron Carbide		
	100 mesh	200 mesh	400 mesh
Soda glass	100	90	77
Hysil	73	66	54
B9 borosilicate glass	26		
Ferroxube IIC	37		
Ferroxure (demagnetized)	(32)		
Quartz crystal	(57)		
Fused alumina	19		
Synthetic sapphire	19		
Synthetic ruby	13		
Flint stone	(72)		
Barium titanate ceramic	110		
Ceramic SC7	(36)		
Garnet	(58)		
Feldspar	(40)		
Spinel	(48)		
Slate	67		
Mycalox	(240)		

3. Area of cut

Select tool size

Select % of burr

Select tool - Estimate penetrability of vibr. static etc

Select tool c.

Select equip. size

Verify vibrat. frequency and amplitude. Refine operating set. Select depth of

TABLE 10.7-6 Selection of Abrasive

ABRASIVE	WORK MATERIAL
Boron carbide	Tungsten carbide, metals, high density ceramics, minerals, semi and precious stones.
Silicon carbide	Low density ceramics, glass silicon, germanium, mineral stones.
Aluminum oxide	Glass, low density, sintered or hard powder compounds.

SOURCE: G. E. Littlebird, Machining by ultrasonics, 1977

SOURCE: E. A. Neppiras and R. D. Fosken, Ultrasonic machining, Technical Review 19 (1955-57), p. 372

NOTES: Tool used was mild steel, 1/2-inch (12.7 mm) diameter, 1.5-inch (38 mm) thick, see figure 10.7-3

Numbers in parentheses are estimates, interpolated from tests under somewhat different conditions

Handwritten initials/signature

10.7 Ultrasonic Machining—USM and Rotary Ultrasonic Machining—RUM

TABLE 10.7-8 USM Cutting Speed Index for Metals
(Soda glass, using 100 mesh B.C. abrasive = 100.)

WORK MATERIAL	ABRASIVE						
	Boron Carbide			Silicon Carbide	Alumina	Sand	Diamond Powder
	100 mesh	220 mesh	400 mesh	100 mesh	220 mesh	(grit size 0.012 in)	(grit size 8.001 in)
Soda glass	100	90	77	35	—	—	—
Brass (common yellow)	6.6	5.6	—	—	—	—	—
Die steels							
K.E. 572 (approx. AISI O1), R. 66	1.4	1.3	—	—	—	—	—
C.S.K., R. 52	3.9	3.6	—	—	—	—	—
K.E. 672 (approx. AISI O1), R. 57	2.2	2.1	—	1.48	0.1	0.1	—
K.E. 672 (approx. AISI O1), R. 58	—	1.7	—	—	—	—	—
Stainless steels							
18% Cr, 8% Ni, 0.1% C	2.1	1.9	—	—	—	—	—
3.5% Cr, 3.4% W, 0.35% V, 0.2% C	1.2	1.1	—	—	—	—	—
Carbon-chrome bearing steel (heat-treated)	1.4	—	—	—	—	—	—
Sintered tungsten carbide, R. 76	4.1	3.5	—	2.55	0.2	0.2	4.3
Tungsten	4.8	4.3	—	—	—	—	—
Stellite	4.0	3.7	—	—	—	—	—
Germanium single crystal	(31)	—	—	(28)	—	—	—
Titanium	(4.0)	—	—	—	—	—	—
Beryllium	(7)	—	—	—	—	—	—

SOURCE: E. A. Neppiras and R. D. Foskett, p. 371.

NOTE: Same tool used as in table 10.7-7. Numbers in parentheses are estimates interpolated from measurements under somewhat different conditions.

TABLE 10.7-9 USM Cutting Speed Index for Ceramic Work Materials
(Soda glass, using 100 mesh B.C. abrasive = 100.)

WORK MATERIAL	ABRASIVE					
	Boron Carbide		Silicon Carbide			Alumina
	100 mesh	400 mesh	100 mesh	400 mesh	600 mesh	220 mesh
Chemical porcelain	70	14	53.5	11	2	26
Temperadex*	60	10	45	7.5	—	20
Faradex*	55	7	41	5	—	2
Vulcanex*	190	51	168	44	2	62
Z.Z. porcelain	90	32.5	75	26	2	10
H.T. porcelain	45	24	41	22	—	8
Frequentite*	47.5	27.5	45	26	—	20
Soda glass	100	45	80	37	5	70

SOURCE: E. A. Neppiras and R. D. Foskett, p. 371.

NOTE: Tool used was mild steel, circular, 1/4-inch (6.5 mm) diameter.

*Trade names of proprietary materials.

AK

Ultrasonic Machining—USM 10
and Rotary Ultrasonic Machining—RUM

TABLE 10.7-10 Grit Sizes Used in USM

GRIT SIZE	PARTICLE SIZE	
	μ	μm
Roughing		
100	0.0056	142
150	0.0048	122
200	0.0041	95
300	0.0026	66
230	0.00248	63
370	0.0015	44
325	0.00125	33
400	0.00090	23
Finishing		
500	0.00075	19
600	0.00057	14
800	0.00042	11
900	0.00036	10
1000	0.00032	8
1200	0.00022	6

NOTE: In estimating tool size with respect to tolerances required, the abrasive particle diameter can be considered as an overcut factor. For example, if a 1/4 inch (6.3 mm) diameter hole was being drilled with USM (using 180 grit), the diameter of the hole in the workpiece would be equal to 0.250 (6.350 mm) + 2 times 0.0024 (35 $\mu\text{m} \times 10^3$) or approximately 0.257 inch (6.53 mm).

0.7 Ultrasonic Machining

TABLE 10.7-8 USM Work Material Classifications

- WORK MATERIAL CLASSIFICATIONS
- Soda glass
 - Quartz glass (common type)
 - Aluminum steels
 - K.E. 570 (approx. C.S.K. R. 50)
 - K.E. 672 (approx. C.S.K. R. 50)
 - K.E. 672 (approx. C.S.K. R. 50)
 - Inconel steels
 - 18% Cr, 8% Ni stainless steels
 - 316 stainless steel
 - Carbon-chrome steels
 - Hardened tungsten carbide
 - Tungsten carbide
 - Aluminum nitride
 - Vanadium nitride
 - Titanium
 - Yttrium

SOURCE: E. A. Neppiras and R. D. Foskett.

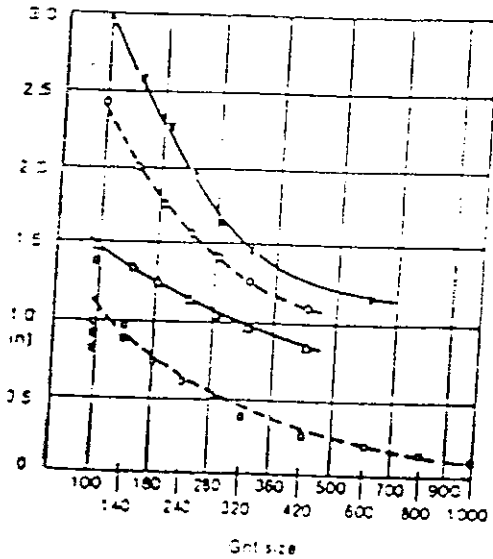


Figure 10.7-3 Surface roughness versus grit size for various materials. Work material key: x = silicon-semiconductor; Δ = mineral; □ = hard alloy steel. (D. C. Kennedy and R. D. Foskett, Ultrasonic Machining—a review, Production Engineering 34 (1975), p. 465)

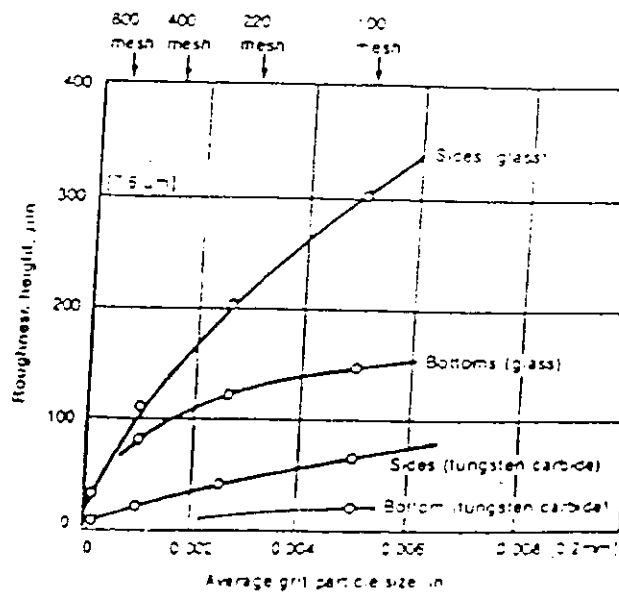


Figure 10.7-4 Roughness height versus grit particle size for holes in glass and tungsten carbide. (E. A. Neppiras and R. D. Foskett, p. 378)

TABLE 10.7-9 Soda glass USM

WORK MATERIAL

- Chemical process
- Temperalex®
- Faradex®
- Vulcanex®
- Z.Z. porcelain
- H.T. porcelain
- Frequentite®
- Soda glass

SOURCE: E. A. Neppiras and R. D. Foskett. NOTE: Tool used with face names of product.

197

10.7 Ultrasonic Machining—USM and Rotary Ultrasonic Machining—RUM

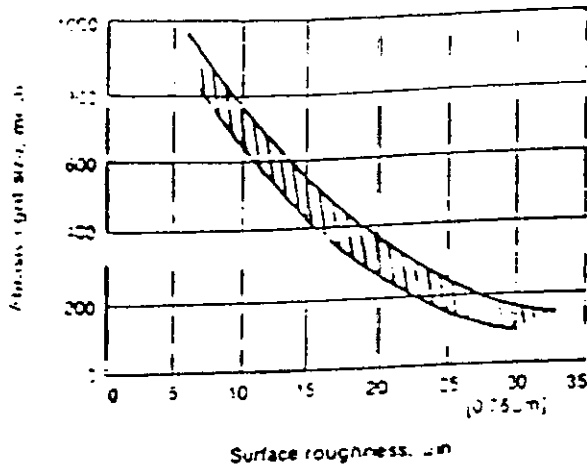


Figure 10.7-5 Grit size versus surface roughness. Smaller particles produce smoother finishes; larger particles cut faster. (Data modified from A. L. Roses, Techniques of ultrasonic machining, Tool and Manufacturing Engineer 46 (1969), 71-75)

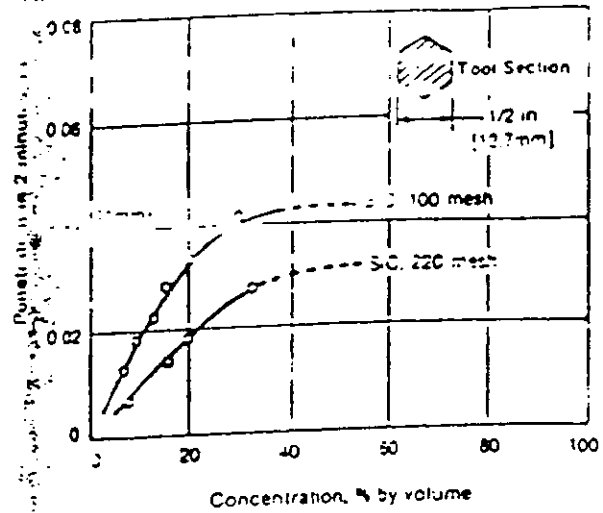


Figure 10.7-6 Penetration in glass as a function of slurry concentration. (E. A. Neppiras and R. D. Foskett, p. 373)

TABLE 10.7-11 Effect of Tool Material on Cutting Rate (Soda glass work material; B.C. abrasive, optimum stable load at 20 kHz)

TOOL MATERIAL	TOOL SHAPE	CUTTING RATE, ° in/min			
		Amplitude = 0.002 in		Amplitude = 0.001 in	
		Abrasive 100 mesh	Abrasive 400 mesh	Abrasive 100 mesh	Abrasive 400 mesh
Copper	Circular, 1/2 inch dia.	0.063	0.020	0.018	0.006
Brass (BSS 251)	Circular, 1/2 inch dia.	0.090	0.028	0.022	0.008
Mild steel (EN2)	Circular, 1/2 inch dia.	0.086	0.022	0.021	0.007
Silver steel*	Circular, 1/2 inch dia.	0.074	0.022	0.020	0.008
Stainless steel (18% Cr, 8% Ni, 0.1% C)	Circular, 1/2 inch dia.	0.071	0.020	0.018	0.006
Tungsten carbide	Triangular, 1/8 inch base	0.156	0.100	0.038	0.030
Mild steel (EN2)	Triangular, 1/8 inch base	0.150	0.102	0.036	0.029
		CUTTING RATE, ° mm/min			
		Amplitude = 0.051 mm		Amplitude = 0.025 mm	
		Abrasive 100 mesh	Abrasive 400 mesh	Abrasive 100 mesh	Abrasive 400 mesh
Copper	Circular, 12.7 mm dia.	1.60	0.51	0.41	0.15
Brass (BSS 251)	Circular, 12.7 mm dia.	2.28	0.71	0.56	0.20
Mild steel (EN2)	Circular, 12.7 mm dia.	1.18	0.56	0.53	0.19
Silver steel†	Circular, 12.7 mm dia.	1.88	0.56	0.51	0.20
Stainless steel (18% Cr, 8% Ni, 0.1% C)	Circular, 12.7 mm dia.	1.80	0.51	0.46	0.15
Tungsten carbide	Triangular, 3.2 mm base	2.96	2.54	0.97	0.76
Mild steel (EN2)	Triangular, 3.2 mm base	2.91	2.59	0.91	0.74

SOURCE: Adapted from E. A. Neppiras and R. D. Foskett, p. 370.
 * Averaged over about 0.1 inch (2.5 mm) penetration.
 † 57% C, 0.02% S, 0.025% P, 0.25% Mn, tempered in air after oil-quenching from 1000°C.

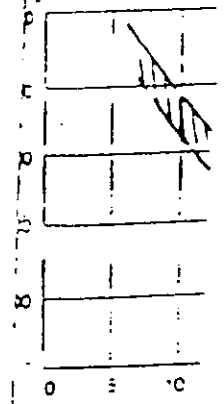


Ultrasonic
and Rotary UII

TABLE 10.7-12 Tool Wear for Various Tool Materials Cutting with 100 Mesh B₄C Abrasive
(Amplitude = 0.002 inch (0.051 mm); optimum static load at 20 kHz)

TOOL MATERIAL	TOOL SHAPE	TOOL WEAR					
		Soda Glass Work Material			Tungsten Carbide Work Material		
		Longitudinal tool wear in mm	Total penetration in mm	Tool wear as % of stock removal	Longitudinal tool wear in mm	Total penetration in mm	Tool wear as % of stock removal
Copper Mild steel (EN2) Silver steel ^a Stainless steel (18% Cr, 8% Ni, 0.1% C) Brass (BSS 251) Sintered tungsten carbide	Circular, 1/2 in (12.7 mm) dia. Circular, 1/2 in (12.7 mm) dia. Circular, 1/2 in (12.7 mm) dia.	0.0025	0.520	0.48	0.110	13.2	88
		0.018	1.850	1.0	0.110	42.0	26
		0.0025	0.540	0.48	0.012	13.8	35
Mild steel Mild steel Mild steel Brass	Circular, hollow, int. dia. = 1/8 in (3.2 mm), ext. dia. = 1/4 in (6.4 mm), fl form, 1/2 in (12.7 mm) square, limbs, 1/16 in (1.6 mm) thick Circular, hollow, int. dia. = 0.33 in (8.4 mm), ext. dia. = 0.39 in (9.9 mm) Extrusion shape T-form, height of T = 16 mm (0.63 in)	0.008	1.150	0.7	0.016	29.2	125
		0.021	1.250	1.68	0.175	31.8	140
		0.0015	1.510	0.1	0.138	38.4	110
		Tool Steel			Tungsten Carbide		
		0.050	0.024	220	0.156	0.125	3.18
					0.170	0.076	1.91
					0.250 (avg)	0.125	3.18

Source: Adapted from E. A. Nafziger and R. O. Foshell, p. 373
^aAverage over 0.1 inch (2.5 mm) penetration
^b0.81% C, 0.020% S, 0.025% P, 0.28% Mn, tempered in air after oil quenching from 600°C



10.7-5 Grit size
finer particles pro-
duces cut faster
pieces of ultrason-
ic machining paper 48

10.7-11 Effective
mass work material

TOOL MATERIAL

(BSS 251)
Steel (EN2)
Steel
Steel
Cr, 8% Ni, 0.1% C
Carbon carbide
Steel (EN2)

(BSS 251)
Steel (EN2)
Steel
Steel
Cr, 8% Ni, 0.1% C
Carbon carbide
Steel (EN2)

Adapted from E. A.
cover about 2 inch
0.020% S, 0.025%

10.7 Ultrasonic Machining—USM and Rotary Ultrasonic Machining—RUM

TABLE 10.7-13 Material Removal Rates for Various Work Materials

WORK MATERIAL	MATERIAL REMOVAL RATE	
	in ³ /min	mm ³ /min
Carbon	0.015	0.10
Glass	0.016	262
Ceramics	0.005	82
Silicon	0.005	10
Germanium	0.006	28
Quartz (crystal)	0.007	10
Ferrite	0.014	230
Tungsten carbide	0.00025	4
Tool steel (hardened)	0.0002	3
Stainless steel (hardened)	0.0002	3
Boron carbide (fused)	0.00025	4
Pyrolytic graphite	0.010	16

TABLE 10.7-14 USM Material Removal Rate Index (Cutting soda glass at 0.060 in./min [1.52 mm/min] = 100)

WORK MATERIAL	INDEX
Soda glass	100
Quartz	70
Silicon	60
Tungsten carbide	4
Tool steel	2

SOURCE: G. E. Litzelord, *Machining by ultrasonics*, 1971.

TABLE 10.7-15 Rotary Ultrasonic Machining (RUM) with Rotating Diamond Impregnated Tool

WORK MATERIAL	DRILL DIAMETER		DEPTH OF CUT		MACHINING TIME seconds	CONDITIONS
	in	mm	in	mm		
99.9 Alumina	0.042	1.07	0.250	6.35	130	20 kHz frequency 3000 rpm 120 grit core drill diamond tool 10 to 15.5 kg pressure
	0.125	3.18	0.250	6.35	20	
	0.250	6.35	0.250	6.35	25	
	0.375	9.53	0.250	6.35	30	
	0.500	12.70	0.250	6.35	38	
Glass	0.042	1.07	0.500	12.7	120	
	0.250	6.35	5.000	127	360	
Ferrite	0.080	2.03	0.250	6.35	70	
	0.125	3.18	0.250	6.35	30	
	0.250	6.35	0.250	6.35	35	
Boron composite	0.500	12.70	0.700	17.8	48	
	0.250	6.35	0.500	12.7	18	
	0.125	3.18	0.500	12.7	25	

SOURCE: W. R. Tyrrell, A new method for machining hard and brittle materials, *SAMPE Quarterly* 1 (January 1970): 55-59

10.7 Ultrasonic Machining—USM and Rotary Ultrasonic Machining—RUM

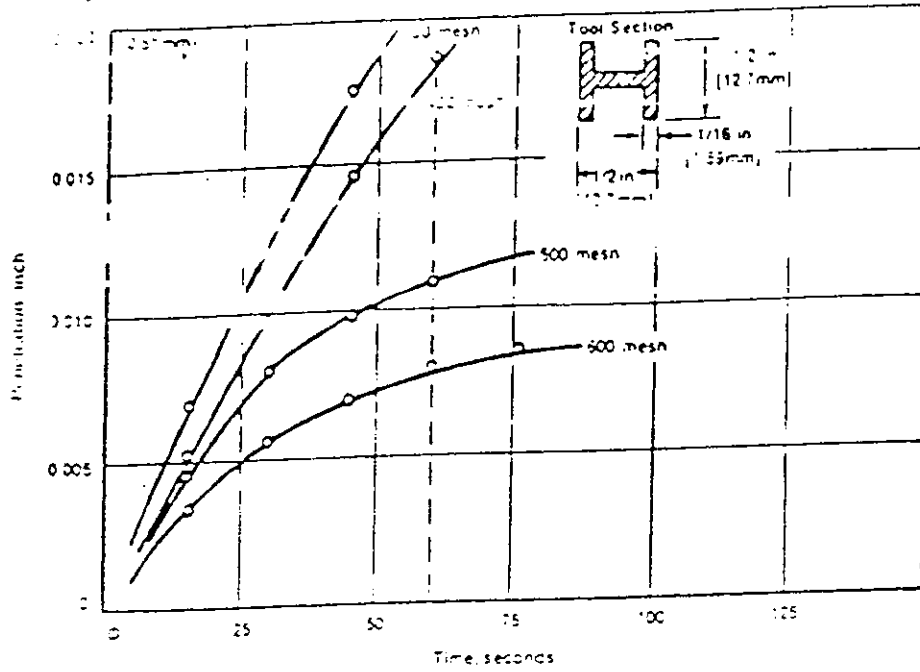


Figure 10.7-9 Penetration rate as a function of time for various grit sizes. Grit sizes given in British Standard Sieves. (American Mesh sizes are essentially the same.) (E. A. Neppiras and R. D. Fosket, p. 370)

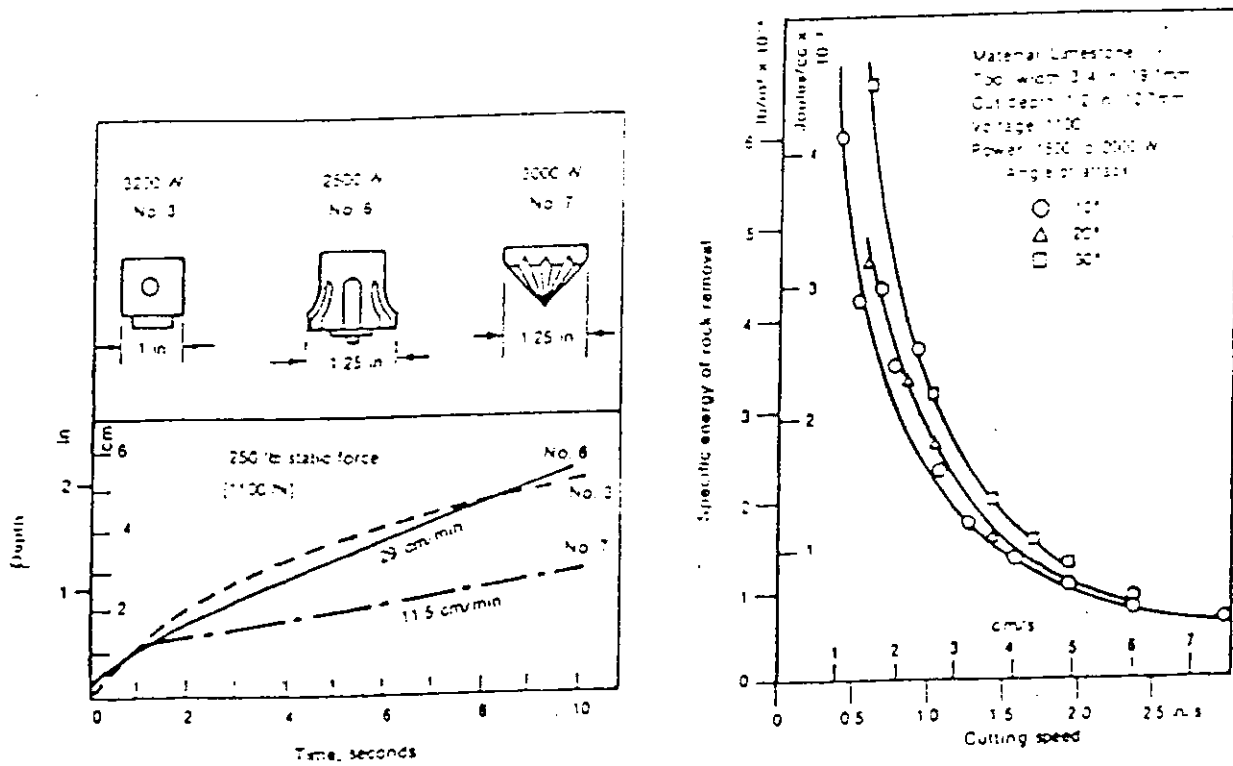


Figure 10.7-10 Drilling and layer removal rates for medium Indiana limestone processed with USM. Left, depth of drilling versus time for three types of tools operated at 10 kHz; right, specific energy at various cutting speeds and angles of attack at 10 kHz. (From K. F. Graff, Application of sonic power to rock cutting, *Ultrasonics International 1973 conference proceedings*, pp. 31, 33)

For

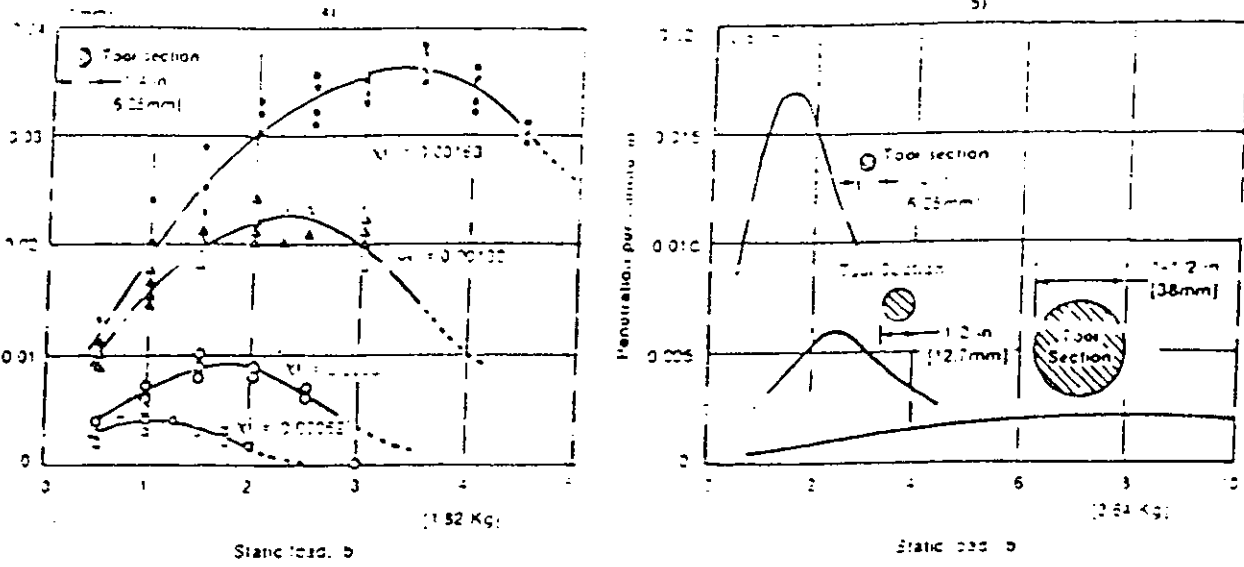


Figure 10.7-7 Penetration rate as a function of static load for (a) various amplitudes (ξ) and (b) various tool areas. (E. A. Neppiras and R. D. Foskett, p. 369)

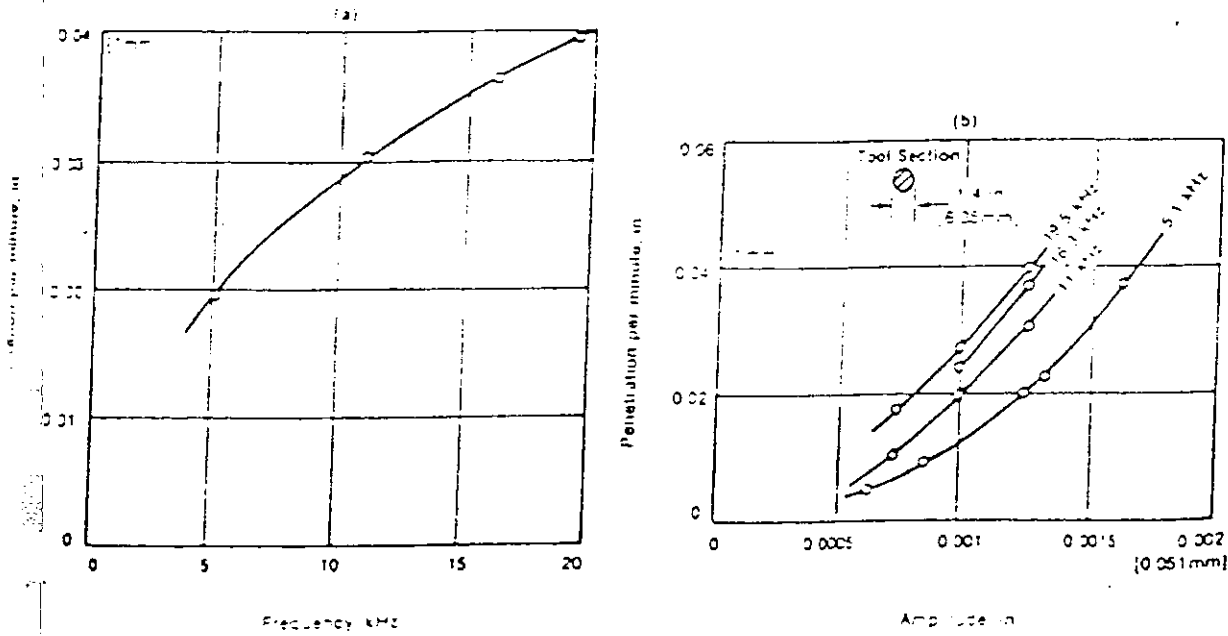
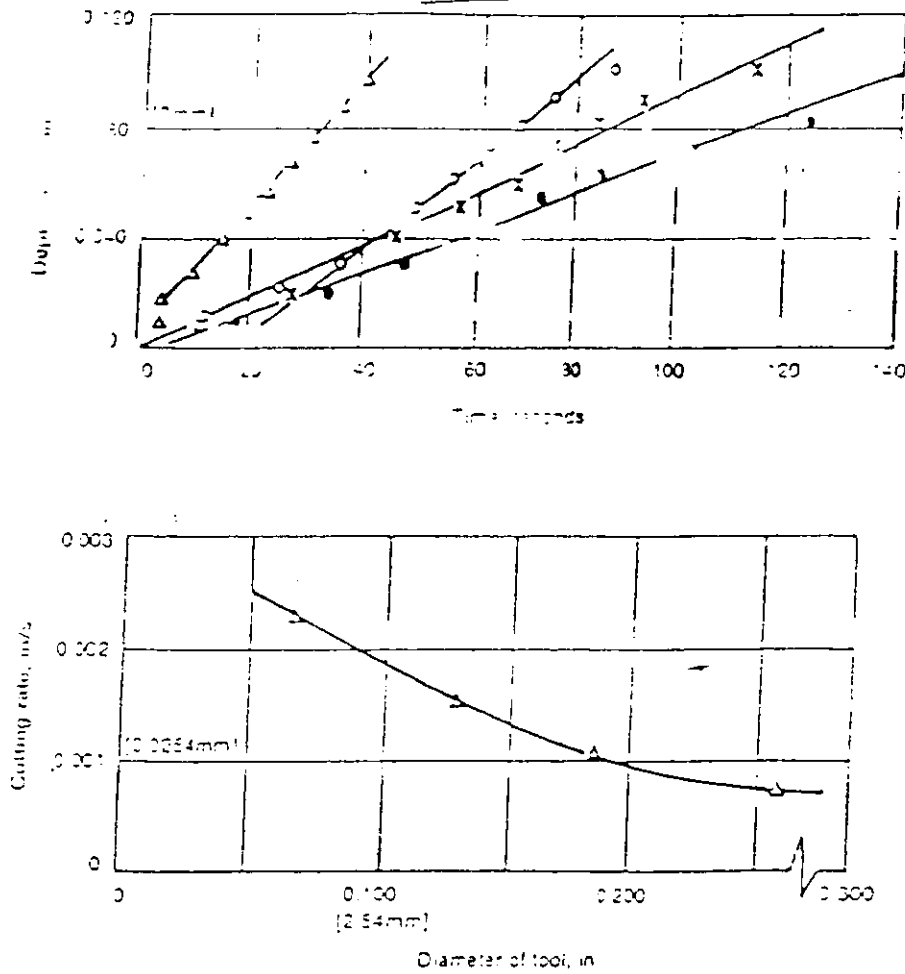


Figure 10.7-8 Penetration rates in glass as a function of (a) frequency, for a peak to peak amplitude of 0.00125 inch [0.038 mm] and constant static load; and (b) amplitude, for four operating frequencies and constant static load. (E. A. Neppiras and R. D. Foskett, p. 369)

NV



KEY	DIAMETER OF TOOL		CUTTING RATE	
	in	mm	in/s	mm/s
△	0.0625	1.59	2.3	58
○	0.125	3.18	1.58	40
×	0.150	3.81	1.1	28
●	0.250	6.25	0.7	18

Figure 10.7-11 Cutting rates for stainless steel tools into ceramic work material. Top, determining rates for various size tools; bottom, rates as a function of tool diameter. (J. Krawczyk, Ultrasonic grinding techniques in microminiaturization, Report No. TR-958, Diamond Ordnance Fuze Laboratories, Washington, DC, 1961)

10.7 Ultrasonic Machining—USM and Rotary Ultrasonic Machining—RUM

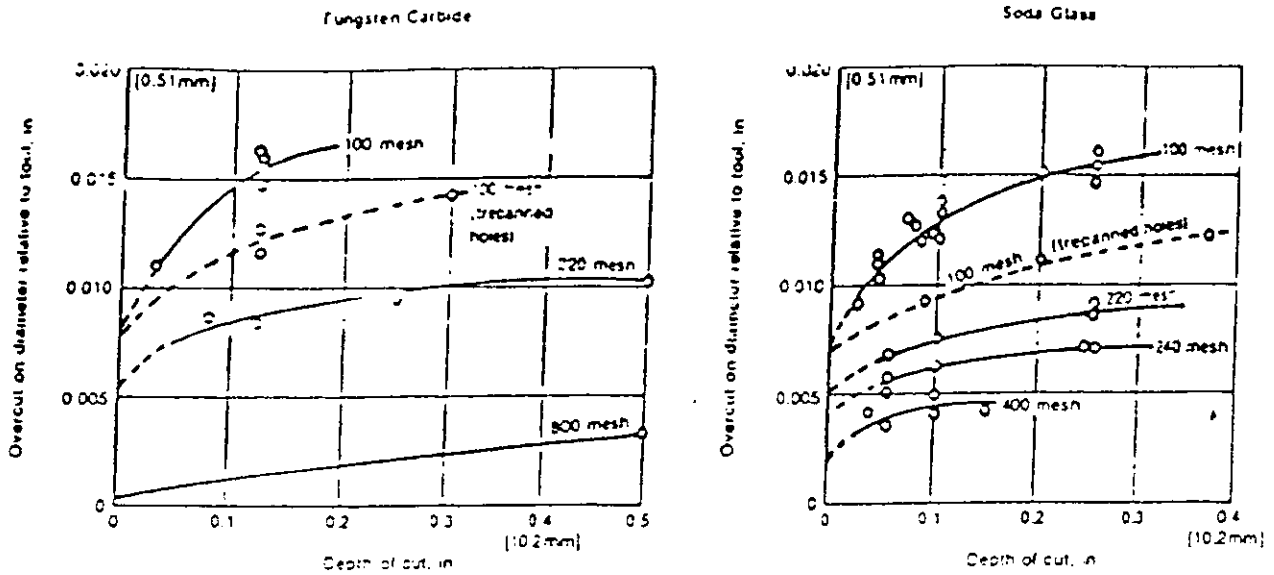


Figure 10.7-12 Overcut values for tungsten carbide and soda glass work materials cut with B₂C abrasive at various depths. (E. A. Neppiras and R. D. Foskert, p. 374)

TABLE 10.7-16 General Wear Ratios

TOOL MATERIAL	APPROXIMATE WEAR RATIO (ratio of depth of cut to loss of tool size)			
	Workpiece Materials			
	Glass	Steelite	Tungsten carbide	Ceramic
Brass	40-50	10	0.7	40
Annealed low C steel	100		1.1	75
Cold rolled steel	100	35	3.9	75
Stainless steel	150	40	2.8	100
Tungsten carbide	1000		0.9	

SOURCE: J. Krawczyk, Report No. TR-958, Diamond Ordnance Fuze Laboratories, 1961.

NOTE: General cutting conditions: 1/4-inch diameter mild steel tool; 20 kHz; 320 gm B₂C; 1-1/2 lb pressure.



Ultrasonic Machining—USM 10.7 and Rotary Ultrasonic Machining—RUM

TABLE 10.7-17 Representative USM Penetrating and Tool Wear Rates at 700 Watts Input

MATERIAL	RATIO STOCK REMOVED TO TOOL WEAR	MAXIMUM PRACTICAL MACHINING AREA		AVERAGE PENETRATING RATE*	
		cm ²	cm ²	in./min	mm/min
Glass	100:1	4.0	25.8	0.150	3.81
Ceramic	75:1	3.0	19.4	0.060	1.52
Germanium	100:1	3.5	22.8	0.025	2.16
Tungsten carbide	1.5:1	1.2	7.7	0.010	0.25
Tool steel	1:1	0.075	5.6	0.005	0.13
Aluminum oxide	100:1	4.0	25.8	0.150	3.81
Synthetic ruby	2:1	0.375	5.6	0.020	0.51
Carbon-graphite	100:1	3.0	19.4	0.030	0.76
Ferrite	100:1	3.5	22.6	0.125	3.18
Quartz	50:1	3.0	19.4	0.255	6.55
Boron carbide	2:1	0.375	5.6	0.008	0.20
Glass-bonded mica	100:1	3.5	22.6	0.125	3.18

SOURCE: Data from Raytheon Company, Impact grinders for ultrasonic machining, 1961

NOTE: Tool material was cold rolled steel in all cases. #320 mesh Boron Carbide was used in all cases.

*1/2-inch (12.7 mm) diameter tool, 1/8-inch (3.18 mm) deep.

TABLE 10.7-18 Representative USM Penetrating and Tool Wear Rates at 100 Watts Input

MATERIAL	SOLID TOOL DIAMETER		FORCE		BEST CUTTING RATE		ABRASIVE/WATER RATIO BY VOLUME	STOCK REMOVAL RATIO WORKPIECE (vs) TOOL
	in	mm	lb	kg	in./min	mm/min		
Aluminum oxide Silicon carbide	0.25	6.35	1	0.45	0.075	1.9	1.4:1	100:1
	0.25	6.35	5	2.27	0.010	0.25	1.4:1	13:1
	0.25	6.35	1	0.45	0.002	0.05	1.4:1	1:1
Germanium	0.25	6.35	0.5	0.22	0.100	2.50	1.4:1	100:1
	0.25	6.35	1	0.45	0.090	2.29	1.4:1	200:1
	0.25	6.35	1	0.45	0.110	2.79	1.4:1	100:1
Silicon	0.25	6.35	1	0.45	0.110	2.79	1.4:1	100:1
	0.25	6.35	3	1.36	0.070	1.78	1.4:1	50:1
	0.125	3.18	1	0.45	0.125	3.18	1.4:1	100:1
Aluminum oxide Silicon	0.125	3.18	1	0.45	0.030	0.76	0.25:1	10:1
	0.125	3.18	0.5	0.22	0.250	6.35	0.25:1	100:1
	0.125	3.18	1	0.45	0.125	3.18	0.25:1	100:1
Silicon carbide	0.125	3.18	1	0.45	0.125	3.18	0.25:1	100:1
	0.125	3.18	1	0.45	0.064	1.6	0.25:1	1:1

Data from Raytheon Company, Impact grinders for ultrasonic machining, 1961

*Tool material was cold rolled steel in all cases. #320 mesh Boron Carbide was used in all cases.

10.7 Ultrasonic Machining—USM and Rotary Ultrasonic Machining—RUM

TABLE 10.7-19 Equipment Size
(Estimate of watts required for 20 kHz equipment using 120 mesh B.C abrasive and colinum)

CUTTING RATE						WATTS
Glass		Hard Alloy		Germanium		
in./min x 10 ⁻⁴	mm ² /min	in./min x 10 ⁻⁴	mm ² /min	in./min x 10 ⁻⁴	mm ² /min	
10	150	3.1	5	31	50	250
2.4	350	4.9	8	61	100	500-600
4.9	800	12.2	20	122	200	1000
9.0	1500	18.3	30	183	300	1500
15.0	3000	45.8	75	427	700	4000

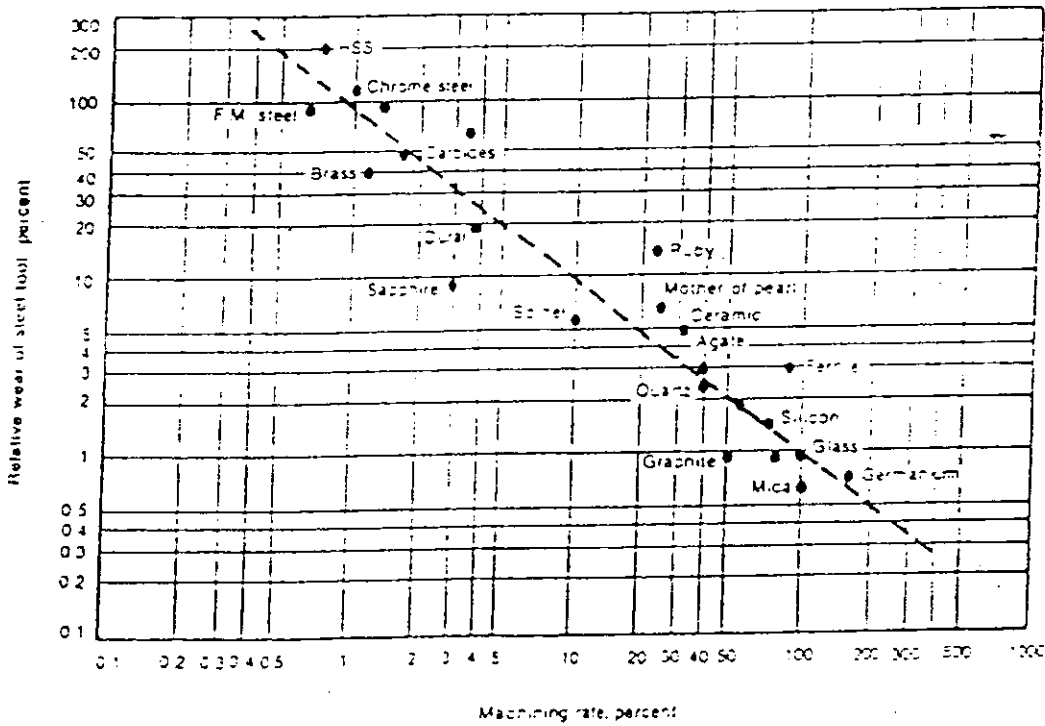


Figure 10.7-13 Tool wear versus machining rate. Relative wear rate of steel tool in various work materials. 100% is 5 mm/min (0.20 in/min) in glass. (M. Adithan and V. C. Venkatesh, Tool wear phenomena in ultrasonic drilling, *Proceedings of 5th all India machine tool design and research conference*, University of Roorkee, 1972, p. 625)

19

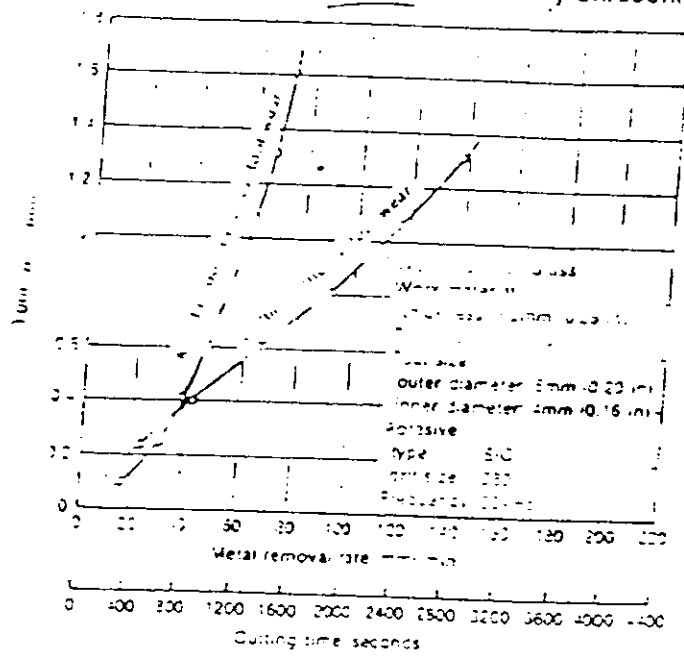


Figure 10.7-14 Tool wear versus machining rate and cutting time. (M. Adnan and V. G. Venkatesh, p. 327)

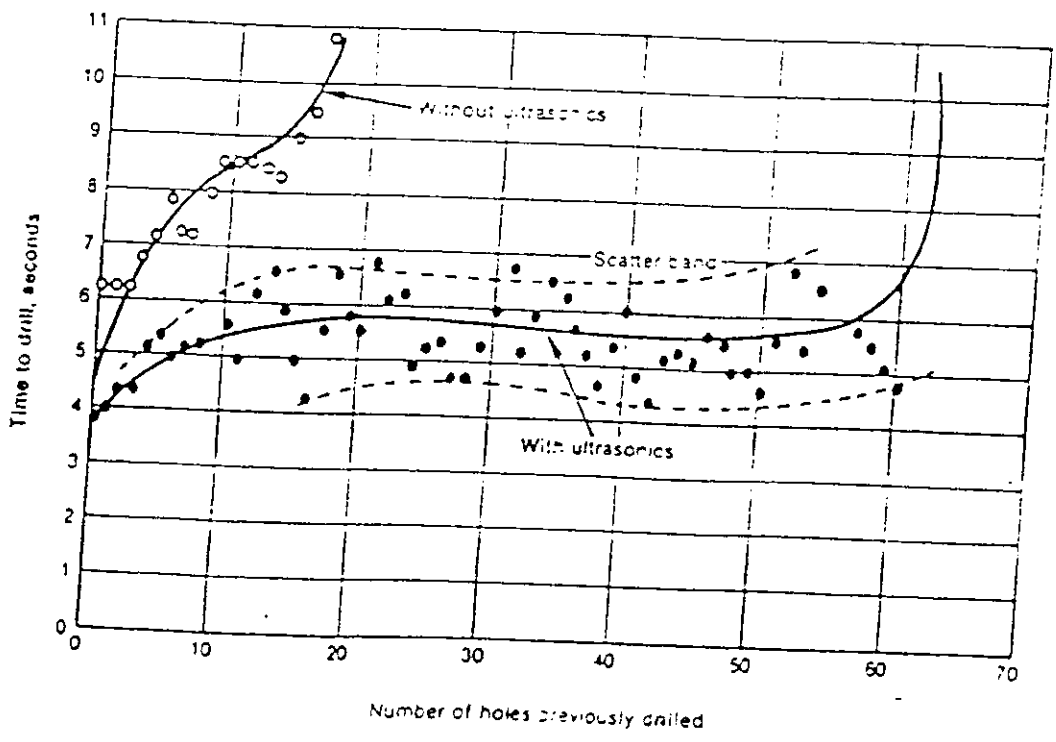


Figure 10.7-15 Improvements in drilling time and number of holes drilled using rotary ultrasonic machining. Test drilling of 1/16-inch [1.59 mm] Ti-6Al-4V with # 30 cobalt twist drill at 1390 rpm and 54 lb [24.5 kg] force in a Branson UMT3. (W. Tyrrell, Rotary Ultrasonic Machining, Technical paper MR70-516, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, MI, 1970)

10.7 Ultrasonic Machining—USM and Rotary Ultrasonic Machining—RUM

TABLE 10.7-20 General Recommendations of Conservative Starting Conditions for USM

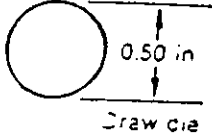
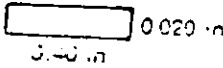
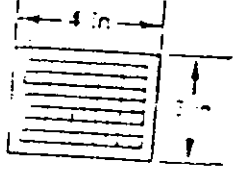
PARAMETER	WORK MATERIAL							
	Glass		Ceramics		Hard Metals (40-60 Rc)	Composites (e.g., glass epoxy)	Tungsten Carbide	Stone
	borosilicate	Pyrex	Alumina	Alumina				
Tool material	mild steel	mild steel	stainless steel	stainless steel	tool steel	mild steel	mild steel	tool steel
Abrasive Type	B.C	B.C	B.C	B.C	SiC	B.C	B.C	Al ₂ O ₃
Size	320	320	320	180	240	320	240	180
Percent concentration	20	60	20	40	50	40	50	20
Carrier fluid	H ₂ O	light oil	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
Power Frequency, kHz	20	20	20	20	20	20	20	10
Watts	700	100	400	200	500	300	500	1000
Amplitude, in [mm]	0.002 [0.051]	0.001 [0.025]	0.002 [0.051]	0.001 [0.025]	0.0005 [0.013]	0.0015 [0.038]	0.0005 [0.013]	0.004 [0.102]
Spindle thrust, lb [kg]	5 [2.27]	2 [0.91]	2 [0.91]	1 [0.45]	4 [1.82]	2 [0.91]	4 [1.82]	10 [4.54]
Material removal Rate, in ³ /min [mm ³ /min]	0.030 [491]	0.015 [246]	0.004 [65.5]	0.005 [81.9]	0.0002 [32.7]	0.016 [262]	0.0003 [4.9]	0.15 [2458]
Penetration, in/min [mm/min]	0.150 [3.81]	0.075 [1.90]	0.020 [0.51]	0.025 [0.64]	0.001 [0.025]	0.080 [2.0]	0.0015 [0.038]	0.150 [3.81]
Relative percent*	100	50	15	20	6	50	4	500
Depth of cut, in [mm]	0.5 [12.7]	0.5 [12.7]	0.1 [2.5]	0.1 [2.5]	0.25 [6.4]	0.1 [2.5]	0.1 [2.5]	1.0 [25.4]
Cutting time, minutes	3.4	6.8	5.0	4.0	250.0	12.5	66.0	5.6
Wear ratio (work to tool)	100	200	75	75	75	100	2	150
Tolerance, ± in [± mm]	0.0010 [0.025]	0.0005 [0.013]	0.0010 [0.025]	0.0010 [0.025]	0.0015 [0.038]	0.0010 [0.025]	0.0005 [0.013]	0.0020 [0.051]
Surface roughness, R _a , μm [μm]	40-60 [1-1.5]	20-40 [0.5-1]	40-60 [1-1.5]	40-60 [1-1.5]	10-20 [0.25-0.5]	40-60 [1-1.5]	10-20 [0.25-0.5]	50-80 [1.5-2]

NOTE: Based generally on a tool face area of 0.2 in² [1.29 cm²].
*Based on soda glass as 100%.

SPECIFIC APPLICATIONS DATA


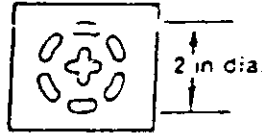
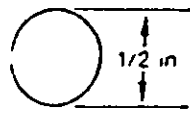
90

TABLE 10.7-21 Specific Applications Data for Ultrasonic Machining

Work material	Tungsten Carbide		Phenolic Molding	Carbide
Workpiece configuration:				
Abrasive type:	B ₄ C	B ₄ C	Al ₂ O ₃	SiC
grit size:	320	600		400
percent concentration:				50
Power supply frequency, kHz:	20	20	20	20
power, W:				500
amplitude, in:				0.0015
Spindle thrust, lb:				Controlled feed rate
Depth cut, in:	0.187	0.187	0.180	0.040
Cutting time, min:	15	10	2	10
Clearance (work to tool):				0
Tolerance, in:		± 0.0002	± 0.001 for size; ± 0.0025 for depth	± 0.0005
Surface roughness, μ n R _a :	22	15		15
Remarks:	Roughing cut, repanned, 1/4-inch ID, Through hole.	Finishing cut, 0.4992-inch OD tool size, Through hole.	Bottom hole.	Very delicate part.

10.7 Ultrasonic Machining—USM and Rotary Ultrasonic Machining—RUM

TABLE 10.7-21—Continued

Work material:	Silicon Nitride	Glass-Graonite Epoxy Composite	Glass
Workpiece configuration:	 <p>1.0 in OD 0.5 in ID</p> <p>Rings — trepanned from block</p>	 <p>2 in dia.</p> <p>23 slots 0.025 x 0.060 in to 0.025 x 0.375 in</p>	 <p>1/2 in</p>
Abrasive type:	B.C	B.C	B.C
grit size:	240	280	200
percent concentration:	50	40	35
Power supply frequency, kHz:	20	20	25
power, W:	500	300	-
amplitude, in.	0.002	0.0011	0.0018
Spindle thrust, lb:	1.5	4	-
Depth cut, in.	0.30	0.050	0.150
Cutting time, min:	12	2	1
Wear ratio (work to tool):	10:1	80:1	100:1
Tolerance, in:	± 0.001	± 0.001	-
Surface roughness, R_a :	15	50 (est.)	-
Remarks:	Hardest ceramic.	No burrs on through slots.	Low carbon steel tool for engraving.

۹۴

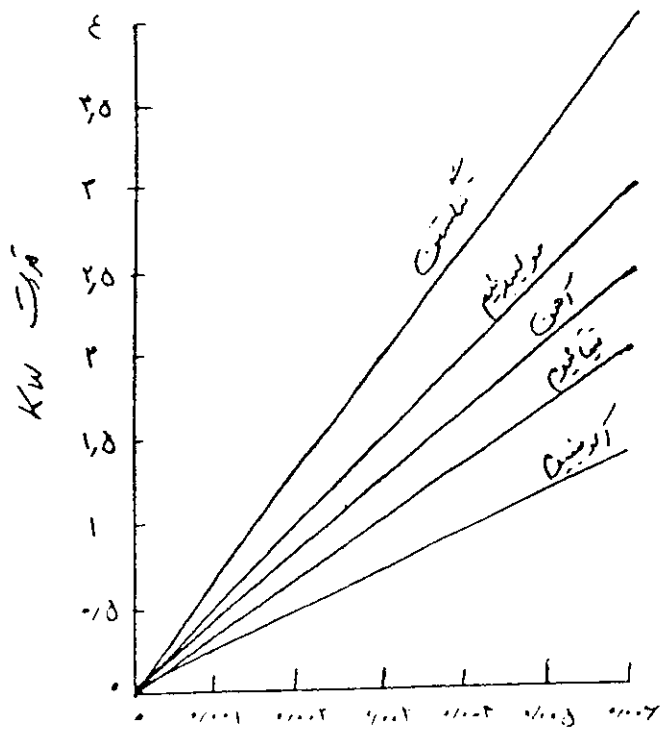
بسمه تعالی

درس تولید مخصوص
روش های پیشرفته ماشینکاری

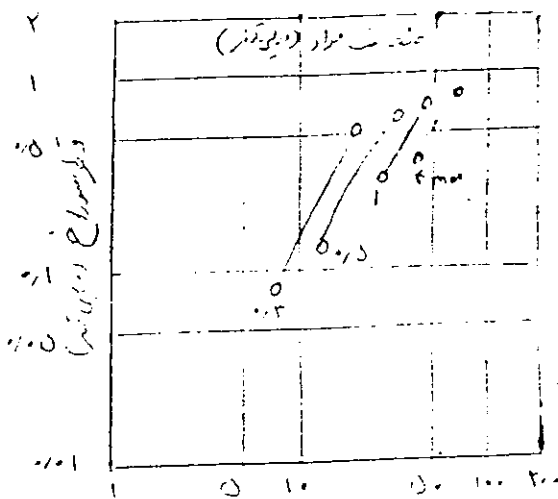
ماشینکاری به روش جت آب Waterjet Machining

دکتر مرتضی صادق عمل نیک

دانشگاه تبریز
دانشکده فنی - گروه مهندسی ساخت و تولید
ترم پائیز ۱۳۸۰



نرخ مایه برداری cm^3/s
 شکل (۵) رابطه بین نرخ مایه برداری و قدرت



تعداد قطر سوراخ (میکرومتر)
 قطر سوراخ (میکرومتر)
 شکل (۶) تغییرات تعداد سوراخ نسبت به اندازه سوراخ و قطر سوراخ

۹۵
ماشینکاری با جت آب (WJM) Water Jet Machining

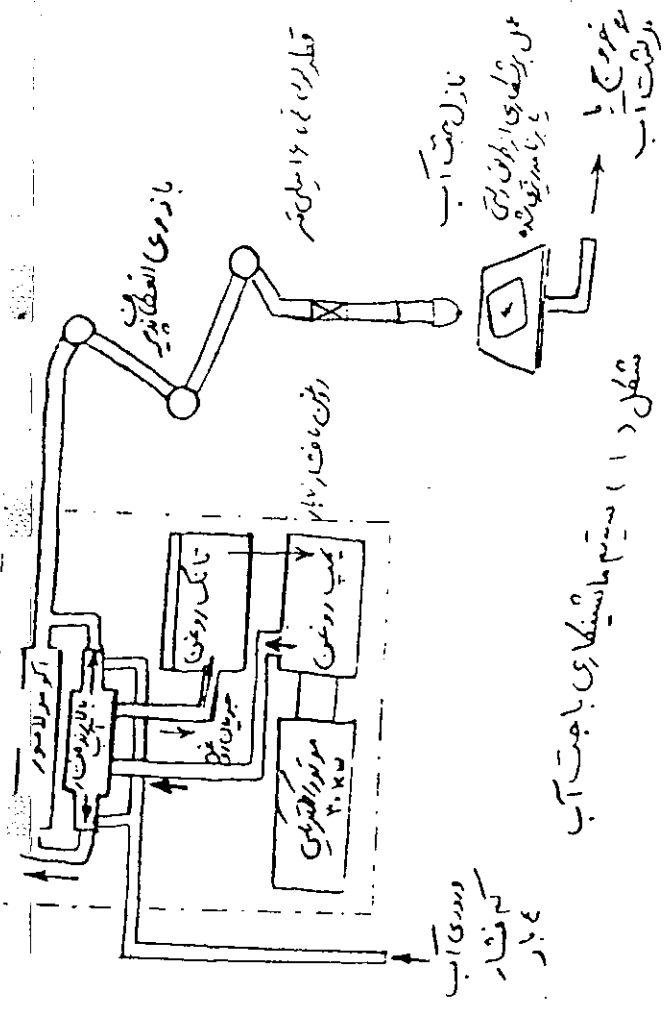
سوار نخلت را می توان از طریق جت آب برشکاری نمود. امروزه قابلیت ماشینکاری و از آنجا که کاری این روش به حدی بالا رفته که رسانندگی آن را تا همین می نماید. در این روش جت آب نامرعی برابر با 900 m/s متر در ثانیه عبور می کند و موجب خرد شدن قطعه در اثر برخورد با آب تحت فشار می شود.

اجزاء تشکیل دهنده فرایند

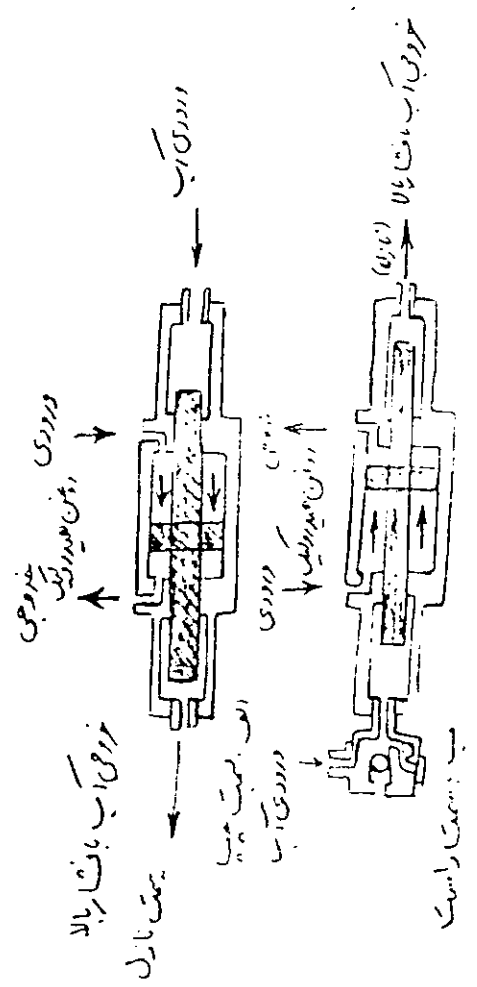
فرایند ماشینکاری از طریق جت آب از عناصر زیر تشکیل شده است:

- موتور الکتریکی (Electric Motor)
- پمپ هیدرولیکی (Oil Pump)
- تانک روغن (Oil Tank)
- سیلندر درگرفتن جهت بالا بردن فشار آب (Double-acting fluid intensifier)
- انباره (Accumulator)
- نازل (Nozzle)
- لوله خمی انعطاف پذیر (Flexible tube)
- سیستم کنترل

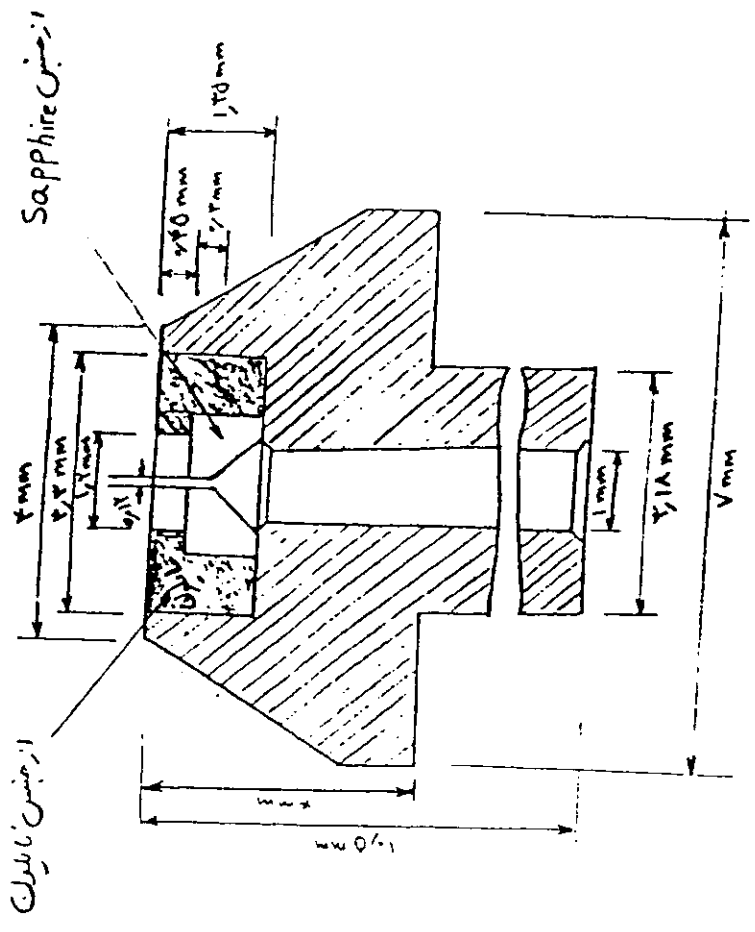
عناصر فوق الذکر در شکل (۱۱) نشان داده شده اند. موتور الکتریکی قدرت ۳۰ کیلووات پمپ هیدرولیکی را به حرکت در می آورد و پمپ روغن داخل تانک را با فشار بیشتر از ۱۱۷ بار جهت بجزئی در آوردن سیلندر درگرفتن (intensifier) و بالا بردن فشار آب بجزئی در می آورد. حداکثر در شکل (۲۱) نشان داده شده است، بجزئی در آوردن سیلندر درگرفتن موجب می شود آب که با فشار ۴ بار وارد می شود، پس از فشردن شدن فشار آن به ۵۸۰۰ بار برسد. در این فرایند آب ۱۲٪ فشرده شده و هنگام خروج از نازل فشار آن به ۵۸۰۰ بار برسد. در این فرایند ۵٪ تلفات انرژی در انباره یا اکومولاتور موجب می شود تا جریان آب بعد از عبور از نازل خارج شود. آب تحت فشار از طریق لوله های انعطاف پذیر با قطر ۶ تا ۱۴ میلی متر به قسمت کلنگ نازل منتقل می شود. در شکل (۳) یک نازل جت آب نشان داده شده است.



شکل (۱) سیستم ماشینکاری با حث آب



شکل (۲) بالانسزده دو طبقه فنشار آب



شکل (۳) شکل نازل حث آب

۴/۱۳۸
۵/۱۳۸
۶/۱۳۸
۷/۱۳۸
۸/۱۳۸
۹/۱۳۸
۱۰/۱۳۸
۱۱/۱۳۸
۱۲/۱۳۸
۱۳/۱۳۸
۱۴/۱۳۸
۱۵/۱۳۸
۱۶/۱۳۸
۱۷/۱۳۸
۱۸/۱۳۸
۱۹/۱۳۸
۲۰/۱۳۸

عمل بر شکاری بوسیله سیستم دمنی، با ابزاره دور و یا با استفاده از برنامه رایانه ای کنترل می شود

نازل مورد استفاده در زاینده جت آب را معمولاً از جنس synthetic Sapphire می سازند

حد نازل می تواند قبل از آنکه بوسیله ذرات معلق در آب آسیب ببیند تا ۲۰۰ ساعت کار کند

البته میزان کار نازل بستگی به سختی آب و ذرات معلق در آب دارد. جهت جلوگیری از

صدمه خوردن نازل، آب را از چندین فیلتر عبور می دهند تا ذرات معلق

وجود نبرد کمتر از ۰.۰۰۱ میکرو متر از آب گرفته شود. همچنین بر روی نازل آب معطر

استفاده نمود تا هزینه آن خیلی زیاد می شود.

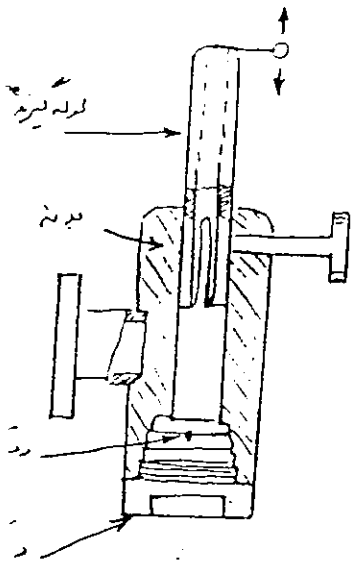
بعد از اینکه جت آب از قطعه بر شکاری عبور کرد بوسیله گیرنده Catcher دریا می شود

بوسیله گیرنده آب تحت فشار (جت آب) Catcher در کاس می انجام میدهد:

۱- گیرنده آب تحت فشار طوری طراحی شده که سطح مدارک شش از کاشی سرعت آب را کاهش دهد و سطح مدارک بر اندازه ۱۰۵ dB می رسد تا به سطح مدارک شش کاهش دهد.

۲- از وسیله گیرنده catcher منبجان فزون یا مستقیم موجب جمع آوردن کسولها و شلیف ری در جت در

استفاده می شود.



شکل (۴) یک نمونه از catcher نشان داده است که شامل تنظیم شده نازل

نشان می دهد که یک کاسه کوچک با طول تغییر و قابل تنظیم

ب- یک قسمت چرخنده که از طریق آن کسولها و شلیف ری خارج می شود

در بعضی از کارها که اپراتور از منطقه فالتیف در دور می آید

لگن گیرنده catcher basin موجب جمع آوردن آب و کسولها

و شلیف ری در آنجا می شود.

شکل (۴) یک گیرنده catcher

تا عمل به جت نازل تا قطعه کار غالباً ۰.۰۰۵ تا ۰.۰۰۶ میلیمتر می باشد.

نرخ	نرخ صدور (میلی متر)	نرخ صدور (میلی متر)	نرخ صدور (میلی متر)
۰/۶۴	۰/۱۳	۲۴۵۰	
۱/۱۷	۰/۲۳	۴	
۶/۶۵	۰/۳۰	۳۶	
۲/۶۰	۰/۳۶		
۰/۵۷	۰/۱۵	۲۷۶۰	
۰/۹۸	۰/۲۰		
۲/۲۷	۰/۳۰		
۳/۰۷	۰/۳۶		
۰/۴۹	۰/۱۵	۲۰۷۰	
۰/۸۷	۰/۲۰		
۱/۹۷	۰/۳۰		
۲/۶۵	۰/۳۶		

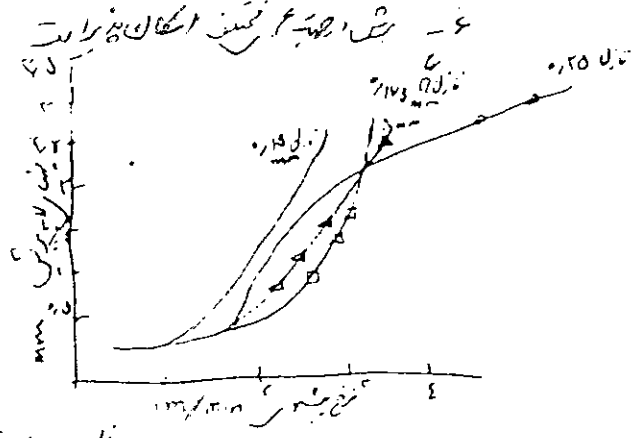
استیارات و اختراعات آب

- ۱- درجهت آب خودرنگی انبار وجود ندارد
- ۲- گدماهی در آب سرد ایجاد نمی شود
- ۳- براده و ذرات ریز در قطعه کی باقی نمی ماند
- ۴- سطح برنگار نشد. تعمیر است
- ۵- سبکی وازانی انبار نسبت به روش های دیگر
- ۶- روش جدیدی که تمسک امکان پذیر است

کاربرد و اختراعات

کاربرد و اختراعات در زمینه های مختلف
 - کاربرد و اختراعات در زمینه های مختلف
 - کاربرد و اختراعات در زمینه های مختلف
 - کاربرد و اختراعات در زمینه های مختلف

نوع	ضخامت (میلی متر)	نرخ صدور (میلی متر)
GFRP	۲/۲	۱/۸ ۶-۶
Laminate	۳/۰	۱/۴ ۶-۴
AFRP	۵/۰	۲/۴ ۱-۴
Weak	۲	۱۰
		۶/۴ ۶-۴



دست EDM مخفف Electro-Discharge Machining می‌شود معنی آن ماشینکاری

بوسیله تخلیه الکتریکی است. فرسایش توسط جرقه الکتریکی اولین بار در سال ۱۷۴۸

توسط جوزف پرستلی (Joseph Priestly) گزارش شد. سال ۱۹۴۳ دوران نموداری

به نام‌های (ب.آ.آ) و (ان.آی) لازارنکو (B.O.R. & N.I. Lazarenko) مرقوم.

مماخت اولین ماشین EDM بر اساس مدار ری‌کپشن (RC) شدند. پس از آن با تحولات

در زمینه‌های فصلف نظم و کمپلوری، ماشین‌های EDM نیز متحول گردیدند، بطوریکه ماخار قابلیت

های فصلی آنها با ماشینهای اولیه بسیار متفاوت است. در حال حاضر مدارات ترانزیستور، مدارات آنالوگ

می‌باشد که در اکثر ماشینهای EDM مورد استفاده قرار می‌گیرد.

پاراوترهای مختلفی در EDM بر سرعت براده برداری و ماشینکاری مؤثر می‌باشند که عبارتند از:

مدت جریان جرقه

طول زمان روشنی پالس

ماشینکاری شیمیایی

ماشینکاری شیمیایی ماده تریب زدایی تریب فرایند شناخته شده روش های مختلفی می باشد
از این روش جهت ساخت مدارهای بی ریز الکترونیک استفاده می شود. همچنین سیوان
قطعات برسد. زاینه طرز ۱۵ مرقه شیک ری نمود. در این روش ماده از محل مورد نظر قطعه از کربن
عنوطه و ریختن آن در مواد شیمیایی برانته می شود. در این روش محل مورد نظر در قطعه در اثر خورد شدن
با حل شدن در راه شیمیایی ایجاد می شود. این حل شدن کنترل شده شیمیایی تعبیرت عنوان ۴ سطح
در عوض دانش را بین ۵...۰۰۰ تا ۳...۰۰۰ اینج بر دقت حلگامی می نماید

فرایند تکنیک فرزکاری یا برشکاری شیمیایی - فرارزگی می باشد

۱- آن روشی قطعه : در این مرحله عملیات چوب زاری، تمیز کردن، شستو، خیس اندن در مواد ویژه جهت

ایجاد چسبندگی بهتر پوشش روی قطعه انجام می گیرد

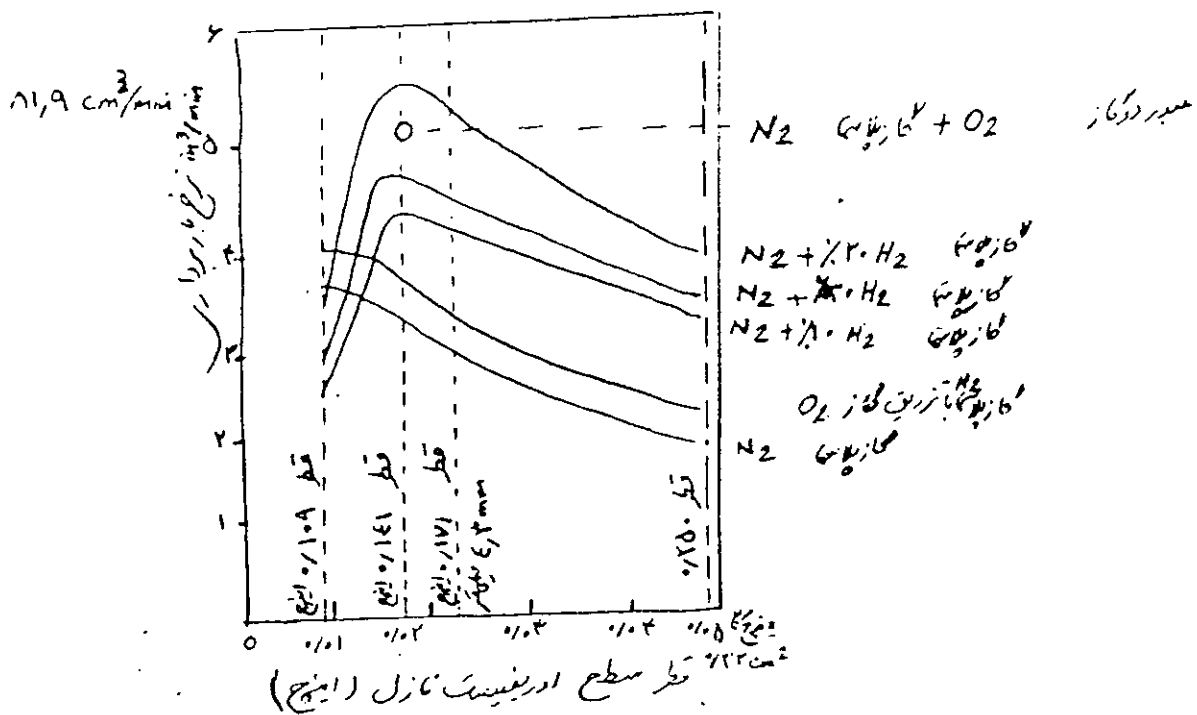
۲- پوشاندن قسمت هایی که حکاکی نمی شوند. (در این مرحله با ایجاد پوشش از ستمتوری که حکاکی نمی شوند تا قطعه می شود)

۳- حکاکی کردن قطعه (این مرحله با فرود بردن قطعه در ماده شیمیایی و ایجاد سیدیل مدار شیمیایی در قطعه می شود)

۴- برآشتن پوشش از روی قطعه و تمیز کردن آن

۵- عملیات بازبینی قطعه و پرداخت کاری

عموماً قطعه را چوبی نیر و تمیزی کنند و سطح آنرا با مواد مقاوم در برابر مواد شیمیایی می پوشانند و در نهایت تا وصل
هایی که میخواهند نیز برانته شود از کربن روش عمیق شیمیایی پوشش سطح آنرا جدا می کنند



میزان نرخ باربرداری از سطح آنتون پلیمر (PEHM) برای گازها مختلف و اندازه قطر در نفیست نازل

ضخامت قطعه mm	سرعت موش cm/min	انتقال با فوریت میزان موش A		
		Steel	فولاد	آنتون پلیمر
۹.۲۵	۵۱	۱۰۰		
	۱۰۲	۱۱۰		
	۱۷۸	۱۵۰	۱۵۰	
	۲۵۴	۱۰۰	۱۴۰	
	۳۸۱		۲۱۰	۱۳۵
	۴۰۹	۲۸۰		
	۵۰۸	۴۲۰		۵۵۰
۱۲.۷۰	۵۱	۱۷۰	۱۳۵	
	۱۰۲		۱۹۰	۱۲۰
	۱۷۸	۲۴۰	۲۵۰	۱۸۰
	۲۵۴		۲۷۰	۲۷۵
	۳۴۴	۵۰۰		
	۳۸۱		۷۰۰	۳۵۰
	۴۴۵	۱۰۰۰		
	۵۲۳		۱۰۰۰	۱۰۰۰

بیشترین تومن پلیمرها را در فلزات آلومینیم، فولاد و فولاد ضد زنگ

سرعت	Groove اندازه		نرخ باربرداری cm ³ /min
	عمق mm	عرض mm	
۱۰۱۶	۱۴,۲	۶,۴	۷۰,۲
۱۲۷۰	۱۴,۵	۵,۶	۷۱,۴
۱۵۲۴	۱۲,۷	۴,۸	۷۰,۶
۱۷۷۸	۱۱,۹	۴,۱	۶۰,۶
۲۰۲۲	۱۱,۲	۳,۲	۵۰,۸
۲۲۸۶	۱۰,۴	۳,۲	۵۹,۰
قدرت KVA	سرعت: ۱۲۷۰ mm/min		
۳۵,۵ ۳۸,۹ ۴۲,۰	۱۱,۹	۵,۶	۶۲,۹
	۱۴,۲	۶,۱	۸۲,۶
	۱۵,۰	۶,۶	۹۵,۱
	سرعت: ۱۵۲۴ mm/min		
۳۵,۸ ۳۷,۹ ۴۲,۶	۱۲,۷	۴,۱	۵۴,۱
	۱۳,۵	۴,۱	۵۷,۴
	۱۴,۲	۴,۸	۷۵,۴

حجم بیش از حد از لادود
- بسیار بیش از حد است
- عمق بیش از حد می شود
- نرخ باربرداری بیش از حد می باشد

عزم قدرت به تنگ می شود
- بسیار بیشتر از حد می باشد
- عمق بیش از حد می باشد
- نرخ باربرداری بیش از حد می باشد

جدول (۲) قدرت و سرعت برشکاری قوس پلاسما برای آلومینیم ۰.۸۶

شرایط ماشینکاری	ضخامت مواد (mm)	سرعت برشکاری (mm)					
		سرعت استیل		مواد ضد زنگ		آلومینیم	
		عمق	عرض	عمق	عرض	عمق	عرض
آمبر ۱۰۰ A گاز آرگون: N ₂ ۲۰.Psi گاز برش: CO ₂ ۵۰.Psi	۶,۴	۱,۰۲	۲,۰۶	۱,۲۷	۲,۵۴	۱,۵۲	۲,۰۵
	۱۲,۷	۰,۴۱	۰,۶۴	۰,۵۱	۰,۷۶	۰,۷۱	۱,۰۹
	۱۹,۰	NR	NR	۰,۲۰	۰,۲۸	۰,۲۸	۰,۴۸
	۲۵,۴	NR	NR	۰,۲۲	۰,۲۸	۰,۲۵	۰,۳۰
آمبر ۲۰۰ A گاز آرگون: N ₂ ۲۰.Psi گاز برش: CO ₂ ۵۰.Psi	۶,۴	۱,۲۷	۲,۵۴	۱,۶۵	۳,۴۸	۱,۹	۳,۹۴
	۱۲,۷	۰,۷۶	۱,۰۷	۱,۲۷	۱,۷۸	۱,۵۲	۲,۱۴
	۱۹	۰,۵۱	۰,۷۶	۰,۸۹	۱,۲۷	۱,۰۲	۱,۲۵
	۲۵,۴	۰,۳۸	۰,۵۱	۰,۵۱	۰,۶۶	۰,۶۶	۰,۸۹
آمبر ۴۰۰ A گاز آرگون: N ₂ ۲۰.Psi گاز برش: CO ₂ ۵۰.Psi	۱۲,۷	۱,۰۲	۱,۶۵	۱,۹۱	۳,۰۵	۲,۲۹	۳,۸۱
	۲۵,۴	۰,۷۶	۱,۰۷	۱,۰۲	۱,۴۰	۱,۲۷	۱,۷۸
	۳۸,۱	۰,۵۱	۰,۷۶	۰,۶۴	۰,۹۷	۰,۸۹	۱,۲۷
	۵۰,۸	۰,۳۶	۰,۵۸	۰,۴۳	۰,۷۱	۰,۶۱	۱,۰۴
۶۳,۵ ۷۶,۲	۰,۲۵	۰,۳۲	۰,۲۰	۰,۲۸	۰,۴۱	۰,۵۱	۰,۵۱
	۰,۱۵	۰,۱۸	۰,۲۰	۰,۲۵	۰,۲۳	۰,۳۰	۰,۳۰

توجه: سرعت برشکاری
بسیار کم است

جدول (۳) سرعت برشکاری برای ماشینکاری آلومینیم

منبع تغذیه:

نوع جریان: جریان مستقیم DC
 قدرت: تا ۲۰۰ kW
 جریان: بین ۵۰ تا ۱۰۰۰ آمپر

گاز اصلی:

نوع: آرگون - نیتروژن (۸۰٪ - ۲۰٪)، هیدروژن
 میزان جریان گاز: بین ۰.۴۲ تا ۵.۴۶ m³/hr ترکیب در حالت
 گاز ماندی: نیتروژن، اکسیژن، آب، هیدروکربن، CO₂
 میزان جریان گاز: تا ۱۱.۲ m³/hr ترکیب در حالت

درجه استاندارد آب جویز ماندی:

میزان جریان آب: تا ۵۶.۸ L/hr لیتر در ساعت

پلاستما:

درجه صافیت: بین ۱۱۰۰۰ تا ۲۸۰۰۰ درجه صافیت کلرد
 سرعت مورگی: بین ۵۰ تا ۶۱۰۰ mm/min میلی متر در دقیقه
 ضخامت: بین ۴ تا ۹.۵ mm میلی متر
 اندازه اوریجیت نوزل: بین ۱.۵۹ تا ۶.۳۵ mm میلی متر

میزان (ژوش)

بین ۱.۵۲ تا ۲.۲۹ mm برافشاندن نوزل
 سطح ۸.۷۶ mm برافشاندن با ضخامت ۲۵.۴ mm
 برای قطعات با ضخامت ۱۵۲ mm

زاویه برش

زاویه نوبال: بین ۲° تا ۷° درجه
 زاویه مخصوص: بین ۱° تا ۲° درجه

دقت:

۰.۱۸۱ mm ± برای قطعاتی با ضخامت بین ۶.۴ تا ۳۵ mm میلی متر

دقت:

۰.۲۲ mm ± برای قطعاتی با ضخامت بین ۱۵۲ تا ۲۰۳ mm میلی متر

شیعاع درشیم: حداقل ۲.۹ mm (شیعاع گوشه با افزایش سرعت برش تا ۳۸ mm برافشاندن برش ۶۱۰۷ mm/min)

حداکثر آب سرد	جرین بخار		حداکثر آب سرد A
	N ₂ m ³ /hr	H ₂ m ³ /hr	
۲۲۵	۲,۸۴	۰/۲۴	۲۲۵
۴۰۰	۴,۱۱	۰/۲۸	۴۰۰
۴۰۰	۴,۴۰	۰/۳۴	۴۰۰
۵۵۰	۴,۲۵	۰/۴۲	۵۵۰
۷۰۰	۵,۱۰	۰/۵۱	۷۰۰
۱۱۰۰	۶,۴۷	۰/۵۷	۱۱۰۰

مجموع آب سرد بیشتر
- بار بار نازل منطقه
- بار بار در حال کار نکرده

جدول (۱) اندازه نازل و قسمت جرین بخار

مختصات نقطه کار	سرعت برش cm/min	انقباض قدرت		
		نولار	نولار آب سرد A	آلودگی
۶,۲۵	۵۱	۱۰۰		
	۱۰۲	۱۱۰		
	۱۷۸	۱۵۰	۱۰۵	
	۲۵۴	۲۰۰	۱۴۰	
	۳۸۱	۲۸۰	۲۱۰	۱۳۵
	۴۰۶	۴۲۰	۲۸۰	۲۸۰
۱۲,۷۰	۵۱	۱۷۰	۱۳۵	
	۱۰۲		۱۹۰	۱۲۰
	۱۷۸	۲۲۰	۲۵۰	۱۸۰
	۲۵۴		۲۷۰	۲۷۵
	۳۸۱	۵۰۰	۷۰۰	۴۵۰
	۴۴۵	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰

عرضه ضعیف قطره
- هر قدر در سرعت نازل کمتر شود
- نیازم قدرت و آب سرد کمتر
- درجه خشک شدن کمتر با نازل

جدول (۲) هدایت برش پلاسما بر نولار، نولار در نزل و آلودگی

۹۱
بسمه تعالی

درس تولید مخصوص
روش های پیشرفته ماشینکاری

ماشینکاری به روش پرتو پلاسما Plasma Beam Machining

دکتر مرتضی صادق عمل نیک

دانشگاه تبریز
دانشکده فنی - گروه مهندسی ساخت و تولید
ترم پائیز ۱۳۸۰

ماشینکاری از طریق قوس پلازما (Plasma Beam Machining (PBM))

از ماشینکاری پلازما بیشتر در زمینه های برشکاری انجام می شود. در این

روش در میزگازی تحت فشار که از ترکیب ۸۰٪ آرگون و ۲۰٪ نیتروژن تشکیل

شده است، بین دو الکترود (تنگستن و چدانه) و یا بین تنگستن و عظیم کار (در صورتی که قطعه کار

های پهن باشد) اختلاف پتانسیل حدود ۱۰۰ تا ۲۵۰ ولت ایجاد می کنند. این اختلاف

پتانسیل موجب ایجاد جرقه می شود. این جرقه موجب یونیزه شدن گاز که از بین دو الکترود

عبور می کند می شود. و با فشاری که توسط فنون گاز تأمین می شود جهت ایجاد رانش جهت قطعه کار

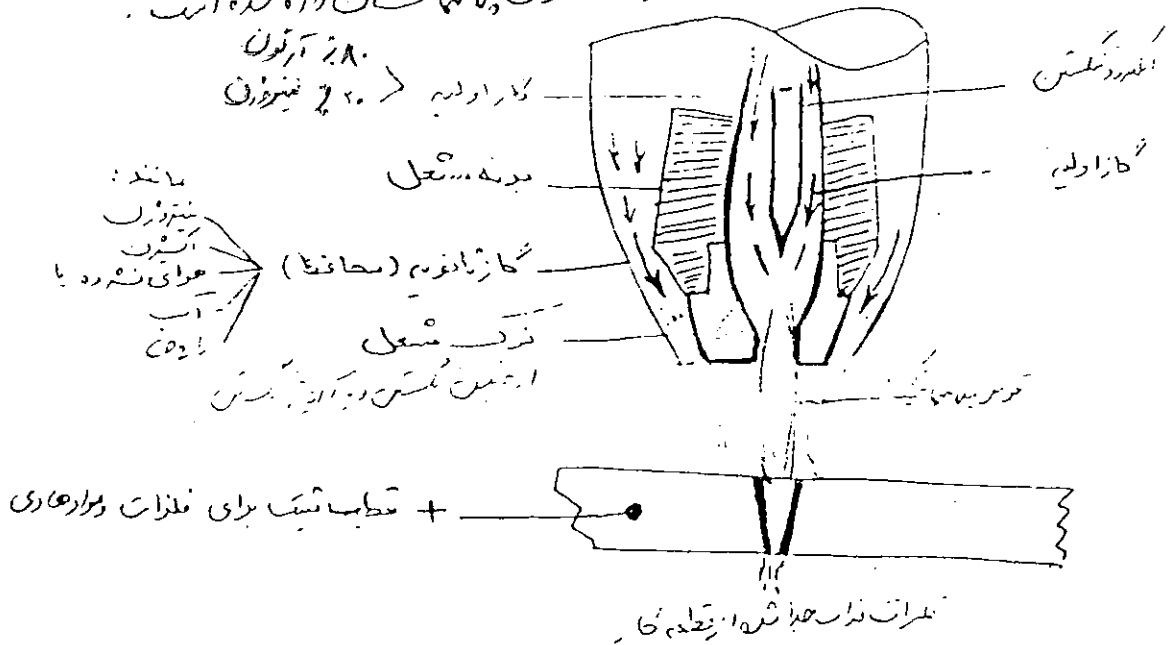
حداست می شود که درجه حرارت آن بین ۱۱۰۰۰ تا ۲۸۰۰۰ درجه سانتیگراد می باشد و در این جرقه نوری

تولید می شود که در الکترود جرقه می زند. در قوس پلازما در منطقه ای محدود و پراکنده از ایجاد می شود. در بهر صورت

زیادتی از دهانه شعاع جهت قطعه کار خارج می شود و قطعه کار را ذوب و برش می دهد. سرعت برشکاری در

این روش زیاد است به قدری که فولاد نرم با ضخامت ۵ میلی متر را می تواند تا سرعت ۳ متر در دقیقه برش دهد.

در شکل زیر شمای کلی ماشینکاری از طریق قوس پلازما نشان داده شده است.



شکل (۱۱) شکل کلی ماشینکاری از طریق قوس پلازما

قوس پلازما ترکیبی از الکترود و تنگستن آزاد، یونهای مثبت و آنیونهای منفی می باشد.

حجت جلوگیری از فرسایش چدانه مشعل از گاز ثانویه مانند نیتروژن، آرگون، هوا گرفته می آید جهت خنک کردن چدانه

فلزات پلازما حد اکثر ۱۰ میلی متر است. در استفاده برای برشکاری های عمیق در چدانه و فولاد از پلازما استفاده شده است.

WV

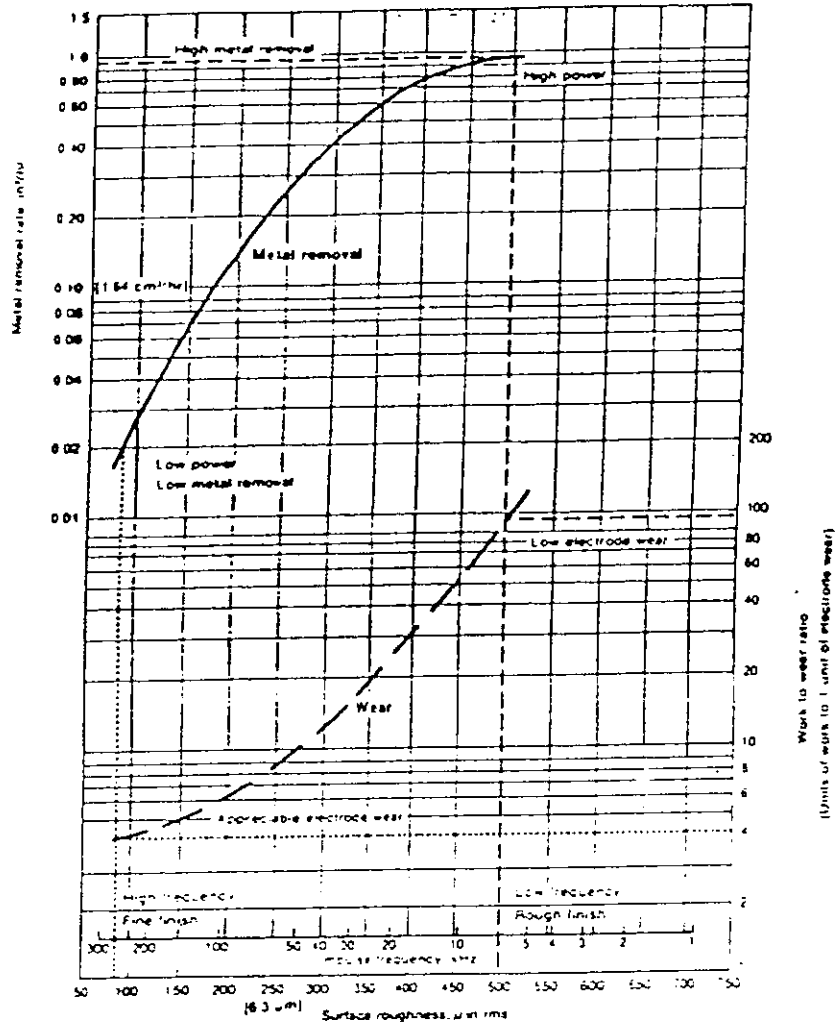
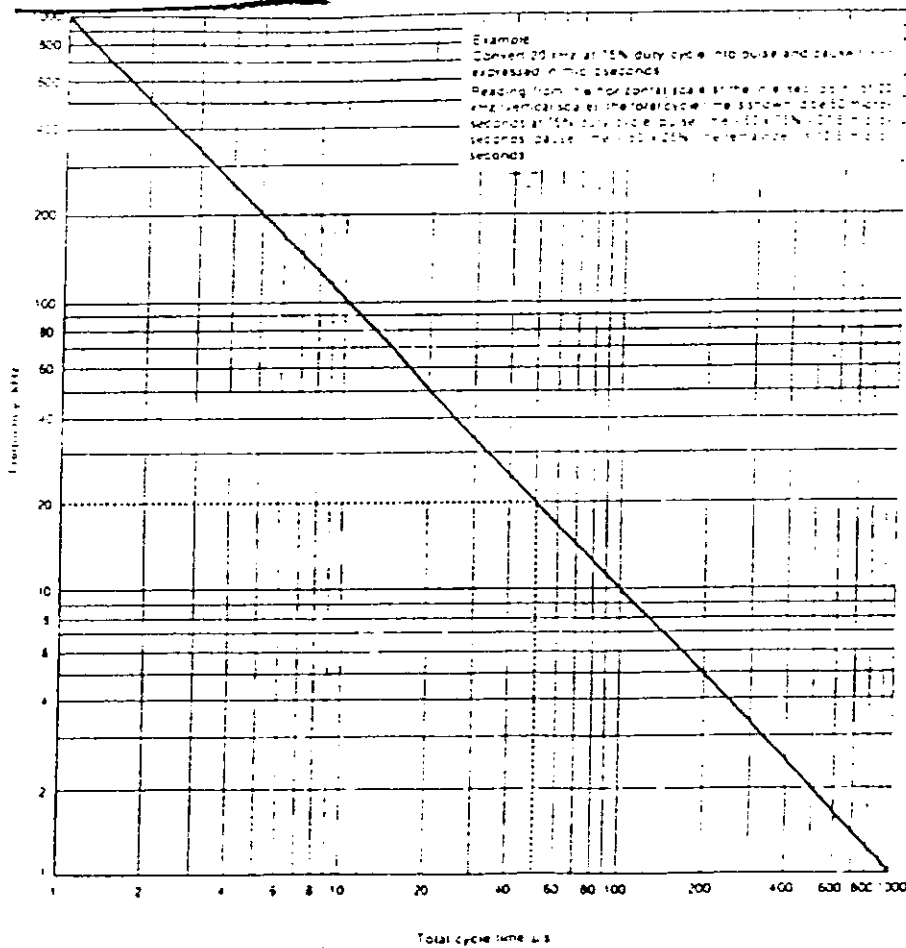
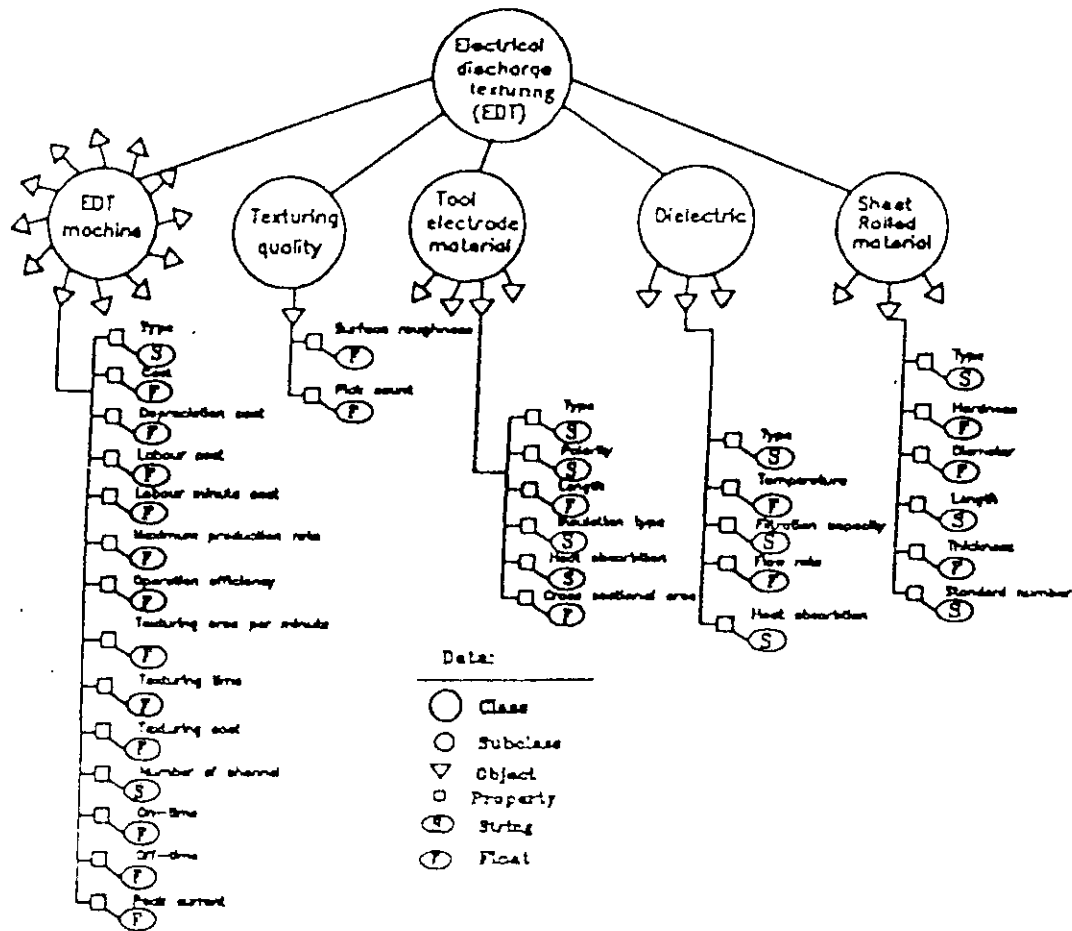


Figure 12-3-6. Interrelationships





F. 4. Object oriented view of the IKBS for EDT

12.5 Electrical Discharge Wire Cutting—EDWC

TABLE 12.5-2 — Continued

WIRE DIAMETER in (mm)	WORK THICKNESS, in (mm)	CUTTING WIDTH, S in (mm)	SURFACE ROUGHNESS, R_a (75-Point Height), μ m	REMOVAL RATE, % (cm ³ /min)
0.004 (0.1)	0.08 to 0.80 (2 to 20)	0.005 (0.2)	8 to 12 (0.2 to 0.3)	0.0100 (0.07)
0.006 (0.15)	0.04 to 2.0 (2 to 50)	0.0078 (0.2)	14 to 20 (0.35 to 0.5)	0.0106 (0.20)
0.008 (0.2)	0.04 to 3.0 (2 to 75)	0.0102 (0.25)	14 to 20 (0.35 to 0.5)	0.0106 (0.20)
0.010 (0.25)	0.4 to 5.0 (10 to 125)	0.0134 (0.34)	14 to 20 (0.35 to 0.5)	0.0106 (0.20)
0.012 (0.3)	0.2 to 6.0 (5 to 150)	0.0149 (0.38)	14 to 20 (0.35 to 0.5)	0.0106 (0.20)
0.016 (0.4)	0.04 to 1.6 (2 to 40)	0.0126 (0.32)	14 to 20 (0.35 to 0.5)	0.011 (0.22)

NOTE: Approximate operation conditions for calculating cutting speed, discharge current, and wire feed rate by work thickness (in).

WIRE DIAMETER in (mm)	WORK THICKNESS, in (mm)	CUTTING WIDTH, S in (mm)	SURFACE ROUGHNESS, R_a (75-Point Height), μ m	REMOVAL RATE, % (cm ³ /min)
0.006 (0.15)	0.04 to 1.2 (2 to 30)	0.009 (0.23)	9 to 11 (0.24 to 0.28)	0.011 (0.07)
0.010 (0.25)	0.04 to 2.0 (2 to 50)	0.012 (0.31)	9 to 20 (0.2 to 0.5)	0.018 (0.12)
0.012 (0.3)	0.04 to 1.8 (2 to 40)	0.0139 (0.35)	14 to 24 (0.35 to 0.6)	0.0106 (0.20)
0.016 (0.4)	0.04 to 1.8 (2 to 40)	0.0134 (0.34)	20 to 35 (0.5 to 0.9)	0.093 (0.60)

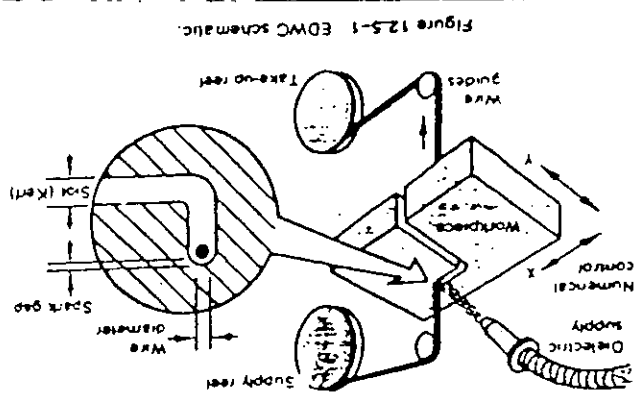
NOTE: Approximate operation conditions for calculating cutting speed, discharge current, and wire feed rate by work thickness (in).

FR

Operating Parameters

TABLE 12.5-1 Typical Values for EDWC Operating Parameters

Power supply 55 to 60 V (open circuit volts to 200) Pulse width controlled 1 to 100 μ s in time Type: or 150 to 200 kHz with 3 kHz boost frequency: 1 to 32 A current	Electrode wire Type: Brass, copper, tungsten, molybdenum diameter: 0.003 to 0.012 inch (0.076 to 0.30 mm); most frequently used size is 0.008 inch [0.2 mm] speed: 0.1 to 6 in/s [2.5 to 150 mm/s]	Dielectric Deionized water, oil, or rarely, air, gas or plain water Overcut (working gap): 0.0008 to 0.0020 inch (0.02 to 0.05 mm); usually 0.001 inch (0.025 mm)
---	---	--



194

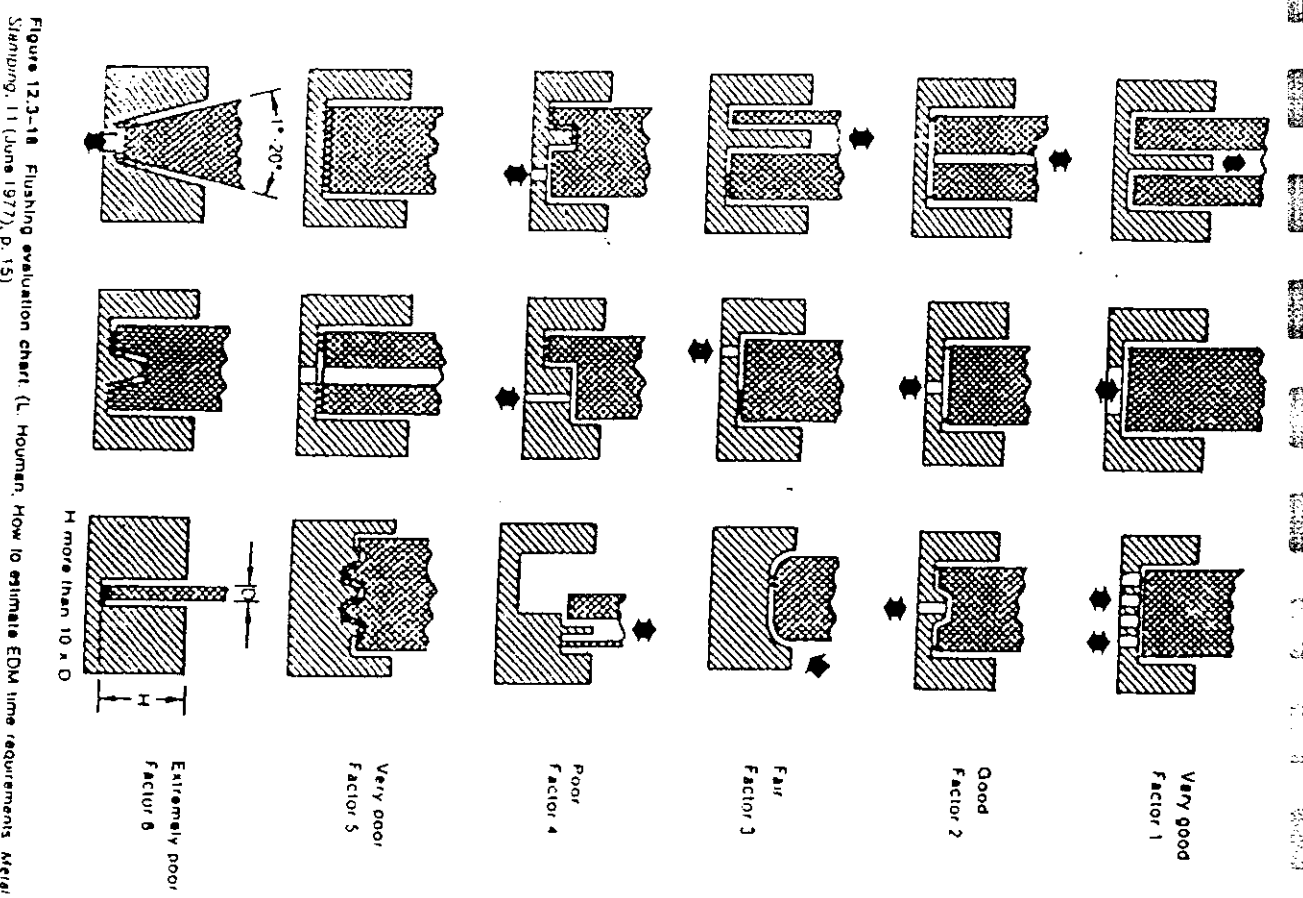
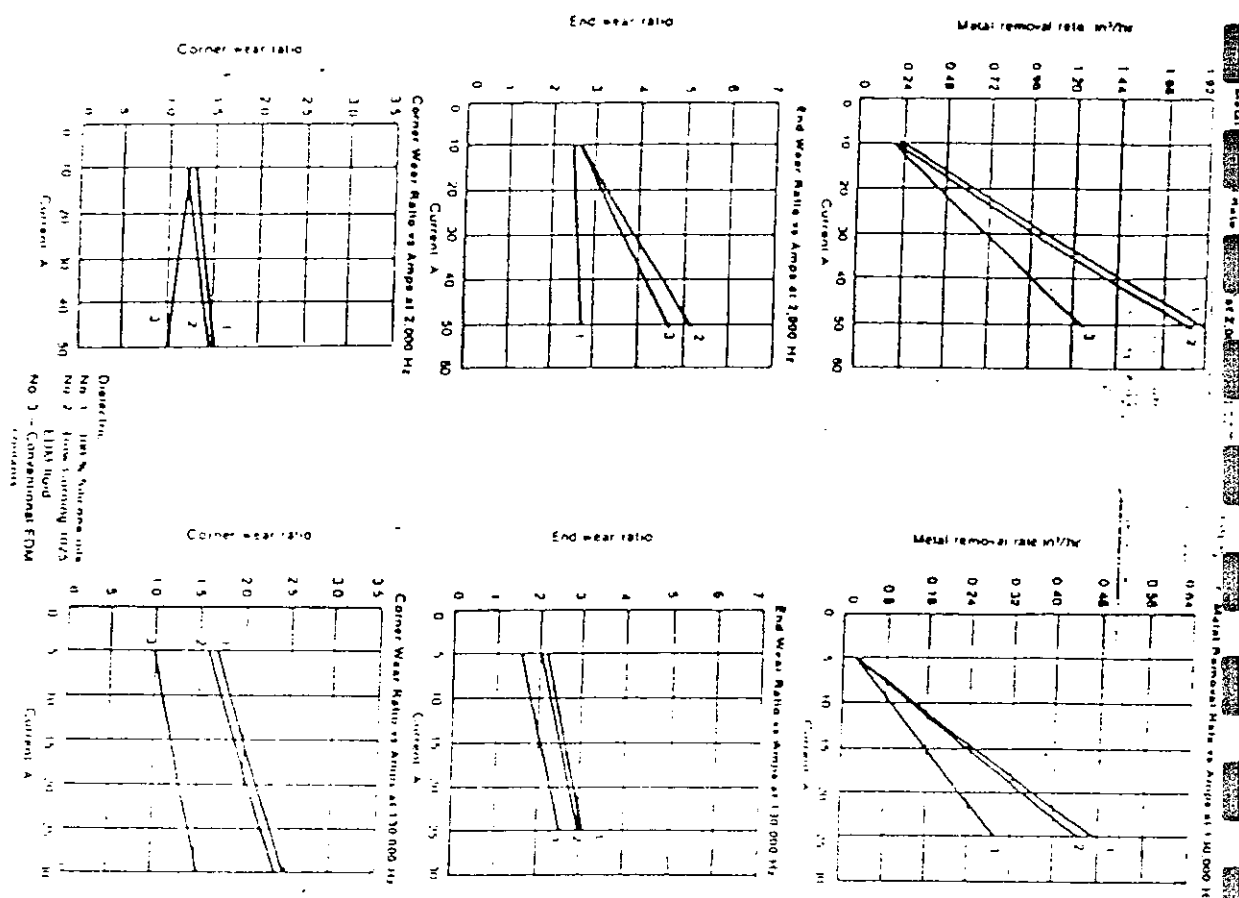


Figure 12.3-18 Flushing evaluation chart. (L. Houtman, How to estimate EDM time requirements, Metal Working, 11 (June 1977), p. 15)

Figure 12.3-17 Effect of dielectric on operating parameters. (Courtesy of Flow Control Co.)

Electrical Discharge Wire Cutting—EDWC 12.5

TABLE 12.5-3 Average Performance Data for EDWC with Molybdenum Wire Electrode

WORKPIECE MATERIAL	WIRE DIAMETER in [mm]	WORK THICKNESS, H in [mm]	CUTTING WIDTH, S in [μm]	SURFACE ROUGHNESS, R _a (Ten-Point Height) μin [μm]	REMOVAL RATE, V _r in ³ /min [cm ³ /min]
Steel-carbon chrome	0.003 [0.08]	0.08 to 0.4 [2 to 10]	0.004 [105]	14 to 22 [0.25 to 0.55]	0.0078 [0.05]
	0.004 [0.1]	0.08 to 0.4 [2 to 10]	0.0049 [125]	18 to 22 [0.47 to 0.55]	0.0109 [0.07]
Ceramide 15% cobalt	0.003 [0.08]	0.08 to 0.5 [2 to 12.7]	0.004 [105]	3 to 9 [0.078 to 0.23]	0.0062 [0.04]
	0.004 [0.1]	0.08 to 0.5 [2 to 12.7]	0.0053 [135]	3 to 9 [0.078 to 0.23]	0.0053 [0.06]

SOURCE: Figure 12.5-3, *Electrical Discharge Machining*, 2nd Edition, by R. K. Jain, Ed., McGraw-Hill, 1988.
NOTE: To calculate cutting speed, divide removal rate (V_r) by work thickness (H).

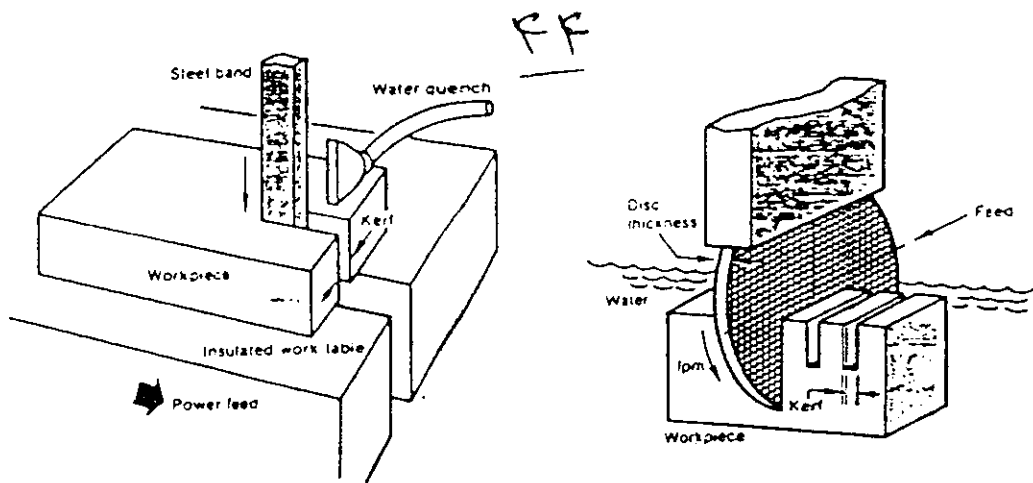


Figure 12.4-1 EDS schematic. Left, band saw; right, disc saw.

Electrical Discharge Sawing—EDS

TABLE 12.4-1 Typical Values for EDS Operating Parameters—Steel Workpieces

OPERATING PARAMETER	BAND EDS	DISC EDS
Power supply type voltage current (varies with thickness):	Direct current 6 to 24 V 400 to 1,500 A	Direct current 18 to 35 V 1,000 to 15,000 A
Fluids frequently sometimes, rarely:	Water Air Water glass (sodium silicate)	Water Air Water glass-silica silicate)
Fluid flow:	5 to 10 gal./min. (20 to 50 L./min.)	Submerged
Speed of band or disc:	5,000 to 6,000 fpm. (1,525 to 1,830 m./min.)	6,000 to 8,000 fpm. (1,830 to 2,440 m./min.)
Thickness of band or disc:	0.005 to 0.030 inch (0.13 to 0.76 mm)	0.025 to 0.20 inch (0.64 to 5.1 mm)
Width of band or disc diameter:	0.5 to 1.25 inch (12.7 to 31.8 mm)	1.0 to 50-inch dia. (25.4 to 1,270 mm dia.)
Wear ratio workpiece-to-band or workpiece-to-disc:	Approx. 3:1	Approx. 10:1
Cutting rates:	5 to 20 in ² /min. (32 to 129 cm ² /min.)	20 to 300 in ² /min. (129 to 1,935 cm ² /min.)
Surface roughness, R _a coarse, high-ampere cutting fine, low-ampere cutting:	400 to 500 μm (10 to 12.5 μm) 250 to 400 μm (6.3 to 10 μm)	400 to 500 μm (10 to 12.5 μm) 250 to 400 μm (6.3 to 10 μm)

TABLE 12.4-2 Circular Arc Saw Cutting Rates

WORK MATERIAL	CUTTING RATE	
	in ² /min	cm ² /min
Aluminum	775	5,000
Tool steel	280	1,800
Stainless steel	263	1,700
Nickel alloys	280	1,800
Cobalt alloys	280	1,800

TABLE 12.3-18—Continued

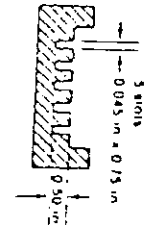
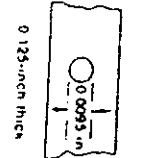
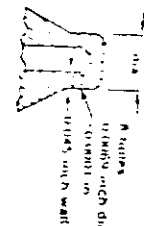
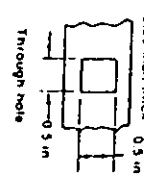
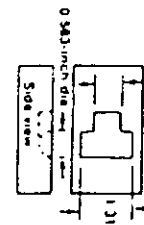
Workpiece configuration	Low Carbon Steel	Cl11 Carbide	7520 Heat-treated Steel
<p>Power supply</p> <p>Electrode material</p> <p>Dielectric type</p> <p>pressure, psi</p> <p>Operation type</p> <p>Capacitance, μF</p> <p>Frequency, kHz</p> <p>Voltage (open circuit), V</p> <p>Current, A</p> <p>Polarity on electrode</p> <p>Material removal rate, in³/hr</p> <p>Cutting time, min sec</p> <p>Surface roughness, $\mu\text{in R}_a$</p> <p>Tolerance, inch</p> <p>Overcut, inch/side</p> <p>Taper, inch/side</p> <p>Corner, radi, inch/side</p> <p>Linear wear ratio end corner</p> <p>Notes:</p>			
	<p>greaseline</p> <p>petroleum oil 10</p> <p>0.25</p> <p>40</p> <p>2</p> <p>negative</p> <p>0.030</p> <p>240.00</p> <p>40</p> <p>±0.001</p> <p>0.0007</p> <p>±0.001</p> <p>One slot per stroke. Electrode reground 3 times per slot. Drill recycling used.</p>	<p>Flox P15 tungsten wire mineral oil 0</p> <p>0.90</p> <p>100</p> <p>0.2</p> <p>negative</p> <p>9 x 10⁻¹</p> <p>5.25</p> <p>0.2</p> <p>16 to 18 minutes</p> <p>±0.001</p> <p>0.0002</p> <p>Automated return</p>	<p>Raychem Cellulose tungsten wire oil</p> <p>0.90</p> <p>100</p> <p>0.2</p> <p>negative</p> <p>9 x 10⁻¹</p> <p>5.25</p> <p>0.2</p> <p>16 to 18 minutes</p> <p>±0.001</p> <p>0.0002</p> <p>Automated return</p>

TABLE 12.3-18—Continued

Workpiece configuration	420 Stainless Steel	01 Tool Steel	
<p>Power supply</p> <p>Electrode material</p> <p>Dielectric type</p> <p>pressure, psi</p> <p>Operation type</p> <p>Capacitance, μF</p> <p>Frequency, kHz</p> <p>Voltage (open circuit), V</p> <p>Average current, A</p> <p>Polarity on electrode</p> <p>Material removal rate, in³/hr</p> <p>Cutting time, min sec</p> <p>Surface roughness, $\mu\text{in R}_a$</p> <p>Tolerance, inch</p> <p>Overcut, inch/side</p> <p>Taper, inch/side</p> <p>Corner, radi, inch/side</p> <p>Linear wear ratio end corner</p> <p>Notes</p>			
	<p>grapple</p> <p>oil</p> <p>24</p> <p>16</p> <p>25</p> <p>negative</p> <p>0.40</p> <p>210 to 270</p> <p>170 to 210</p> <p>210 to 240</p> <p>200 to 230</p> <p>156.00</p> <p>48.00</p> <p>24</p> <p>1%</p> <p>Ram cycling and pulse flush. One electrode for both roughing and finishing.</p>	<p>brass</p> <p>oil</p> <p>24</p> <p>16</p> <p>25</p> <p>negative</p> <p>0.34</p> <p>170 to 210</p> <p>170 to 210</p> <p>210 to 240</p> <p>200 to 230</p> <p>156.00</p> <p>48.00</p> <p>24</p> <p>1%</p> <p>Ram cycling and pulse flush. One electrode for both roughing and finishing.</p>	<p>copper</p> <p>oil</p> <p>24</p> <p>16</p> <p>25</p> <p>negative</p> <p>0.36</p> <p>210 to 240</p> <p>210 to 240</p> <p>200 to 230</p> <p>156.00</p> <p>48.00</p> <p>24</p> <p>1%</p> <p>Ram cycling and pulse flush. One electrode for both roughing and finishing.</p>

Recast depth, thousandths inch

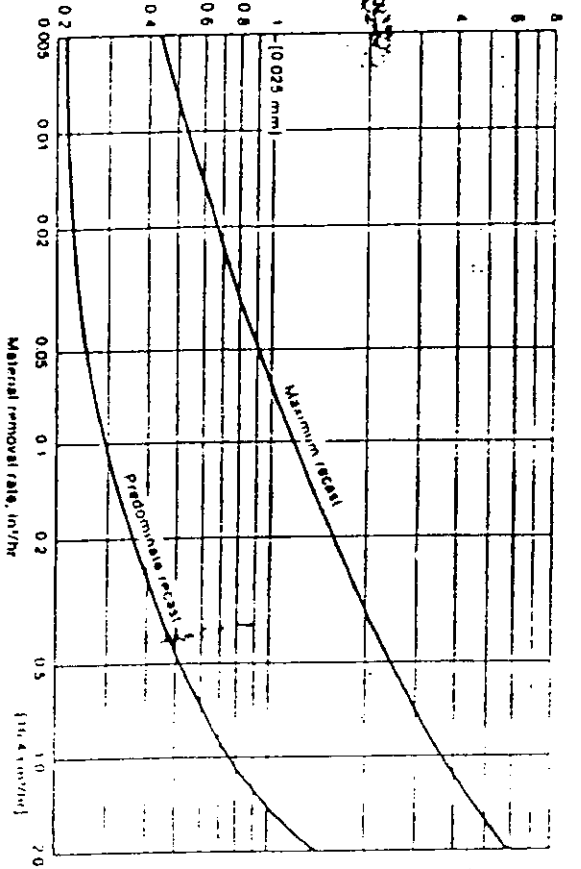


Figure 12.3-21 Length of recast versus process intensity (material removal rate) for [1/2] of a variety of materials (Modified from G. Bellows, p. 10)

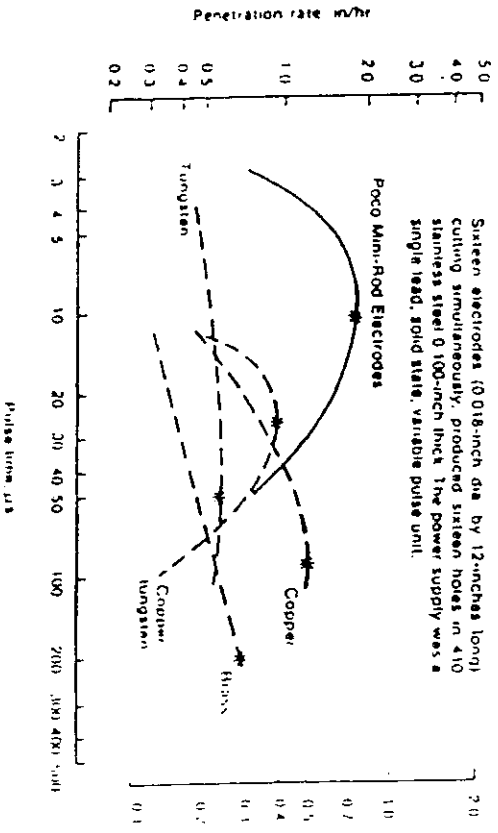
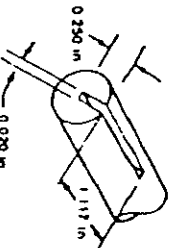
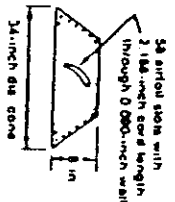
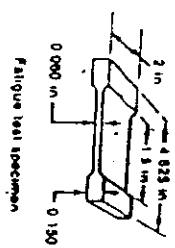


Figure 12.3-22 EDM drilling performance data for various electrode materials. (Courtesy of Parco Graphite, Inc)

TABLE 12.3-16 Specific Applications Data for Electrical Discharge Machining

Work material: Workpiece configuration:	Work material: Rene 80, STA	Work material: Hastelloy Alloy X	Work material: A6 Steel, 50 R,
Power supply: Elox HPRI04	Elox HPRI04	Ingersoll Special	Hanveco SM-1508
Electrode material: Copper (rolling wheel)	Copper (rolling wheel)	Copper punching (used once)	Graphite rolling disc
Dielectric type: Teasco 489	Teasco 489	Elokal 13 oil	Hanveco SM-1508
Pressure (psi): 11	0	submerged	Spray flushing Hanveco SE-290 oil
Operation type: roughing	finishing		roughing
Capacitance (μF): 2	0	30	finishing
Frequency, kHz: 16	250	6	10 (70% on)
Voltage (open circuit), V: 80	70	4	40
Average current, A: 4 to 5	1	25 to 30	4
Polarity on electrode: negative	negative	negative	positive
Material removal rate, m³/hr: 0.1	0.4		0.2
Cutting time min/sec: Surface roughness, μm R _a :	205 ±0.001	no burrs ±0.002	24.00 9.00
Tolerance, inch: Overall, inch/side: Taper, inch/side: Gunnar fall, inch/side: Linear wear ratio end: Conifer:	±0.001 ±0.001	no burrs ±0.002	0.003 0.0005
Notes:	45 strokes/min reciprocation.	15:1 by volume 4 electrodes simultaneously, Automatic index.	<1% 0.002



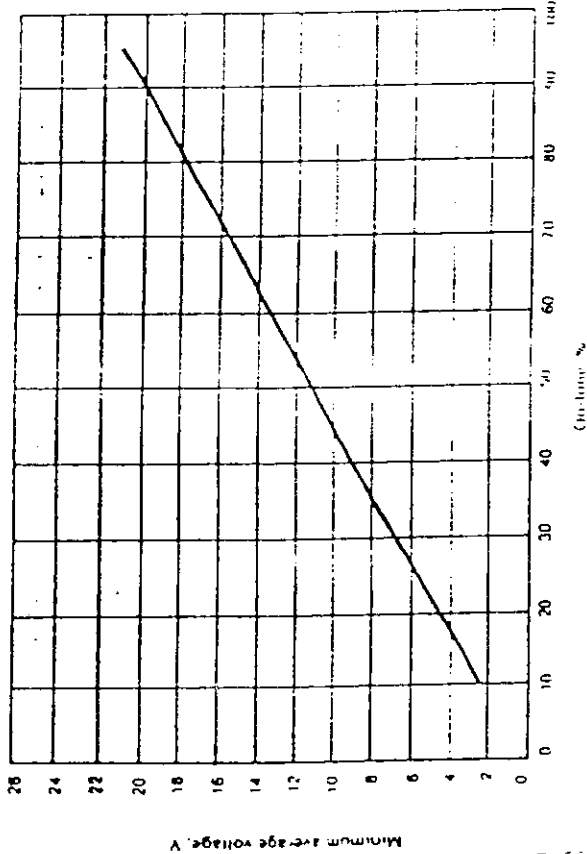


Figure 12.3-20 Voltage setting for EDM (Courtesy of Hansveit Engineering, Inc.)

TABLE 12.3-13 Electrode Manufacturing Methods

- Conventional machining from solid stock (mill, drill, turn, etc)
- Cut-off from bar stock (rounds, squares, shapes, extrusions)
- Tracer milling from plaster master
- Punching
- Total form machining (TFM, see section 12.3.6)
- Electroforming
- Casting (die investment, plaster)
- Hotelling (brass)
- Molding (cold powder metal)
- Pressing (forging, spinning)
- Etching
- Electrode discharge with cutting fluid (see section 12.3.5)

TABLE 12.3-14 Typical Equipment and Conditions for Machining Graphite

EQUIPMENT	ECONOMICAL TOLERANCES* (varying with size and volume)		SURFACE ROUGHNESS R _a	TOOL TYPE	MACHINE SETTINGS Tool Speed ft/min	FEED RATE
	in	mm				
Band saw	0.08 to 0.19	350 to 600	125*	0.8 inch (12.7 mm) blade width—4 teeth/inch (6.3 mm/pitch) Thickness 0.06 in (1.5 mm)	5,000	Feed by hand
36-grit silicon wheel	0.03 to 0.08	125*	125*	Radius tungsten-carbide tipped tools	7,000	Feed by hand
Lathe	0.003 to 0.125	80 to 250	80 to 250	Tungsten carbide	850	0.008 to 0.018 inch (0.2 to 0.5 mm)
Drill	0.003 to 0.016	300 to 400	300 to 400	Fly cutter with 2 tungsten-carbide bits, 8-inch (130 mm) diameter	1,900	Feed by hand
Mill	0.003 to 0.08	120 to 300	120 to 300	Tungsten-carbide reamer	1,100	9 to 60 in/min (0.2 to 1.5 m/min)
Reamer	0.007 to 0.005	35 to 85	35 to 85	400 to 800 grit	80	0.01 in (0.25 mm) cut force necessary
Hone	0.003 to 0.003	20 to 32	20 to 32	No. 320 or higher grit aluminum oxide wheels	200	
Lapping machine	0.001 to 0.003	15 to 30	15 to 30			

SOURCE: Avco Spear, St. Marys, PA

NOTE: Graphite is readily machinable and can be machined using normal metalworking equipment. Power requirements for machining graphite is normally about half that required for steel. Good dust collection equipment is a "must" when machining graphite, since large quantities of abrasive dust that are generated will cause wear to the moving parts of machinery. Graphite is a brittle material and requires good-quality tools with sharp cutting edges to maintain tolerances. Sharp internal corners should be avoided if possible since these set up stress points that can cause cracking.

*Feed tolerances can be maintained by carefully controlling operations when only a few parts are being machined. Lower surface roughness values can be obtained by using finer-grit wheels.

TABLE 12.3-15 Optimum Machining Parameters Used To Compare Mini-Rod™ Electrodes with Metallic Electrodes

ELECTRODE MATERIAL	ELECTRODE POLARITY	PEAK CURRENT A	PULSE/PAUSE TIME μs	FREQUENCY kHz	DUTY CYCLE percentage	GAP VOLTAGE V
Poco Mini-Rod™ B-33	Negative	12.5	12/100	0.93	11	30
Copper	Negative	25.0	200/800	1.00	20	50
Copper-tungsten	Positive	25.0	100/800	1.11	11	50
Tungsten	Positive	25.0	25/100	0.80	20	50
			50/1800	0.80	1	50

SOURCE: Poco-graphite Inc., Liberator, TX

TABLE 12.3-11 Flushing Techniques Used in EDM

- Flow over workpiece cutting area*
- Submerge work in tank
- Pressure through electrode or workpiece
- Suction through electrode or workpiece—or both pressure and suction
- Ram cycling
- Vibration on workpiece
- Invert cavity (workpiece on ram)

*Careful velocity check recommended

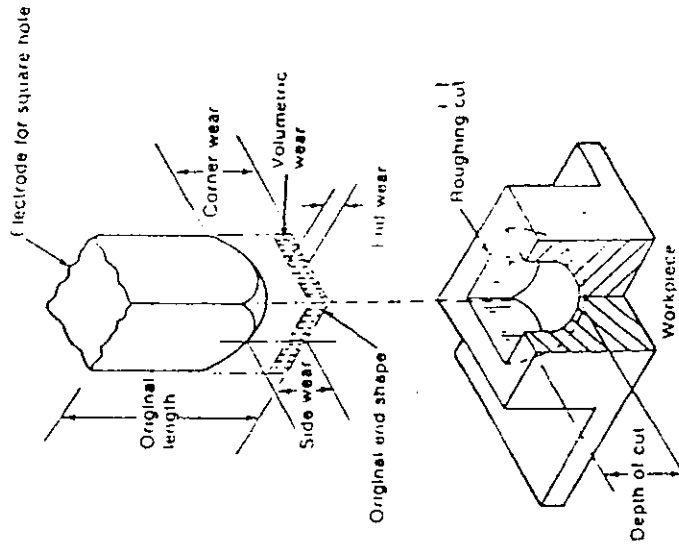


Figure 12.3-18 Types of electrode wear in EDM. (Modified from H. W. Yankee, *Mach. Manuf. Processes*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1979, p. 311)

TABLE 12.3-12 Electrode Wear Ratio Chart

PART 1			
ELECTRODE MATERIAL	WORKPIECE MATERIAL	POLARITY ON ELECTRODE	WEAR RATIO* percentage
Aluminum	Steel	Positive	700
Brass	Brass	Negative	50
Brass	Carbide	Negative	700
Brass	Steel	Negative	200
Brass	Tungsten	Negative	700
Brass	Carbide	Negative	150
Copper	Steel	Negative	200
Copper-tungsten	Carbide	Negative	150
Copper-tungsten	Copper-tungsten	Negative	150
Copper-tungsten	Steel	Positive	30
Copper-tungsten	Tungsten	Negative	30
Zinc-tin	Steel	Negative	75
Graphite	Steel	Negative	500
Graphite	Carbide	Negative	50
Silver-tungsten	Steel	Negative	150 (with caution)
Steel	Steel	Negative	20
Graphite	Steel	Positive	150
Copper	Steel	Positive	<1
Copper	Steel	Positive	<1
PART 2			
ELECTRODE MATERIAL	WORKPIECE MATERIAL	POLARITY ON ELECTRODE	ELECTRODE CORNER WEAR* percentage
Graphite	Steel	Positive	<1
Graphite	Steel	Negative	30
Graphite	Inconel alloy 718	Positive	<1
Graphite	Inconel alloy 718	Negative	35
Graphite	Aluminum	Positive	<1
Graphite	Aluminum	Negative	15
Graphite	Copper	Negative	40
Graphite	Carbide	Negative	62
Graphite	Carbide	Positive	50
Graphite	Steel	Negative	<1
Graphite	Copper	Negative	40
Graphite	Copper	Positive	40
Graphite	Aluminum	Negative	<1
Graphite	Aluminum	Positive	6
Graphite	Steel	Negative	40
Graphite	Graphite	Negative	36
Graphite	Copper-tungsten	Negative	60
Graphite	Copper-tungsten	Positive	70
Graphite	Graphite	Negative	40
Graphite	Carbide	Negative	100
Graphite	Steel	Negative	500
Graphite	Carbide	Negative	100
Graphite	Steel	Positive or Negative	100

SOURCE: Part 1, Harvett Engineering, Inc., Urbana, IL; Part 2, Electrode Wear, Call Industries, Davidson, NC

*near corner wear ratio = $\frac{\text{electrode length}}{\text{workpiece length}}$
 in the total wear ratio to figure provides length of electrode required for a finished length (depth) of workpiece

*Life-time wear (same mode).
 Wear ratios are for 90° corner. Less than 1% electrode wear is achieved between 45 and 50 microseconds on-time with copper and 250 to 350 microseconds on-time with graphite. Settings vary with electrode material.

TK

12.3 Electrical Discharge Machining—EDM WA

TABLE 12-3-4 Selection of EDM Electrode Material

ELECTRODE MATERIAL	GUIDE-LINES See Footnote	FORM	CORNER WEAR RATIO IN FINISHING	END WEAR RATIO IN ROUGHING	RELATIVE COST	MACHINABILITY RATING	RECOMMENDED USES	USES NOT RECOMMENDED
Graphite	1	sticks, rod, tube, bar	5:1	to 100:1	low	excellent	tooling	
Copper	2	bar, rod, sheet, wire, tube, forgings, turnings	1:1	2:1	medium	good	holes, slots	high accuracy and detail
Copper-graphite	3	sticks, rods	2:1	4:1	medium	fine	general purpose	
Brass	4	same as copper	8:1	1:1	low	good	holes and cavity sinking	high accuracy
Zinc alloys	5	cast or casting	8:1	2:1	low	good	forging die cavities	holes
Steel	6	as forgings	1:1	2:1	low	excellent	through holes	carbides
Copper-tungsten	7	bar, flats, sheet, rods, wire, tube	2:1	8:1	medium	fair	slots, carbides	large areas
Silver-tungsten	8	annealed	8:1	12:1	high	fair	small slots, holes and intricate details	large areas
Tungsten	9	wire, rod, ribbon	5:1	10:1	high	poor	small holes	irregular holes

NOTES

- GRAPHITE permits fast EDM rates and low wear rate, is easy to machine, and offers excellent geometry. Surface roughness produced on the workpiece is related to graphite surface size and density. Rotating graphite electrodes can produce roughness values less than 40 micro-inches R_a (10 μm). A number of different grades are available. Easily attached to tool holder with conductive cement. Offers good electric flow conditions.
- COPPER produces the freshest and is excellent for low-wear EDM. Easily machined or coined. Low wear rates.
- COPPER-GRAPHITE has best characteristics of both materials—high conductivity and strength than graphite and wire cut under poor flushing.
- BRASS has a higher wear rate than copper but can be economically machined for many operations. Not recommended for EDM of complex carbide.
- ZINC-ALLOYS are used for high production where high electrical conductivities are needed because they are easily cast in the mold.
- CAN BE PRESSURE-CAST AND COINED TO AN EXACTING CAVITY. COPPER SLIGHTLY IMPROVED MORE READILY THAN MACHINING. AVAILABLE BY REMELTING. NOT RECOMMENDED FOR FINE DETAIL. USUALLY HAS POOR WEAR RATE.
- STEEL gives slow stock removal rates. Applications when doing parting-line machining. Greater heat affected zones. Readily machined but wear rate unsatisfactory for some types of steel.
- COPPER-TUNGSTEN has good wear and finish characteristics. Can be brazed and has good rigidity. Used for close tolerances, fine detail, and low wear. Used on carbides. Used in slotting operations. Metal removal rates are lower than graphite and the cost is higher. Use positive polarity on electrode when machining steels. Ground Cu-W electrodes are available for complex shapes or repetitive production.
- SILVER-TUNGSTEN resists corner wear. Good for accurate detail or intricate. Provides low wear and faster removal rates than copper-tungsten. Is more expensive and generally suited to machining intricate carbide dies.
- TUNGSTEN has high rigidity which makes it excellent for EDM of holes under 0.010 inch (0.25 mm) diameter. High cost but good wear rate.

TABLE 12-3-7 Trade-off Conditions Among EDM Parameters

SITUATION A	SITUATION B
High material removal rates	Low material removal rates
Low surface roughness	High surface roughness
Low frequency (long cycle time)	High frequency (short cycle time)
High energy per impulse	Low energy per impulse
Large and deep	Small and shallow
High current	Low current
High electrode wear	Low electrode wear

TABLE 12-3-8 EDM Polarity and Open Circuit Voltage Guidelines

ITEM	ELECTRODE (TOOL) POLARITY*		OPEN CIRCUIT VOLTAGE V
	Negative	Positive	
Material removal rate	Medium to high	Medium to low	
Workpiece wear	Low to medium	High to no wear	
Surface roughness	Good to poor	Good to excellent	
Size of other materials	Good (depends on other parameters)	Good (depends on other parameters)	
WORKPIECE MATERIAL	ELECTRODE MATERIAL	ELECTRODE POLARITY*	OPEN CIRCUIT VOLTAGE V
Steel	Steel	Positive	Up to 270
Steel	WC	Positive	Up to 100
Steel	3-Axis	Positive	Up to 100
Steel	Cu	Positive	Up to 150
Steel	Cu	Negative	Up to 270
Copper	WC	Positive	Up to 100
Copper	Cu	Negative	Up to 100
Carbides	WC	Negative	Up to 270

NOTE: These guidelines are subject to change depending upon power pack characteristics and energy needed to attain desired average cut rates and cutting area.

* Normal or "standard" polarity is usually considered to be positive on the workpiece and negative on the electrode tool. However, since the advent of lead plane carbide dies (1970), some shops have reversed the polarity for some materials where better wear ratios have been experienced.

** No wear. EDM is the logical combination of opposing parameters that on some workpiece material-electrode material combinations yield wear ratios 100:1 or better. See Table 12-3-12.

Figure 12.3-8 Data for Poco EDM-1 electrode (negative polarity) cutting tool steel surface roughness, μ in rms

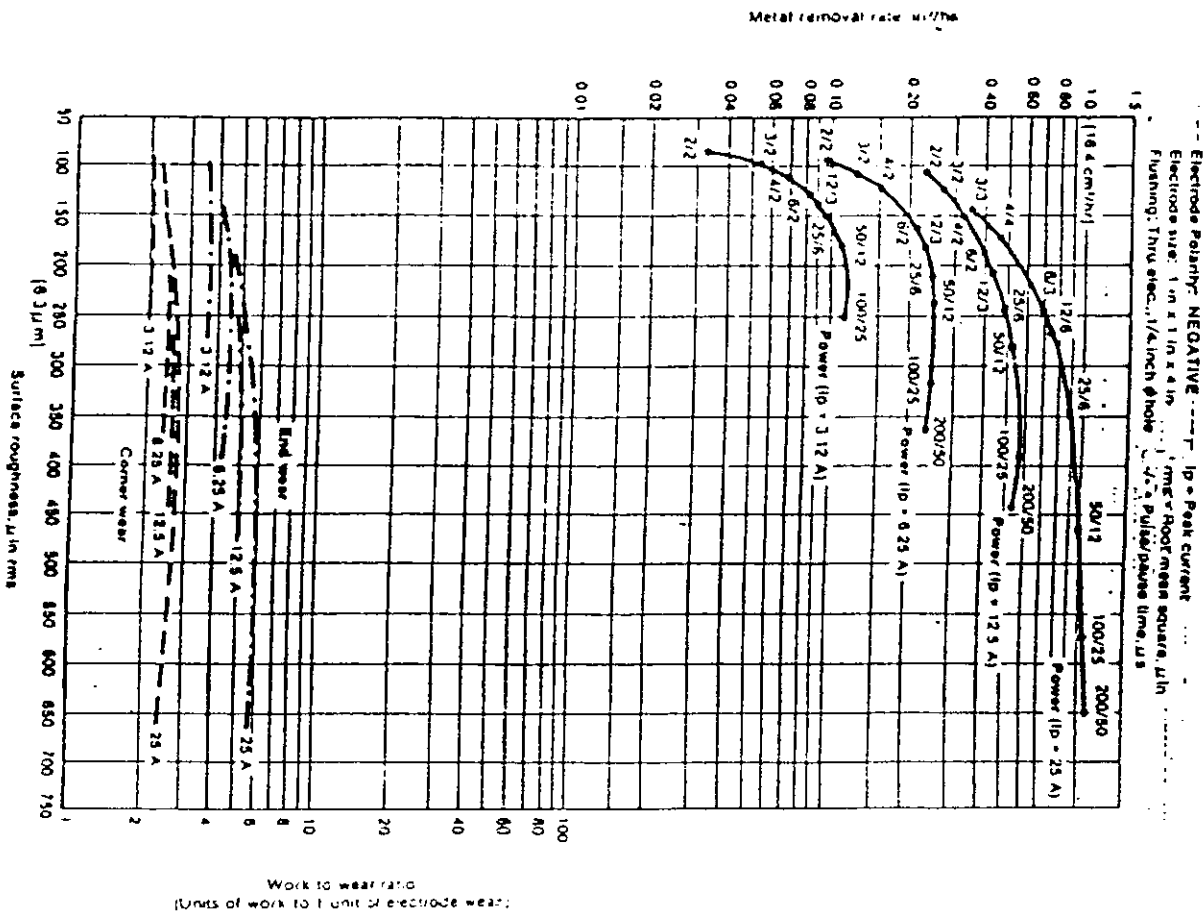
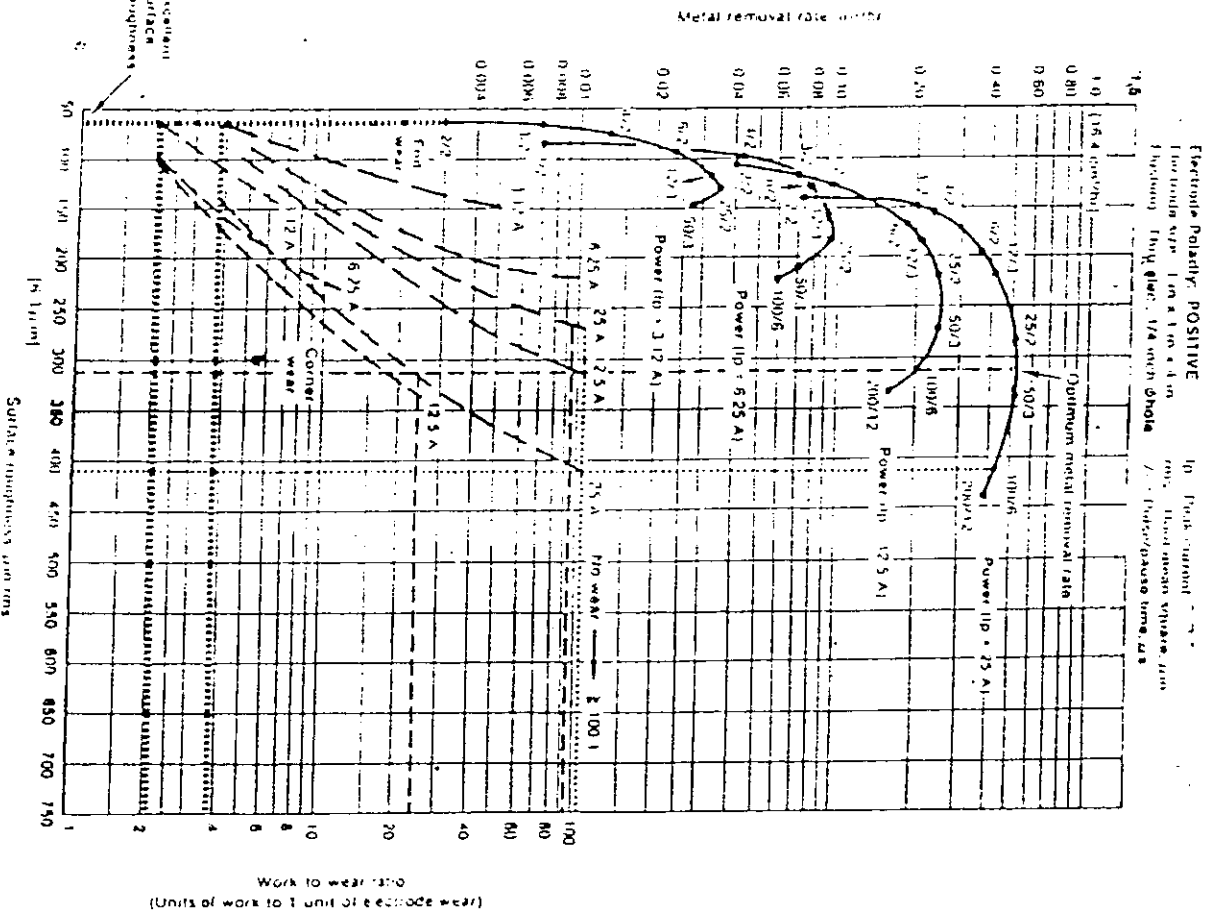
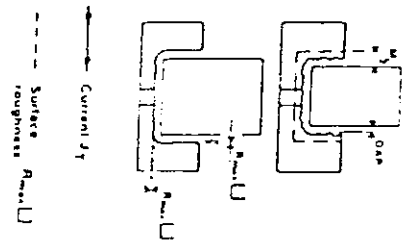
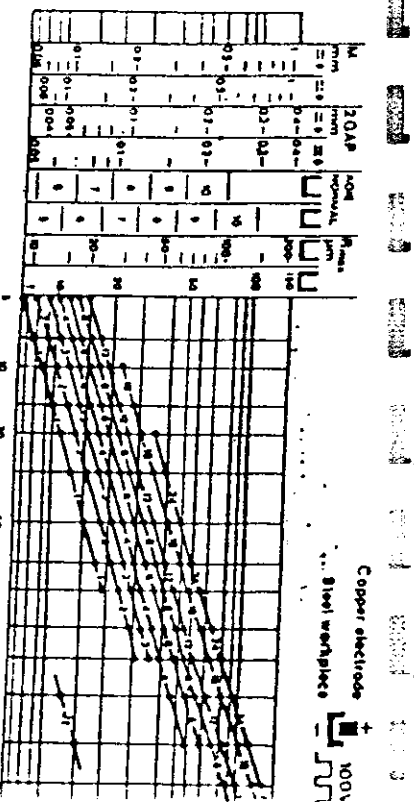
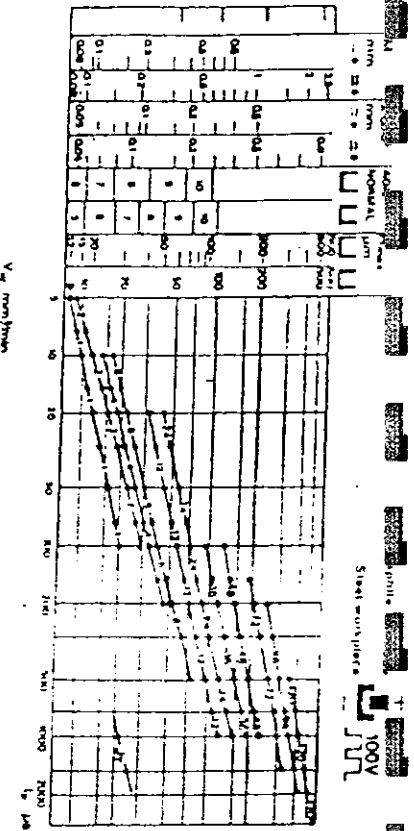
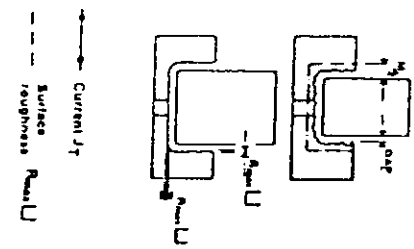
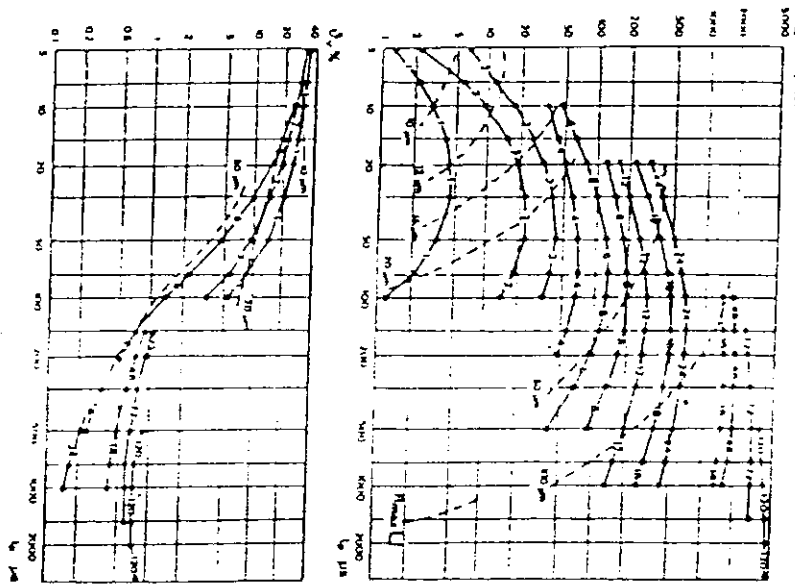


Figure 12.3-9 Data for Poco EDM-1 electrode (positive polarity) cutting tool steel surface roughness, μ in rms





Jt Current amplitude Switch Jt Jp Jk
I Jt 1.2A
t (pulse) Impulse duration, Switch Ius
Vw Rate of erosion, mm³/min
δv Volumetric wear, %
Rmax Max Peak-to-Valley Roughness height, μm
GAP Spark gap, mm
M Undersize, mm
Test conditions according to VSM 37550



Jt Current amplitude Switch Jt Jp Jk
I Jt 1.2A
t (pulse) Impulse duration, Switch Ius
Vw Rate of erosion, mm³/min
δv Volumetric wear, %
Rmax Max Peak-to-Valley Roughness height, μm
GAP Spark gap, mm
M Undersize, mm
Test conditions according to VSM 37550

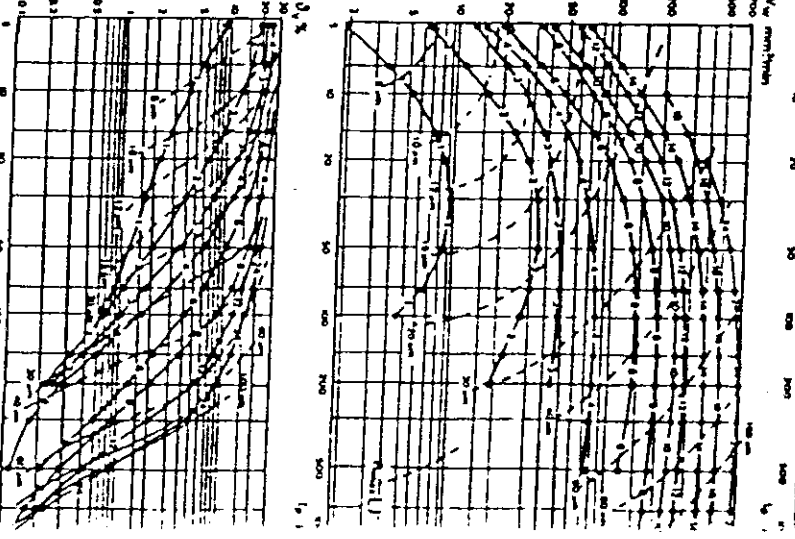


Figure 12.3-13 Parameter selection for EDM. (Courtesy of Agieptron Corporation)

Figure 12.3-14 Parameter selection for EDM. (Courtesy of Agieptron Corporation)

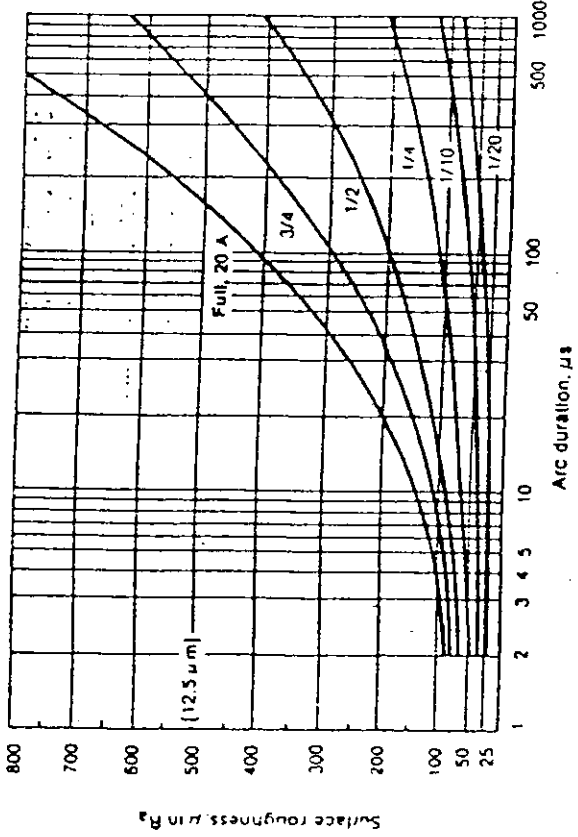


Figure 12.3-10 Surface roughness versus arc duration at various currents for EDM of steel with graphite electrodes. (Courtesy of Hansvedt Engineering, Inc.)

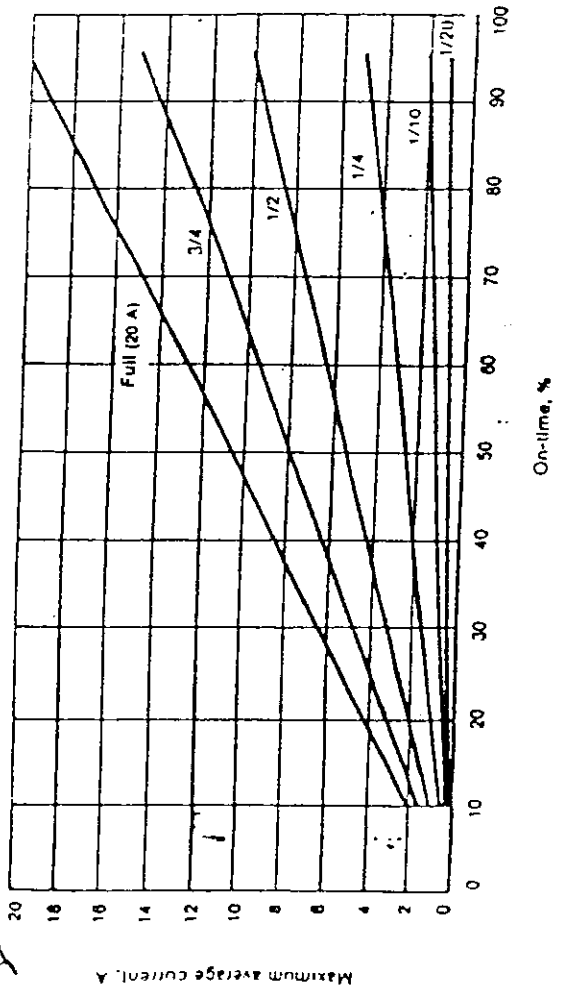


Figure 12.3-11 Maximum average current versus percent age of on-time for EDM of steel with graphite electrodes. (Courtesy of Hansvedt Engineering, Inc.)

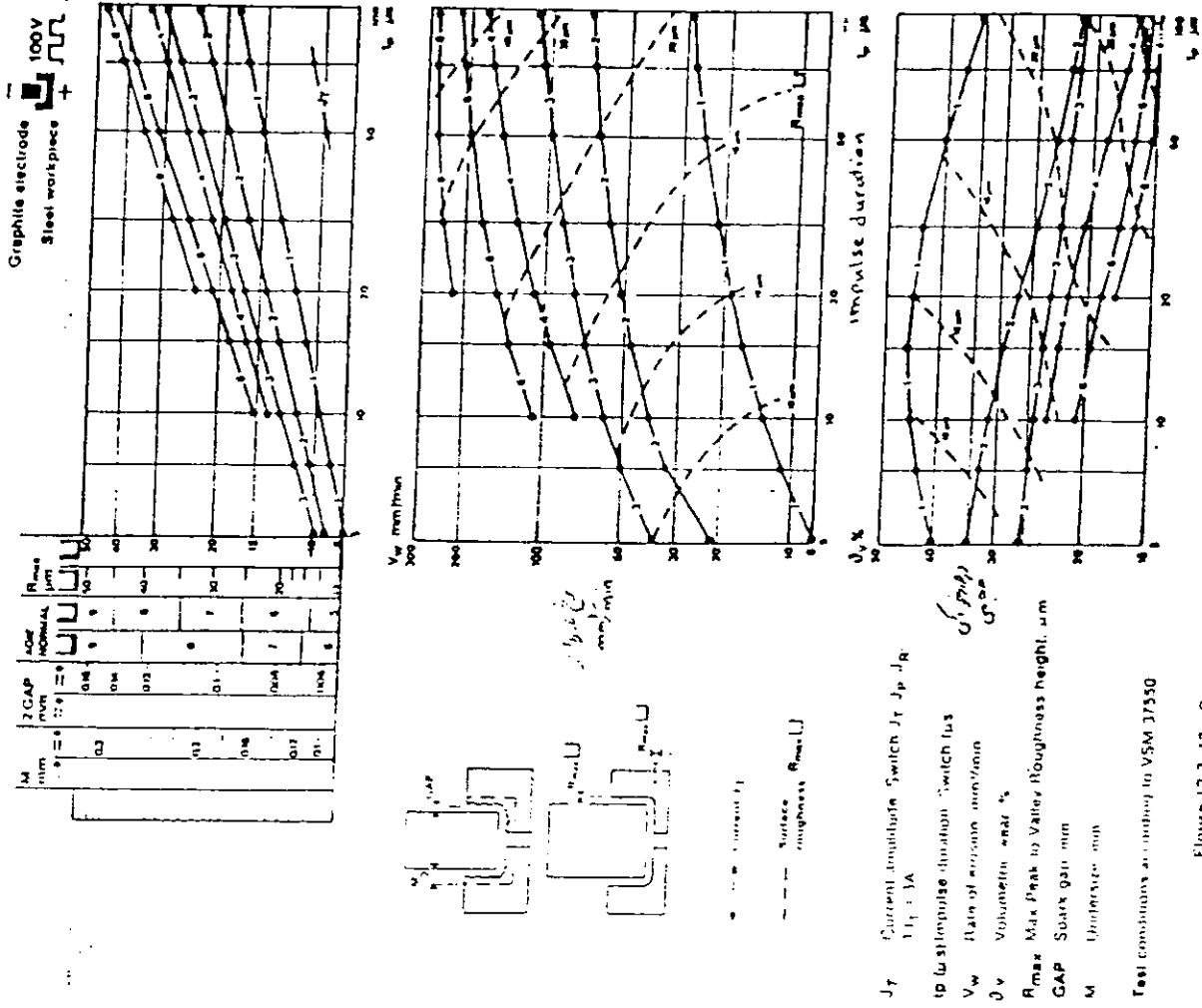


Figure 12.3-12 Parameter selection for EDM. (Courtesy of Agertion Corporation)

۴۵

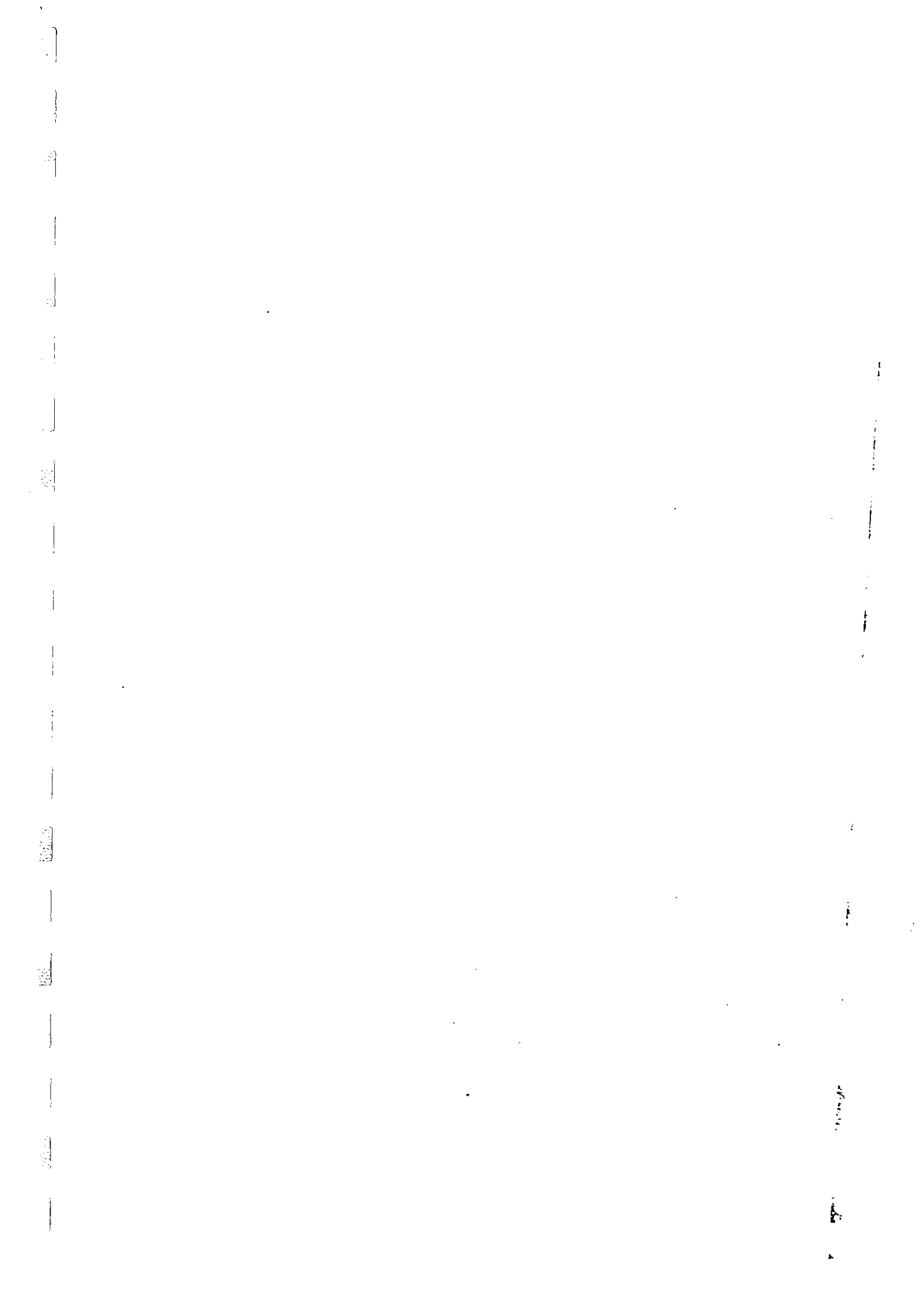
بسمه تعالی

درس تولید مخصوص
روش های پیشرفته ماشینکاری

ماشینکاری به روش پرتو لیزر Laser Beam Machining

دکتر مرتضی صادق عمل نیک

دانشگاه تبریز
دانشکده فنی - گروه مهندسی ساخت و تولید
ترم پائیز ۱۳۸۰



13.1 Chemical Machining—CHM

TABLE 13.1-12—Continued

MATERIAL TYPE	ETCHANT	ETCHANT CONCENTRATION	OPERATING TEMPERATURE		ETCH RATE		MASKANT	ETCH FACTOR*	ROUTINE DEPTH OF CUT TOLERANCE		SURFACE ROUGHNESS	
			°F	°C	mil x 10 ⁻³ /min	mm/min			± in	± mm	μin ft.	μm ft.
Phosphor-bronze Silicon	FeCl ₃	42* (10°)	80	26	0.5	0.013	—	2.0	—	—	—	—
	HF, HNO ₃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	HNO ₃ , H ₂ O	50-90% vol.	120	49	0.5-1.0	0.013-0.025	—	1.0	—	—	—	—
Stainless steel austenitic	FeCl ₃	42* (10°)	130	54	0.6-5.0	0.020-0.120	Polyvinyl chloride	1.5-2.0	0.004	0.1	63	1.6
	(or HCl; HNO ₃) FeCl ₃	42* (10°)	130	54	0.25	0.006	Polyvinyl chloride	—	0.004	0.1	125	3.2
Mild steel	FeCl ₃	32* (0°)	120	49	1.0	0.025	Polyvinyl chloride	2.0	0.002	0.05	63	1.6
Silicon steel	FeCl ₃	32* (0°)	130	54	1.0	0.025	Polyvinyl chloride	1.5-2.0	0.002	0.05	63	1.6
	(or HCl; HNO ₃) FeCl ₃	32* (0°)	130	54	1.0	0.025	Polyvinyl chloride	—	—	—	—	—
Tool steel	HF, HNO ₃	10.5	120	49	0.2-0.5	0.005-0.013	—	—	—	—	—	—
	FeCl ₃	32* (10°)	130	54	1.0	0.025	—	—	—	—	—	—
Tantalum Tin	HF, HNO ₃	10-50% vol.	120	49	0.6-1.5	0.015-0.033	Vinyl polymers	1.0	0.002-0.0035	0.05-0.009	15-100	3.4-2
	(or HF; CrO ₃) FeCl ₃	—	115 ± 10	46 ± 5.6	0.6-1.5	0.015-0.033	Vinyl polymers	1.0	0.002-0.005	0.05-0.13	15-100	0.4-2
Titanium	HF	20% wt.	70	21	—	—	—	—	—	—	—	—
	HF, HNO ₃	2-3% wt.	10	16	—	—	—	—	—	—	—	—
	(or HF; CrO ₃) K ₂ Fe(CN) ₆ NaOH	30-70% vol.	130	54	—	—	—	—	—	—	—	—
Tungsten	HF, HNO ₃	30-70% vol.	80	27	—	—	—	—	—	—	—	—
	(or HF; CrO ₃) K ₂ Fe(CN) ₆ NaOH	—	115 ± 10	46 ± 5.6	—	—	—	—	—	—	—	—
Uranium Zinc Zirconium	FeCl ₃	1,400 g/L	75	24	0.04	0.031	—	—	—	—	—	—
	HNO ₃	10-15% vol.	120	49	1.0	0.025	—	—	—	—	—	—
	HNO ₃ H ₂ SiF ₆ NH ₄ HF ₂	4.2:1	90	32	1.0	0.015	—	—	—	—	—	—

*The ratio of depth of undercut to depth of cut.

102

Material	Solution	Temperature		Etch Rate		Maskant	Etch Factor*	Routine Depth of Cut Tolerances		Surface Roughness
		°F	°C	in x 10 ⁻³ /min	mil/min			in	mil	
Aluminum and aluminum alloys	FeCl ₃ , NaOH	120	49	0.5-1.0	0.001-0.002	Polymers	1.5-2.0	0.002	40-125	0.1-0.5
Beryllium	NH ₄ HF, FeCl ₃	80	27	0.4-0.6	0.005	Polymers	-	0.001-0.003	1.1	0.2
Brass/Bronze	32°Be	120	49	1.0	0.01	-	-	0.001	0.001	0.5
Chromium	K ₂ Fe(CN) ₆ , HCl	-	-	0.5	0.01	-	-	-	-	-
Cobalt alloys	HNO ₃ , HCl, FeCl ₃	140	60	0.4-1.5	0.010-0.030	-	-	-	-	-
Columbium	HNO ₃ , HF, H ₂ O	Ambient	Ambient	0.5-1.0	0.013-0.025	-	-	-	10-150	1.0-1.5
Copper	FeCl ₃ , CuCl ₂	120	49	2.0	0.650	-	-	0.001	-	-
Gold	32°Be, 42°Be	120	49	1.2	0.30	-	-	0.003	-	-
	HCl/HNO ₃ , KI ₂ /H ₂ O	100	38	1.0-2.0	0.005-0.010	-	-	1.0	-	-
	75 lb/25 lb, 15 gal	100	38	1.0-2.0	0.005-0.010	-	-	1.0	-	-
Inconel	FeCl ₃ , HCl/HNO ₃	130	54	0.5-1.5	0.015	Polymethylene	-	-	-	-
	42°Be, 42°Be	130	54	0.5-1.5	0.015-0.018	Polymethylene	-	-	40-150	1.0-3.0
Indium oxide	HCl/HNO ₃ , FeCl ₃	120	49	0.5-1.0	0.01	Polymers	-	-	40-150	1.0-1.5
Invar	50.5% vol, 42°Be	130	54	-	0.005-0.015	-	-	-	-	-
Kovar	FeCl ₃ , FeCl ₂	130	54	0.75	0.019	Polymers	-	-	-	-
Lead	42°Be, 42°Be	130	54	1.0	0.25	-	-	-	-	-
Magnesium	HNO ₃	90	32	1.0-2.0	0.005-0.050	Polymers	1.0-2.0	0.002	5.0	1.0
Molybdenum	H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , H ₂ O	120	49	1.0	0.25	-	-	-	-	-
	1:1:1	130	54	1.0	0.25	-	-	-	-	-
Nickel, Nimonic	FeCl ₃ , FeCl ₂ , HNO ₃ , HCl	120	49	0.5-1.5	0.013-0.038	Polymethylene	1.0-3.0	0.002	50-150	1.0-1.5
	42°Be	120	49	0.5-1.5	0.013-0.038	Polymethylene	1.0-3.0	0.002	40-150	1.0-1.5

* The ratio of depth of undercut to depth of cut
 † Same specific gravity scale (Be°)

13.1 Chemical Machining—CHM

TABLE 13.1-10 Surface Roughness Achieved by Chemical Milling

MATERIAL	FORM	SURFACE ROUGHNESS AFTER 0.25 to 0.40 mm (0.010 to 0.015 in) REMOVED	
		$\mu\text{m } R_a$	$\mu\text{m } R_z$
Aluminum alloys	Sheet	2.0 to 3.5	80 to 150
	Casting	3.5 to 7.5	150 to 300
	Forging	2.5 to 5.5	100 to 250
Magnesium alloys	Casting	0.75 to 1.5	30 to 55
	Forging		
Steel alloys	Sheet	0.75 to 1.5	30 to 60
	Forging		
Nickel alloys	Sheet	0.75 to 1.0	30 to 40
Titanium alloys	Sheet	0.3 to 0.3	8 to 32
	Casting	0.75 to 1.5	30 to 60
	Forging	0.32 to 1.0	15 to 40
Tungsten	Bar	0.5 to 1.0	20 to 40
Beryllium	Bar	3.8 to 6.4	150 to 250
Tantalum	Sheet	0.25 to 0.5	10 to 20
Columbium	Bar	1.0 to 1.5	40 to 60
Niobium (Columbium)	Sheet	1.0 to 1.5	40 to 60
Molybdenum	Sheet	1.5 to 3.3	60 to 130

SOURCE: W. T. Harris, p. 114.

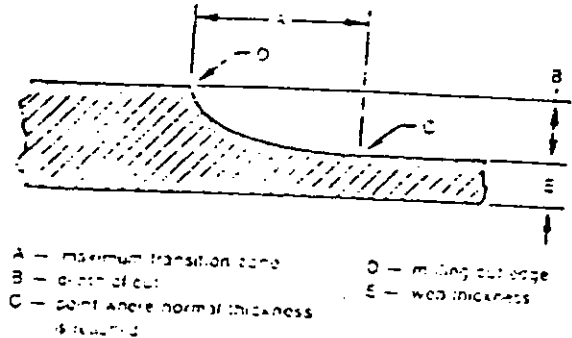
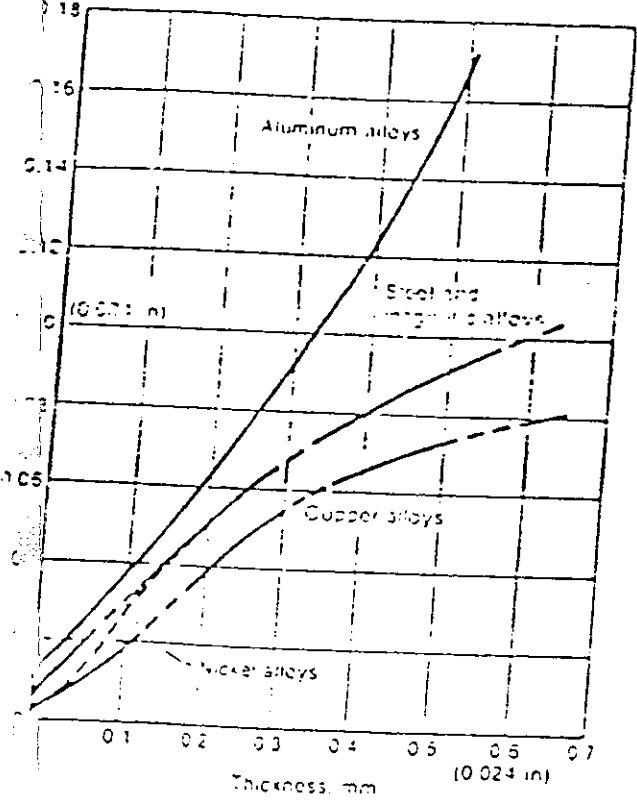
TABLE 13.1-11 Summary of Health Risk Arising from the Commonly Used Etchants

MATERIAL BEING ETCHED	ETCHANT(S)	ETCHANT RISK(S)	FUME RISK(S)
Aluminum alloys	Sodium hydroxide	Splashes on to skin, mouth, or eyes	Fume not dangerous but hydrogen gas is explosive
Magnesium alloys	Sulphuric acid	Splashes on to skin, mouth, or eyes. Additions may cause spattering	Corrosive acidic fume. Hydrogen gas is explosive
Steel/nickel alloys	Hydrochloric, nitric, sulphuric and phosphoric acids	Highly corrosive splashes on to skin, mouth, or eyes	Corrosive and suffocating fume is also toxic
Titanium alloys	Hydrofluoric acid with nitric or chromic acid	Highly corrosive splashes on to skin, mouth, or eyes. Hydrofluoric acid is particularly dangerous	Corrosive and suffocating fume is also toxic
Copper alloys	Ferric chloride	Corrosive splashes on to skin, mouth, or eyes	Corrosive and suffocating fume

SOURCE: W. T. Harris, p. 107.

104

Chemical Machining—CHM 13.1



Materials	Maximum Transition Zone
Aluminum alloys	4 x depth of cut
Magnesium alloys	6 x depth of cut
Ferrous alloys	10 x depth of cut
Nickel and Cobalt alloys	10 x depth of cut
Titanium alloys	10 x depth of cut or 0.5 inch (12.7 mm), whichever is greater

Figure 13.1-13 Transition zones of CHM.

Figure 13.1-12 Normally attained dimensional tolerances for a range of materials. (W. T. Harris, 1953)

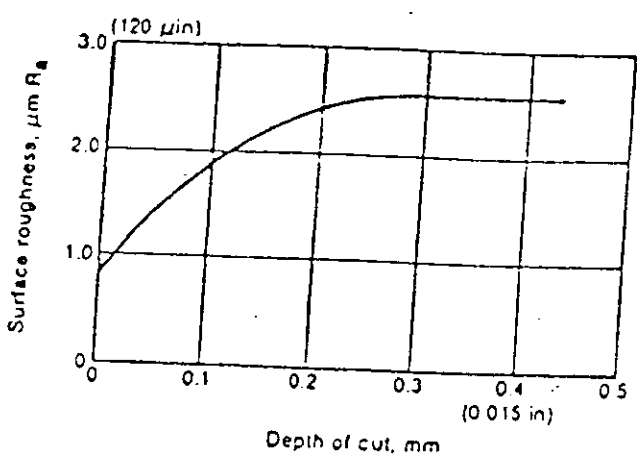


Figure 13.1-14 The relationship between surface finish and depth of cut for chemical milling 7075 aluminum sheet. (W. T. Harris, p. 112)

134

13.1 Chemical Machining-CHM

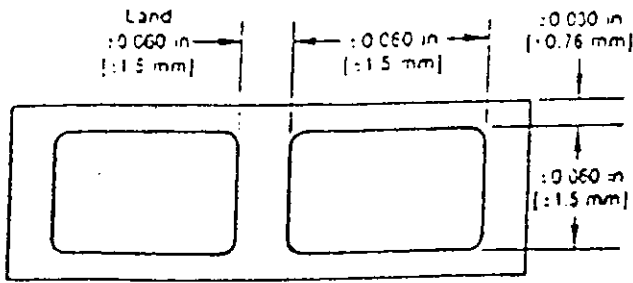


Figure 13.1-9 Nominal lateral tolerance.

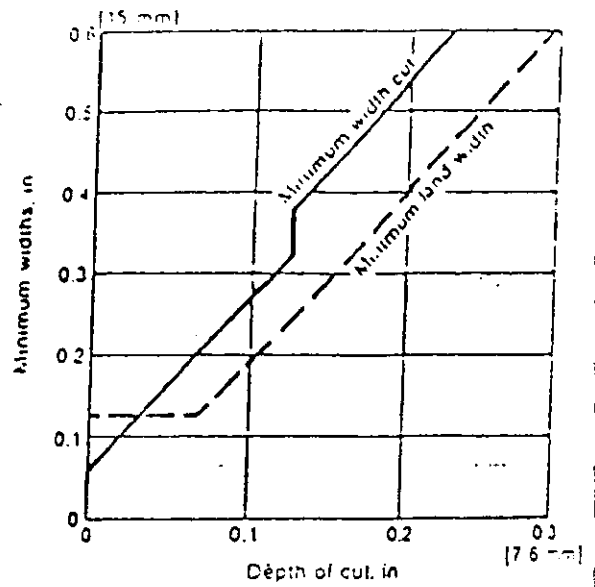


Figure 13.1-10 Recommended minimum widths of cut and land for CHM.

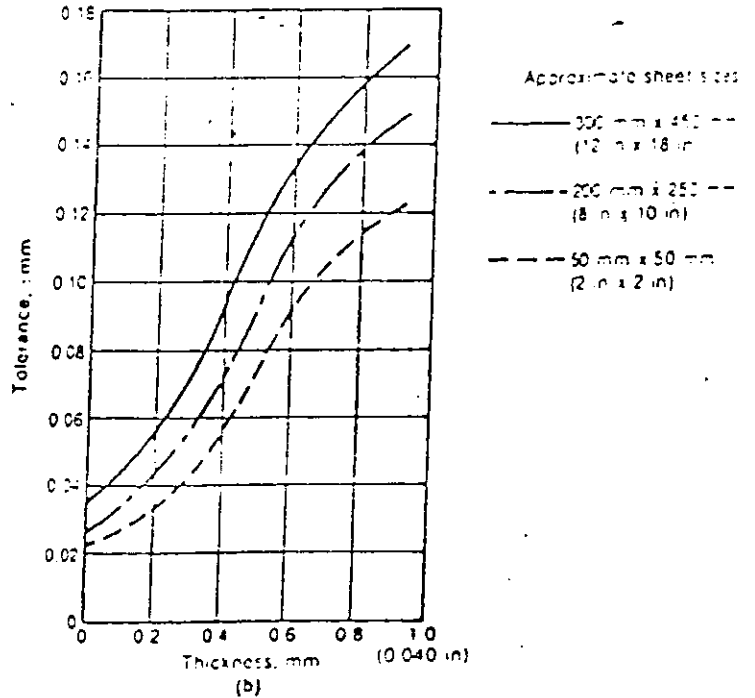
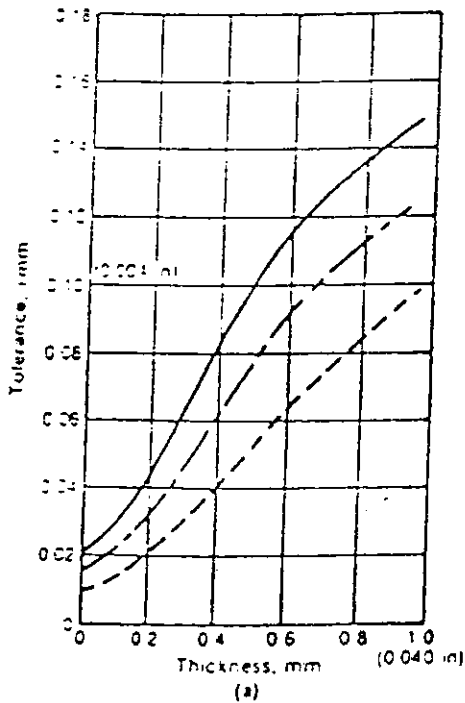


Figure 13.1-11 Practical tolerances on etched dimensions, for a range of flat sheet sizes and material thickness. (a) For prototype and short runs; (b) for production runs. (W. T. Harris, p. 192)

101
Chemical Machining—CHM 13.1

TABLE 13.1-9 Tolerance on Depth of Cut

MATERIAL	TOLERANCE, in				TOLERANCE, mm			
	Depth of cut, in				Depth of cut, mm			
	0-0.250	0.251-0.500	0.501-0.750	0.751-0.900	0-6.35	6.35-12.7	12.7-19.0	19.0-25.4
General	0.002	0.003	0.004	0.006	0.05	0.07	0.10	0.15
Aluminum and magnesium alloys	0.001	0.0015	0.002	0.003	0.02	0.03	0.04	0.05
Stainless steels, ferrous and nickel alloys	0.002	0.003	0.004	0.005	0.03	0.04	0.05	0.06
Titanium and beryllium alloys	0.003	0.004	0.005	0.010	0.05	0.10	0.15	0.20

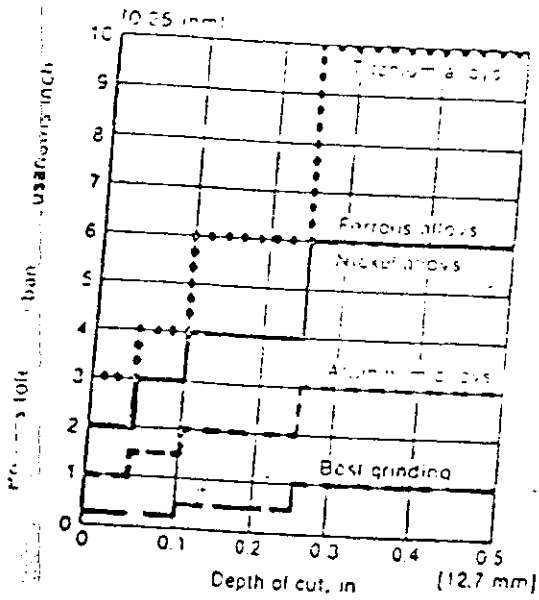


Figure 13.1-7 CHM depth-of-cut tolerance for materials.

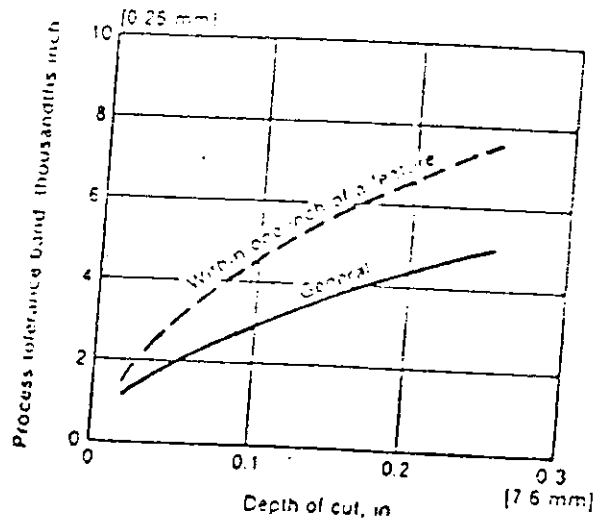


Figure 13.1-8 Depth-of-cut tolerance capability of CHM.

13.1 Chemical Machining—CHM

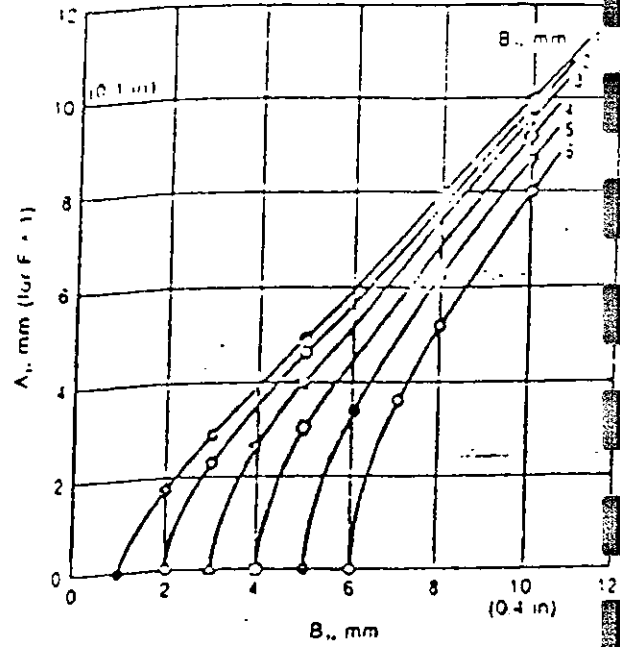
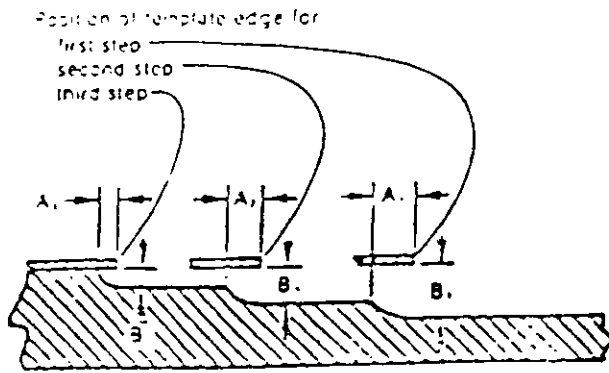


Figure 13.1-6 Undercut allowance, A , for step chemical milling. Allowance is for adjacent steps B_1 and B_2 with various step depths. Note: Etch factor for CHM is ratio of undercut to depth of cut or $F = A/B$. Caution: In photochemical machining, the factor is defined as the inverse ratio B/A . (V. T. Harris, p. 262-69)

TABLE 13.1-8 Typical Surface Dimensional Tolerances

WORK MATERIAL	TOLERANCE, in					TOLERANCE, —				
	Workpiece Thickness, in					Workpiece Thickness, in				
	0.002	0.005	0.010	0.020	0.030	0.05	0.10	0.25	0.50	0.75
Aluminum alloys	± 0.0005	± 0.0012	± 0.0025	± 0.005	± 0.008	± 0.013	± 0.030	± 0.065	± 0.13	± 0.20
Copper and copper alloys	± 0.0004	± 0.001	± 0.002	± 0.004	± 0.006	± 0.010	± 0.025	± 0.055	± 0.10	± 0.15
Nickel	± 0.0005	± 0.0012	± 0.0025	± 0.005	± 0.008	± 0.013	± 0.030	± 0.065	± 0.13	± 0.20
Steel alloys	± 0.0004	± 0.001	± 0.002	± 0.004	± 0.006	± 0.010	± 0.025	± 0.055	± 0.10	± 0.15
Stainless steel	± 0.0005	± 0.0012	± 0.0025	± 0.005	± 0.008	± 0.013	± 0.030	± 0.065	± 0.13	± 0.20

SOURCE: Chemcut Corporation, State College, PA.

Chemical Machining—CHM 13.1

TABLE 13.1-6 Typical Maskants for Various Metals

METAL	ETCHANT	TEMPERATURE C	MASKANTS
Aluminum	Alkaline	91	Acrylonitrile rubber, butyl rubber, neoprene rubber
Ferrous metals	Acid	54	Polyvinyl chloride, polyethylene, butyl rubber
Magnesium	Acid	< 38	Polymers
Titanium	Acid	21 to 35	Translucent chlorinated polymers
Titanium	Acid	54	Vinyl polymers, elastomers
Beryllium	Acid	21 to 54	Vinyl, neoprene, butyl- based materials
Nickel	Acid	45 to 50	Neoprene

TABLE 13.1-7 Properties of Maskant Materials Widely Used in Chemical Milling

PROPERTY	MASKANT MATERIAL				
	Exposure to Oxidizing Acids			Exposure to Acids or Alkalis	
	Polyvinyl chloride	Polyethylene	Butyl rubber	Acrylonitrile rubber	Neoprene rubber
Use of manufacture	Good	Good	Fair	Fair	Good
Service life, months	6 to 12	6 to 12	4 to 6	3 to 6	6 to 8
Temp. range, °C	25 to 55	60 to 100	20 to 25	15 to 25	25 to 35
Use of application:					
Etching	Good to fair	Poor to fair	Good	Good	Good
Pow coating	Good to fair	Poor to fair	Good	Good	Good
Air spraying	Good	Good	Poor	Poor	Fair
Cure	Air or heat	Heat	Heat	Air or heat	Air or heat
Modulus of rupture strength, MN/m ²					
Air-dried (24 hr)	—	—	—	7 max.	14 max.
Heat cured	7 to 17.5	6 to 11	6 to 11	11 to 17.5	11 to 21
Resistance to etchant:					
Deterioration	Good to excellent	Very good	Very good	Very good	Very good
Permeability	Fair to good	Very good	Excellent	Very good	Very good
Temp. limit °F*	160	140	300	250	200

*Minimum useful temperature for intermittent exposure—also curing temperature.

13.1 Chemical Machining—CHM

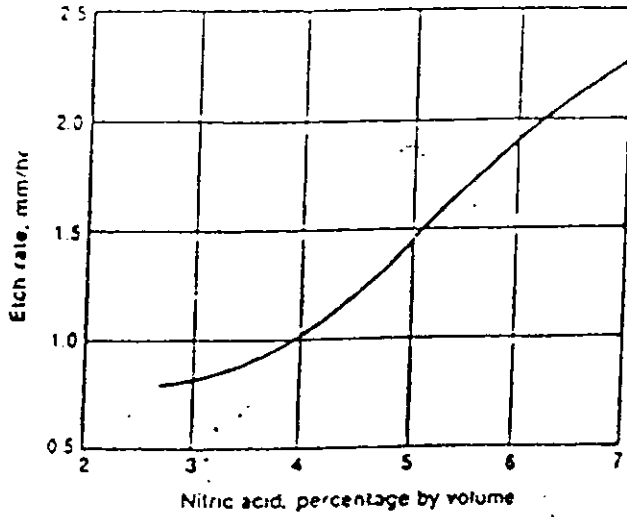


Figure 13.1-4 The effect on etch rate of increasing the nitric acid concentration in an etchant containing 25 percent sulfuric acid at 70°C (158°F). (W. T. Harris, p. 234)

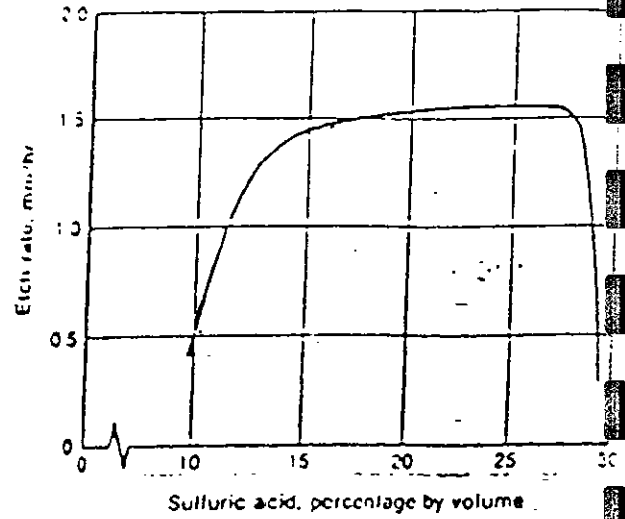


Figure 13.1-5 The effect on etch rate of increasing the sulfuric acid concentration in an etchant containing 5 percent nitric acid at 70°C (158°F). (W. T. Harris, p. 234)

TABLE 13.1-5 Etchants for Steel, Nickel and Cobalt Alloys

METAL ALLOY	H ⁺ (N)	NO ₂ ⁻ (N)	PO ₄ ⁻ (N)	F ⁻ (N)	METAL ION g/L
Mild steel	2.0 to 3.5	0.2 to 4.1	1.5 to 3.0		100 to 250
Stainless steel	2.0 to 3.5	0.2 to 4.1	1.5 to 3.0		100 to 250
Nickel alloys	2.0 to 3.5	0.2 to 4.1	1.5 to 3.0		100 to 250
Cobalt alloys	2.0 to 3.5	0.2 to 2.0	0 to 3.0	0.5 to 1.0	125 to 250

SOURCE: W. T. Harris, p. 235.

Chemical Machining—CHM 13.1

TABLE 13.1-4 Comparison of Data and Characteristics of Systems for Chemical Milling Titanium, Steel, Aluminum, and Nickel- and Cobalt-Base Alloys

METAL	PRINCIPAL ETCHANT	ETCH RATE		OPTIMUM ETCH DEPTH		ETCHANT TEMPERATURE		AVERAGE SURFACE ROUGHNESS, R_a	
		in./min	mm/min	in./mm	mm	°F	°C	µin	µm
Titanium alloys	Hydrofluoric acid	0.0026 to 0.0030	0.0006 to 0.0007	0.125	0.2	115 ± 5	47 ± 3	15 to 100	0.4 to 2.5
Steels	Hydrochloric acid-nitric acid	0.0005 to 0.0012	0.0001 to 0.0003	0.125	0.2	145 ± 5	57 ± 3	30 to 120	0.8 to 3.2
Aluminum alloys	Sodium hydroxide	0.0005 to 0.0012	0.0001 to 0.0003	0.125	0.2	195 ± 5	90 ± 3	50 to 100	1.0 to 3.2
Nickel- and cobalt-base alloys	Nitric acid-hydrochloric acid-ferric chloride	0.0004 to 0.0015	0.0001 to 0.0003	0.125	0.2	140 ± 5	60 ± 3	50 to 150	1.0 to 3.2

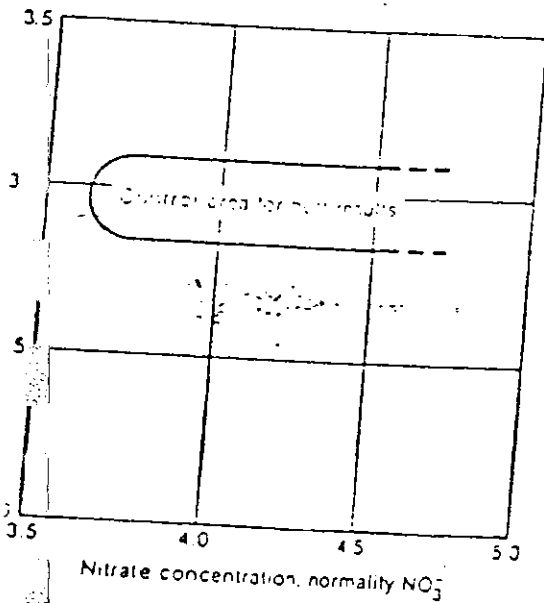


Figure 13.1-2 Suitable working ranges for the aqua-regia and nitrate concentrations of an aqua-regia-type etchant for 18/8 stainless steels. (W. T. Harris, *Chemical milling*, Oxford: Clarendon Press, p. 239)

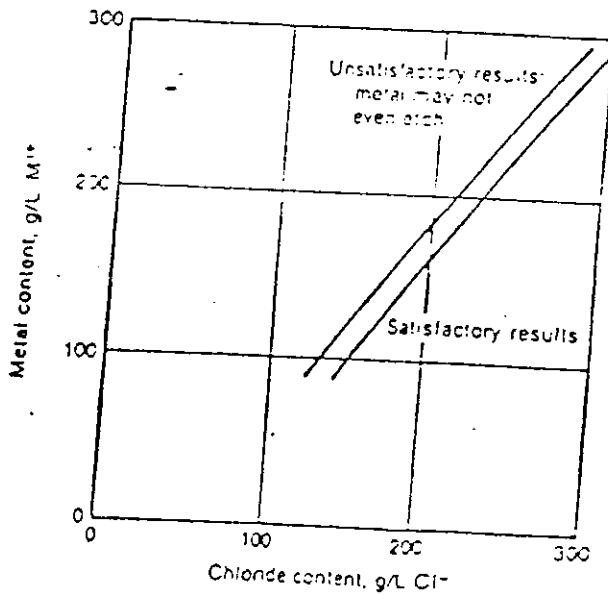


Figure 13.1-3 Relationship between metal and chloride content for an aqua-regia-type etchant. (W. T. Harris, p. 238)

SELECTED DATA

There are several valid techniques for selecting operating parameters for CHM. The steps in table 13.1-2 are in compliance with one of these techniques. Supporting data come from the other figures and tables.

TABLE 13.1-2 Steps To Select CHM Operating Parameters

ITEM	DATA
Workpiece material: type heat treatment grain size metallurgical state rolling direction	Engineering drawings
Select compatible etchant: type concentration temperature	Tables 13.1-3, 13.1-4 and 13.1-5, figures 13.1-2 to 13.1-5
Estimate etching rate:	Tables 13.1-1, 13.1-3, 13.1-4 and 13.1-2, figures 13.1-2 to 13.1-5
Calculate time of immersion from depth of cut:	Drawing dimension divided by estimated etching rate
Run test specimen to check estimates and establish final value of operating parameters:	Laboratory tests on specimen with exactly same finish and metallurgical state as the production workpiece
Check surface roughness gained:	Specimens from item 5 using the operating parameters
Quality control:	Deviations from surface roughness, or etching rate during a production run signal the need for corrective changes in the etching bath conditions
Masking: maskant type template design and undercut allowances	Tables 13.1-6 and 13.1-7 Table 13.1-3, figures 13.1-6, 13.1-8, 13.1-9 and 13.1-10
Safety precautions: handling ventilation effluents	Local safety practices, OSHA guidelines, EPA guidelines

13.1 Chemical Machining—CHM

TABLE 13.1-3 Etchant Characteristics and General Applications

METAL THAT ETCHANT WILL ATTACK	ETCHANT	ETCHANT CONCENTRATION	OPERATING TEMPERATURE		ETCH RATE WITH FRESH SOLUTION		ETCH FACTOR*
			°F	°C	in./min	mm./min	
Aluminum	FeCl ₃ , HNO ₃ , HCl, H ₂ O	42° Be ^b 1:1:2	120 100 to 120	49 38 to 49	— —	— —	— —
Aluminum alloys	FeCl ₃ , HCl, HNO ₃ , H ₂ O	12 to 18° Be ^b 10 to 9	120 120	49 49	0.001 to 0.002 0.001 to 0.002	0.025 0.025 to 0.050	1.5:1 to 2:1 2:1 (variable)
Cold rolled steels	FeCl ₃ , HNO ₃	42° Be ^b 10 to 15% (vol.)	120 120	49 49	0.001 0.001	0.025 0.025	2:1 1.5 to 2:1
Copper and its alloys	FeCl ₃ , (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ , Chromic acid, CuCl ₂	42° Be ^b 2.2 to 3 gal (263g/l) H ₂ O commercially available 35° Be ^b (regenerated)	120 90 to 120 120 130	49 33 to 49 49 54	0.002 0.001 0.0015 0.00055	0.050 0.025 0.036 0.014	2.5 to 3:1 2 to 3:1 2 to 3:1 2.5 to 3:1
Germanium	HF or HF-HNO ₃	various	—	—	—	—	—
Glass	HF or HF-HNO ₃	various	—	—	—	—	—
Gold	HCl:HNO ₃	3:1	90 to 100	33 to 38	0.001 to 0.002	0.025 to 0.050	—
Hardened tool steel	HNO ₃	10 to 15% (vol.)	100 to 120	38 to 49	0.0005 to 0.001	0.013 to 0.025	1:1 to 2:1
Inconel	FeCl ₃	42° Be ^b	130	54	—	—	—
Inconel alloy X	FeCl ₃	42° Be ^b	130	54	—	—	—
Kovar	Chromic acid, FeCl ₃	commercially available 40° Be ^b	120 120	49 49	0.001 0.001	0.025 0.025	2 to 2.5:1 2:1
Lead	FeCl ₃	42° Be ^b	130	54	—	—	—
Magnesium	HNO ₃	10 to 15% (vol.)	90 to 100	33 to 38	0.001 to 0.002	0.025 to 0.050	—
Moly permalloy	FeCl ₃	42° Be ^b	130	54	—	—	—
Molybdenum	H ₂ SO ₄ , HNO ₃ , H ₂ O HNO ₃ , HCl, H ₂ O	1:1:1 to 5 1:1:1 to 2	130 —	54 —	0.001 at 130°F varies with temp. —	0.025 at 54°C varies with temp. —	— —
Nickel	FeCl ₃	42° Be ^b	120	49	0.0005 to 0.001	0.013 to 0.025	1:1 to 3:1
Nickel-iron alloys	FeCl ₃	42° Be ^b	120	49	0.0005 to 0.001	0.013 to 0.025	1:1 to 3:1
Nickel-silver alloys	FeCl ₃ , Chromic acid, (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	42° Be ^b commercially available 2.2 to 3 gal (263g/l) H ₂ O	120 120 90 to 120	49 49 33 to 49	— — —	— — —	— — —
Phosphor-bronze	FeCl ₃ , Chromic acid, (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	42° Be ^b commercially available 2.2 to 3 gal (263g/l) H ₂ O	cold (30) cold (50) cold (80)	27 27 27	0.0005 0.0005 0.0003	0.013 0.013 0.028	2:1 2:1 2:1
Silicon	HNO ₃ , HF, H ₂ O	various	100 to 120	38 to 49	slow	slow	—
Silicon steel	FeCl ₃	42° Be ^b	130	54	0.001	0.025	1.5 to 2:1
Silver	HNO ₃ , H ₂ O FeNO ₃	50 to 90% (vol.) 36° Be ^b	100 to 120 120	38 to 49 49	0.0005 to 0.001 0.0008	0.013 to 0.025 0.025	— —
Stainless steel	FeCl ₃	42° Be ^b	130	54	0.0008	0.020	1.5 to 2:1
Tin	FeCl ₃	42° Be ^b	130	54	—	—	—
Titanium	HF HF-HNO ₃ , H ₂ O NH ₄ HF, HCl, H ₂ O	10 to 50% (vol.) various various	100 to 120 100 to 120 100 to 120	38 to 49 38 to 49 33 to 49	— — —	— — —	— — —
Zinc	HNO ₃	10 to 15% (vol.)	100 to 120	38 to 49	0.001	0.025	—

*The ratio of depth of undercut to depth of cut.

^bBaume' specific gravity scale (Be').

تعدادت USM

- ۱) کمترین نرخ بردارایی روزانه از طریق طبقه بندی
- ۲) خردش دیوار سوراخ با استفاده از سوراخ سوراخ و این روش سوراخ
- ۳) خردش ابزار که این روش در صورت امکان سوراخ سوراخ
- ۴) سطح ایما رسته توسط این روش معمولاً دارای عمق کم و سوراخ های این روش
- * روش EDM, ECM، نرخ بردارایی بسیار کم و سوراخ های قطعه کار را

نرخ بردارایی در نرخ بردارایی

- ۱) فکس، دانه ارفاقش رفت ابزار
- ۲) نوع دانه از دانه سوراخ سوراخ
- ۳) عمق سوراخ سوراخ و درجه حرارت آن
- ۴) نوع سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ
- ۵) شکل سوراخ و عمق سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ
- ۶) زمان سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ

RUM (التراسونیک جرم) به سوراخ در سوراخ است. $RUM = 10 USM$ نرخ بردارایی با $RUM = 10 USM$ نرخ بردارایی

از ابزار جرمی که از سوراخ خردش می شود و این روش در سوراخ است. $RUM = 10 USM$ نرخ بردارایی

مجموعه سوراخ های سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ

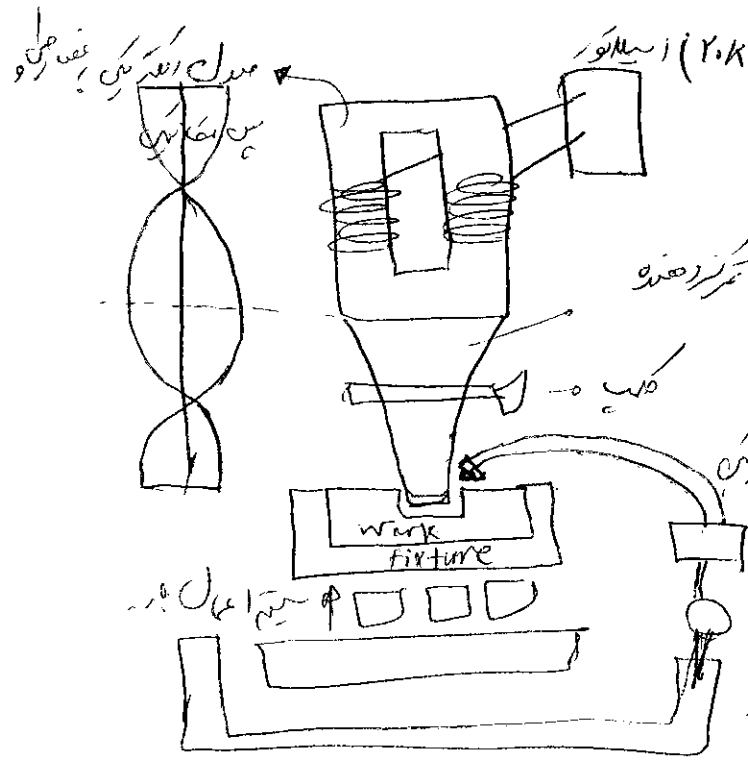
سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ

- ۱- ابزار که از سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ
- ۲- ابزار که سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ
- ۳- ابزار که سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ

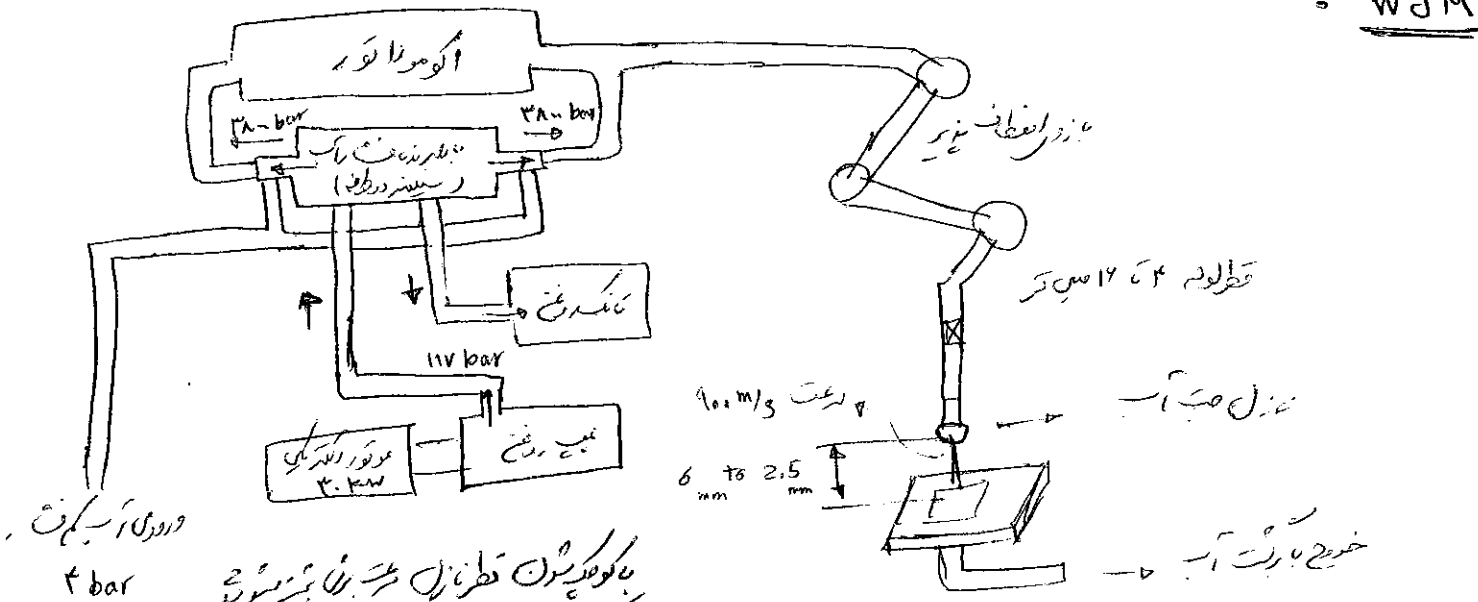
سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ

- ۱) خاصیت فکس سوراخ سوراخ
- ۲) قابلیت تراشیدن سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ
- ۳) نرخ بردارایی سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ
- ۴) سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ

نسبت بر حسب سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ

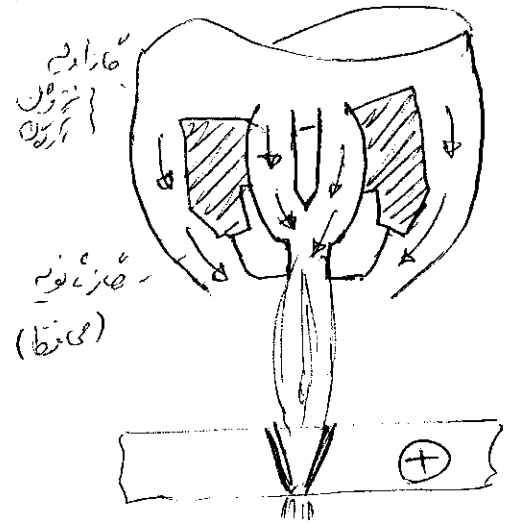


نرخ بردارایی سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ سوراخ



اکونواتور ← باعث کمزافت شدن جریان آب و ثابت بودن سرعت آن هنگام خروج از نازل
 دران کار نازل یعنی: } ذرات معلق در آن ← حبه‌ها از ماسه
 ← عبور آب از فیلتر فیلتر یا استفاده از آب محوطه (هوشیار))
 بعد از برش کار محکم آب بوسیله Catcher (گیرنده) دریافت می‌شود که وظیفه آن برابری در دراز
 ۱) گیرنده آب طوری طراحی شده که سطح مدارش از حاصل سخت آب سوراخ‌ها را می‌دهد.
 ۲) فیلتر مخصوص یا منبج برای جمع کردن محصولات استیغاری می‌باشد.
 معمول نازل ← ۱۰ تا ۱۲ ساعت ← برای افزایش طول نازل آب را از فیلترهایی عبور دهد تا ذرات بزرگتر از ۴۵ μm را گرفته شود.

PBM



بیشتر در برشکاری استفاده می‌شود در برشکاری سخت فلز که از (۸۵۰ آرتون در ۲۰ نترزون
 تخلیه شده است. بین دو الکترود تشکیل شده و کار در حالت ولتاژی بین ۱۰ تا ۱۰۰ ولت
 برقرار می‌شود که باعث ایجاد جرقه می‌شود. این جرقه موجب پدید آمدن شدن فایزهای بسیار از بین دو
 الکترود می‌شود. در این حالت که در سطح کار گازهای مین می‌شود جهت بیرون راندن پرت معلقه کار
 حرارت می‌شود که در حوضت میانی ۸۰۰۰ تا ۲۸۰۰۰ است.
 نوسان پولا نرکین از نکته در کنار آزاد، پودر نرکین و ماده در ضخامت ۱ تا ۱.۵
 جهت عبور از نوسان جدار و شکل از گاز نوسان مین نرکین، اکسین، هوا فشرده و...
 جهت فیلتر کردن مدارها استفاده می‌شود.
 قطعات بسیار در اندازه کوچک می‌باشد.

در ساخت قطعات مدارها نکته دیگر این است که در حوضت پرتوهای مین نرکین با طول ۱۵ μm
 در این روش از نوسان پولا نرکین و نوسان مین نرکین، اکسین، هوا فشرده و... استفاده می‌شود.

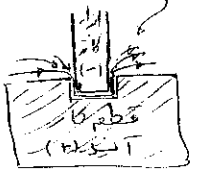
- ECM یک فرایند الکتریکی است که طی فرایند شیمیایی الکترولیز، مواد از سطح قطعه کار توسط جریان الکتریکی از بین می‌رود.
- قطعه کار قطب مثبت و ابزار قطب منفی است. جریان به کار رفته مستقیم می‌باشد. ابزار و قطعه کار هر دو دارای یون در محلول الکترولیت غوطه‌ورند.
- در این فرایند فاصله بین ابزار و قطعه کار توسط سرد کردن کنترل می‌شود. حداکثر باربراری زمانی است که فاصله بین دو الکترود کم باشد. Gap یا فاصله بین دو الکترود در بین ۰.۰۷۲ تا ۰.۷۲ میلی‌متر است.

فرایند برابری تپلی ۳ -

$$m = \frac{AIt}{zF}$$

مقادیر پارامترها

- m → میزان باربراری
- I → جریان (دانشگاه تهران)
- t → زمان، ششکاری
- A → وزن اتمی قطعه
- z → مقدار الکترود والانس
- V → ولتاژ کاری
- K → هدایت الکترولیت
- h → فاصله بین دو الکترود
- نقطه الکترود



- بهترین عامل میزان تغذیه و نرخ باربراری، چگالی یا دانسیته جریان است که صاف سطح دخواه را نیز منفی می‌کند.
- در طی این فرایند گاز هیدروژن در اطراف کاتد جمع می‌شود و با برین شکل کاتد (ابزار) در طی عمل ماشینکاری تغییر نمی‌کند.
- هدایت الکترولیت نیز دارای جریان الکتریکی است و تفاوت آن ممکن است به مدد اهمیت برسد.
- سرعت جریان الکترولیت از مستقیم بر صافی سطح می‌گذارد. میزان زبری سطح در جهت عبور جریان الکترولیت افزایش می‌دهد.
- دقت ماشینکاری به باربراری من فاصله بین دو الکترود و تغییرات فرکانس جریان الکترولیت (که موجب ایجاد صدا و تغییرات فاصله بین دو الکترود شود) بستگی دارد.
- عبور جریان الکتریکی از کنار دیواره قطعه موجب برودت و تغییرات فرکانس می‌شود. **overcut** می‌شود که جهت اقیاناب از این امر دوباره‌های ابزار را با برین ۴ یا ۵ استیجایی عایق عایق می‌کنند.

- در صنعت بهترین الکترولیت $NaCl$ (۸۰٪) و $NaNO_3$ (۱۸٪) و بقیه موارد (۲٪) می‌باشد. دانسیته جریان ۱۸ تا ۴۵ A/cm^2
- کاربرد ECM (۱) قطعات با شکل هندسی پیچیده و (۲) دارای گوشه‌های پیچیده (۲) قطعات باریک (۳) صافی سطح بسیار خوب مطلوب است.
- در ایجاد سوراخ‌های عمیق که نسبت قطر به عمق آنها کم است و هم چنین سوراخ‌های با قطر ضعیف کوچک از این فرایند استفاده می‌شود.
- هدایت حرارتی در الماس و نایف‌ها خاصیت خود را نشان می‌دهد. $NaNO_3$ (دارای خوردگی کمتری نسبت به $NaCl$ است) و عویب صافی سطح بهتر **overcut** کمیناقت سرد قطعه می‌شود. اناسرعت ماشینکاری را کاهش می‌دهد.
- درجه حرارت الکترولیت را بین ۴۲ تا ۵۲ درجه سانتی‌گراد نگه‌دارند.
- فاصله کم بین دو الکترود (Gap) موجب کنترل دقت اندازه‌گیری و سایش در اطراف ابزار می‌شود. در این فاصله کم الکترولیت عبور جریان الکتریکی ندارد.
- جهت باربراری فرایند می‌شود بر این اساس از $PECM$ و ECM از طریق جریان مایع می‌باشد. که در این روش از دو الکترود با چگالی جریان ۵۰ تا ۱۰۰ A/cm^2 در فاصله ۰.۱ تا ۰.۲ میلی‌متر است.

انواع **overcut**

- ① سرعت الکترولیت
- ② دانسیته جریان الکتریکی

$$V = RI$$

نسبت مستقیم با دقت
نسبت معکوس با جریان
نسبت معکوس با هدایت الکترولیت
نسبت معکوس با نرخ ماشینکاری ابزار

کاربرد تراستیک :

- مواد حکامی مواد شکسته
- لایه برداری در بناهای سنگین و حفقات عمیق شکسته
- جوش درون پلاستیک بدون درازت و جیب
- تست غیر تخریب NDT

- افزایش قوت ارتعاشی و دامن‌ارسانی صورت گرفته با افزایش توان در عبور از این سطح در برابر ارتعاش
و در آن به بعد موجب کاهش نرخ باربرداری می‌شود.

- استفاده از زانگ کوهی در برابر سازه به صورت سطح بهتر + کاهش نرخ باربرداری

نرخ باربرداری را افزایش می‌دهد.

- جوش درازت سازه به واسطه کارباید، سیلیکون کارباید، آلومینم اکسید، برن نترات

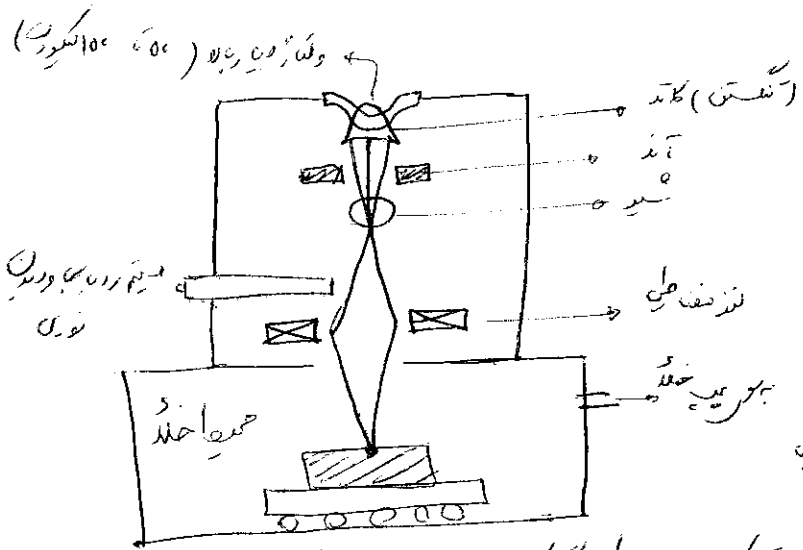
سازمان برن کارباید استفاده می‌شود چون زردی شکسته درستی لازم را حفظ می‌کند. (تبدیل شدن در بار و تیر می‌شود)

- سرعت بتن براده برداری به اندازه (بسته به اندکی کوچکتر از دامن‌ارسانی است) برابر است.

- در صورت درازت طول سازه به ۵ تا ۲ درصد سازه دراز

- بتن طول سازه به نیاز به یک سطح بارگذاری کمتر + هم‌سوی تر کردن سازه و هدایت بار را در زمان دراز.

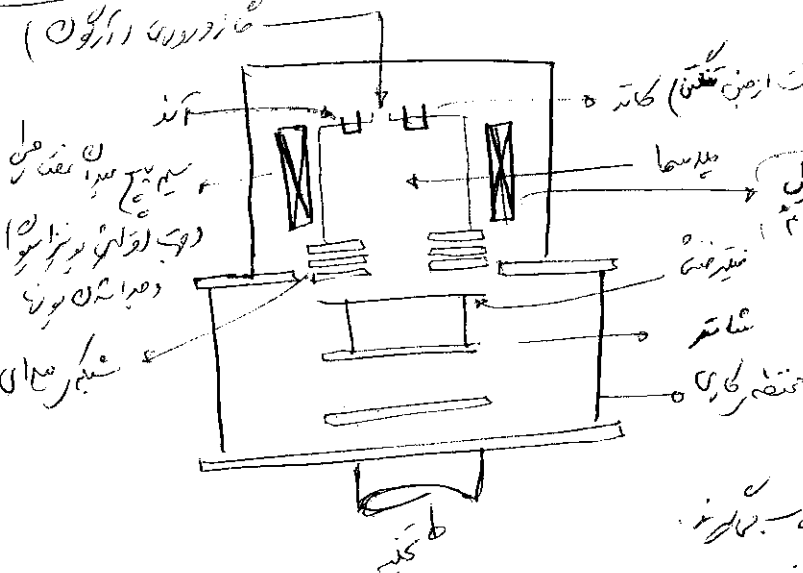
استفاده از طریق ذرات بزرگ و پرتوهای کاتیون که فقط در کاتودها و در جهت راست با سرعت بالا می شود.



- ۱- تغذیه الکترودها به کاتود (منفی) + آند (مثبت زمین) (-) (+)
- در این مورد از ۱ تا ۲۰۰۰ ولت استفاده می شود و در این مورد از ۱ تا ۲ میکرون پرتوهای کاتیون استفاده می شود.
- ۲- الکترودها به سرعت ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ دور در دقیقه می چرخند.
- ۳- جهت چرخش از پرتوهای کاتیون در جهت چرخش خود را می گیرند و در جهت چرخش خود را می گیرند.
- ۴- پرتوهای کاتیون در جهت چرخش خود را می گیرند و در جهت چرخش خود را می گیرند.
- ۵- با استفاده از سیستم ریویز می توان از این سیستم استفاده کرد و در جهت چرخش خود را می گیرند.
- ۶- در این مورد از ۱ تا ۲ میکرون پرتوهای کاتیون استفاده می شود و در جهت چرخش خود را می گیرند.
- ۷- می توان به سیستم ریویز استفاده کرد و در جهت چرخش خود را می گیرند.

کاربرد: در صنایع مختلف از جمله صنایع پلاستیک، فلزات، و غیره استفاده می شود. (محدودیت: کار در خلأ، نیاز به تجهیزات گران قیمت)

IBM



- ۱- بین کاتود و آند اختلاف پتانسیل ۵ تا ۲ کیلوولت برقرار می شود. (تنگستن کاتود - تنگستن آند)
- ۲- در این مورد از ۱ تا ۲ میکرون پرتوهای کاتیون استفاده می شود و در جهت چرخش خود را می گیرند.
- ۳- کاتود از جنس تنگستن در این مورد استفاده می شود و در جهت چرخش خود را می گیرند.
- ۴- در این مورد از ۱ تا ۲ میکرون پرتوهای کاتیون استفاده می شود و در جهت چرخش خود را می گیرند.
- ۵- گاز آرگون را در این سیستم استفاده می کنند.
- ۶- در این مورد از ۱ تا ۲ میکرون پرتوهای کاتیون استفاده می شود و در جهت چرخش خود را می گیرند.
- ۷- در این مورد از ۱ تا ۲ میکرون پرتوهای کاتیون استفاده می شود و در جهت چرخش خود را می گیرند.

تفاوت بین این دو سیستم: در سیستم EBE، پرتوهای کاتیون در جهت چرخش خود را می گیرند و در جهت چرخش خود را می گیرند. در سیستم IBE، پرتوهای کاتیون در جهت چرخش خود را می گیرند و در جهت چرخش خود را می گیرند.

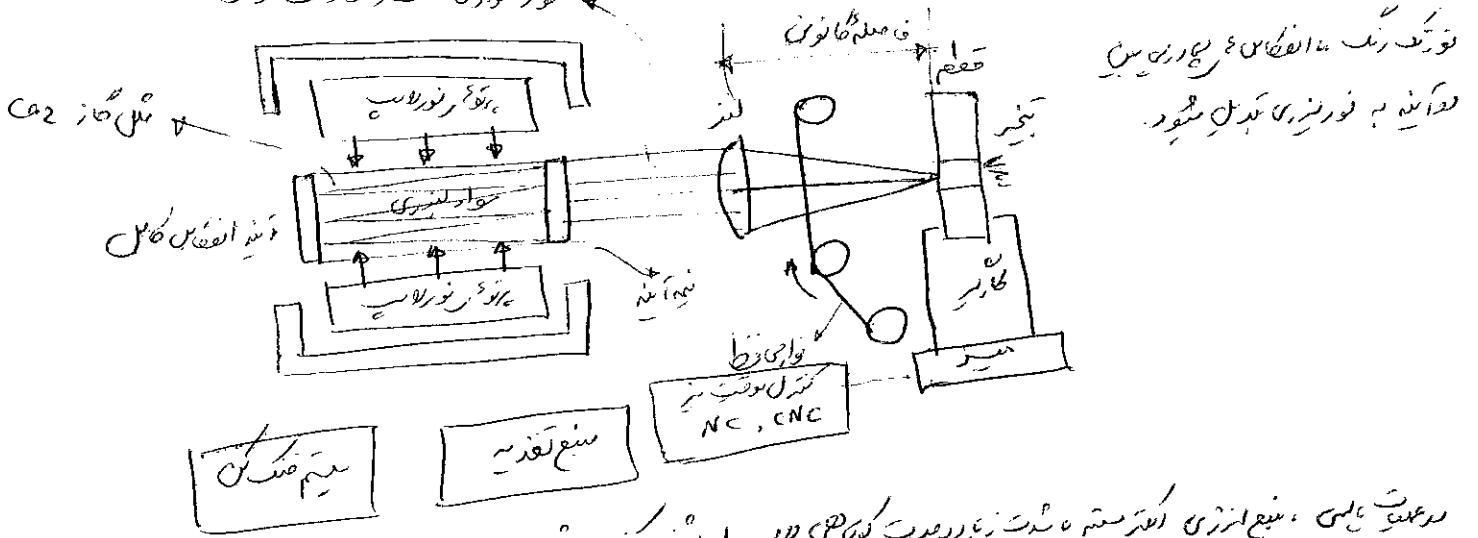
تفاوت دیگر: در سیستم EBE، پرتوهای کاتیون در جهت چرخش خود را می گیرند و در جهت چرخش خود را می گیرند. در سیستم IBE، پرتوهای کاتیون در جهت چرخش خود را می گیرند و در جهت چرخش خود را می گیرند.

تفاوت دیگر: در سیستم EBE، پرتوهای کاتیون در جهت چرخش خود را می گیرند و در جهت چرخش خود را می گیرند. در سیستم IBE، پرتوهای کاتیون در جهت چرخش خود را می گیرند و در جهت چرخش خود را می گیرند.

لئزر : LBM

فزايند نوري - حراري سے ذرے و تجربہ مواد

فوزنيزر ← 11 مورد سگانه تک فوکس (5) موازي (3) حفره (4) دارای ازوي تمرکز در سطح مقطع کم
 کاربرد: کیفیت فزکي، اندازه نيزي، نيزيگی، سافت رولند - 4 سوراخکاری، برشکاری، جوشکاری، عمدت حراري، لائزر فزکي، لائزر نيزي، لائزر نيزي، لائزر نيزي



فوزنيزر با انعطاف پذيری زياد
 توانيد به فوزنيزر تبديل شود.

در عمل با ليزر، منبع انرژي الکترسيتم به شدت زياد در صورت کوبش لايه باروشش می کند. روشی لايه با استفاده از انعطاف پذيری در صورت بروز سوراخکاری
 تمرکز نمود و از وي اي تم های حرکت شده با در فوکس نيزي که انورژت رند. در طول زمان انعطاف از وي اي انيم فوکس مي شود و وي اي از آن از
 طريق نيم آينه عبور می کند.

در اثر انرژي ليزر به انعطاف پذيری در سطح مقطع، فريب جذب، هدايت حراري، نيزي ديره و نيزي نيزي
 در طول فزايند سوراخ شده بصورت ذرات ريز در جبهه روي آيند که جهت تصويری زياد به نيزي و حفاظت از آن به وي سيستم انتقال معلول
 به نيزي راننده بصورت و کيويم معمولات را در وي کند.

- در اصل نيزي نيزي و بدون حفره نيزي ابزار

- شوره و سوراخ های اي رسته؛ ليزر دارای سطوح درازي غير صاف و شکل کوسه اي هستند

- سطوح، شيفره شده، ليزر بصورت حفره نيزي هستند.

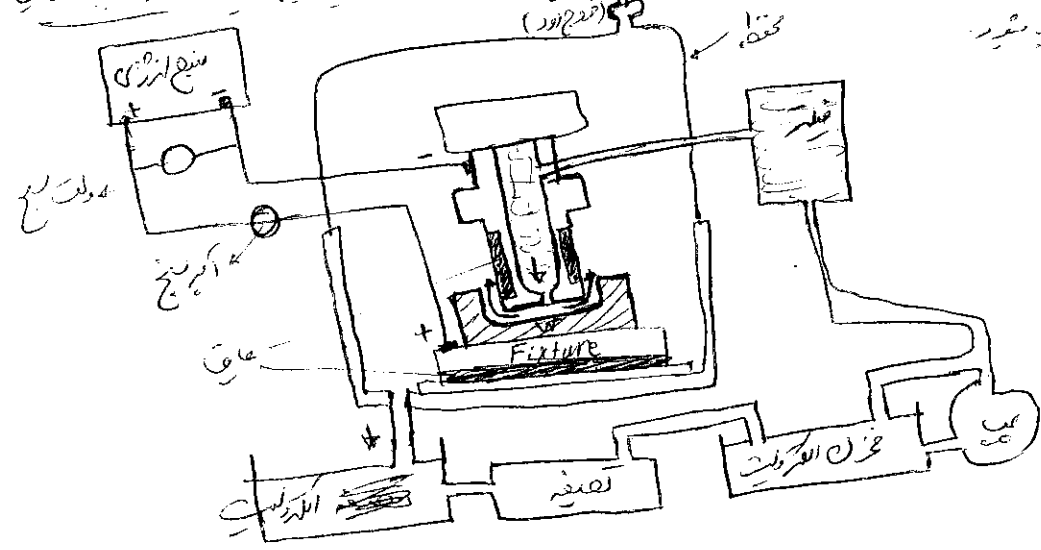
- نيزي ابزار دارای نيزي نيزي، نيزي نيزي سوراخ دار.

- استفاده از سيستم هاي خنک کننده و خنک کننده ليزر تمرکز شده و ذرات نيزي (از شيفره نيزي نيزي) مي شود.

- هزینه الکترولیت ۳۵٪ هزینه انرژی الکتریکی و هزینه کارگر جهت ملوک کردن آن و آسیبی با سولفات
- الکترولیت خوب: هدایت الکتریکی خوب، ایزان بودن، موجود بودن، این بودن جهت کار، فاقد حفره‌های خوردگی یا حفره‌های آبی
- بهترین الکترولیت: $NaCl$ - ۲۰٪ و $NaNO_3$ ← ۱۸٪ که نترات سیم خوردگی کمی نسبت به سولفات سیم دارد
- جهت ایجاد صافی سطح بهتر می‌شود $overcut$ آن کمزادت نزدیک است به جهت استفاده از آن به این ترتیب
- دقت، شفافیت، پایداری و زیست‌پذیری دارد: جهت بودن نرخ شیوهی ابزار، کمزادتی درجه‌ای الکترولیت، دقت جامد (ابزار)، جریان الکتریکی در سطح کار
- صافی سطح بدست آورده شده: صافی سطح ابزار، نوع مواد قطع کار، الکترولیت

- اندازه $overcut$: نسبت نفوس با نرخ شیوهی، نسبت عمق به عمادت الکترولیت، نسبت مستقیم با دقت مورد انتظار

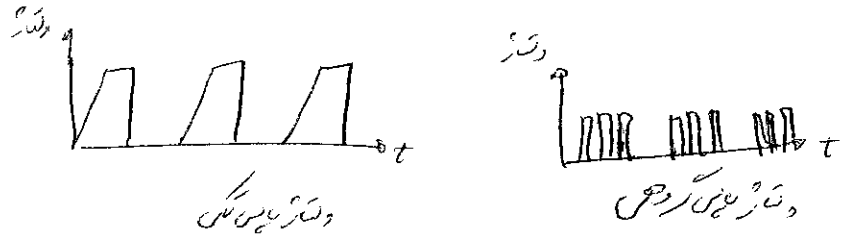
- در عمل امکان ندارد مقادیر الکترولیت ثابت باشد زیرا کار در هر نقطه‌ای که الکترولیت از آب است کمزادتی در الکترولیت ایجاد می‌شود که کار موجب ایزان
- مقادیر و کربا موجب کاهش مقادیر الکترولیت می‌شود
- شکل نهایی از ECM :



- تفاوت ECM با $PECM$:
- در ECM ماده کوهی بین دو الکترود در جهت کنترل وقت انباری و سایر درجه‌های ابزار می‌شود و از طرفی خاص کم باعث اثر بر روی چرخه الکترولیت و انتقال زودت می‌ماند
- می‌شود و موجب ناپایداری فرایند می‌شود. جهت رفع این مشکلات و استفاده از آب کوهی از وقت در پاس به چشایی جریان بالا در فرایند ص کنون سوالات
- می‌شود در $PECM$ بعد از این روش بر پایه اثر و شفافیت کنترل و نظارت دائم. فاصله کم بین دو الکترود، جهت جریان کم الکترولیت در زمان شرایطی بود که در هر لحول زمان کم باشد قطع است باعث بهبود اندازه ان عمل کردن قطعه و بلافاصله وقت و صافی سطح استفاده می‌شود.

- ۱) کمزادتی نسبت به انرژی است.
- ۲) تغییر در حرارت، دقت مجاز و هدایت الکتریکی در طول چرخه الکترولیت کمزادتی
- ۳) استفاده از پاس‌های کوچک‌تر زمانی است وقت شیوهی در بر روی در زمان به این روش می‌شود
- ۴) فشار و دمای و فرکانس الکترولیت نسبت به هم (۵۹) تغییر کمی دارند.

میزان برابری:



- ۱) حفره‌های جریان
- ۲) اولی کاری
- ۳) شکل الکترود
- ۴) فاصله بین دو الکترود
- ۵) هدایت الکترولیت

ECM :

ECM - میفرایند انرژی است که در آن موادی از سطح قطعه کار، اتم به اتم جدا می‌شوند. قطعه کار معمولاً به قطب مثبت (آند) و ابزار قطب منفی (کاتد) وصل است. می‌فرایند بسیاری که در ECM اتفاق می‌افتد، الکترولیت، کم دارد. دو قطب (مقطب کار و ابزار) در یک محلول الکترولیت غوطه‌ورند و در نتیجه جریان الکتریکی بین دو قطب اتفاق می‌افتد. از این رو، برای برداشتن موادی از سطح قطعه کار باید برداشت موادی قطب مثبت وصل شود و در نتیجه مواد از آن جدا شده و در محلول الکترولیت غوطه‌ور می‌شوند.

$$J = \frac{I}{A} = \frac{keV}{h}$$

$$U = \frac{J^2 L}{ke Pe Ce \Delta T}$$

$R = \frac{\rho h}{A}$
 $V = RI$

L	طول قطعه کار
J	چگالی جریان
ke	هدایت الکتریکی
Pe	دقت محضرت الکترود
Ce	گرم‌زدایی
DT	اختلاف دما

سرعت الکترولیت →

از جریان مستقیم استفاده می‌شود.

فاصله بین ابزار و قطعه کار کاتد اسرود که نیم‌متر از آن می‌شود.

عوامل اصلی فرایند ماشینکاری ECM : ۱- قطعه کار ۲- الکترولیت ۳- سیستم جریان الکترولیت ۴- انتقال حرارتی ۵- پارامترهای

سیستم جریان الکترولیت : در این فرایند میزان، برابری رابط مستقیم با نوع الکترولیت، تلفات درجه حرارت در موقع عایشن بین دو الکترود دارد.

الکترولیت : فلز باید بین از محیط از محیط عبور کرده و برآورد، جدا شده از قطعه مذوب می‌شوند. حجم مینو جهت کنترل هدایت الکتریکی درجه حرارت الکترولیت، پس از انتقال کنترل شود. اختلاف درجه حرارت در الکترولیت و انتقال حرارتی ایجاد می‌شود و هدایت الکتریکی در آنجا الکترولیت اثر می‌گذارد.

سیستم جریان الکترولیت : عمل پارامتری مانند محیط (توسط آب)، آب (فشار الکترولیت) بین دو الکترود و رسانایی الکترولیت در موقع برکت است.

نوع جریان الکترولیت : سرعت درجه حرارت الکترولیت و کنترل آن جهت هدایت جریان عبور از قطعه کار است.

العیق و قانون فاراد، میزان، برابری از قطعه کار، شبیه دارد. : وزن اتمی فلز، جریان الکتریکی، زمان، شش‌پایه،

$$m = \frac{AI t}{z F}$$

تفاوت پارامتر و مقدار الکترولیت و رسانایی (تعداد الکترولیت) هر آزاد در آن خود دارد.

منفی یا با رخصیات قطعه کاری در نزع برابری ندارند.

به سمت جمع شدن گنجینه‌های حرارتی، گامه، شکل کار در طول ماشینکاری تغییر می‌کند.

مکانی سطح در ECM : مکانی حدود ۰.۱ μm می‌تواند است آورد. میزان زیری سطح در سه جهت عبور جریان الکترولیت از این می‌باشد.

مکانی سطح در کفها، کنترل پارامتری مثل سرعت جریان الکترولیت، چگالی جریان، ترکیب با نوع الکترولیت و سرعت ابزار برداشتی می‌آید.

دقت، شش‌پایه : دقت ماشینکاری بستگی به پارامتری مثل : فاصله بین دو الکترود و تغییرات فیزیکی الکترولیت (موجب ایجاد فاصله) می‌تواند تغییرات فاصله

بین دو الکترود می‌شود) دارد. فاصله متغیر بین دو الکترود (gap) بستگی به آنکه در آنجا مانند هدایت الکترولیت، اختلاف چگالی بین دو الکترود می‌باشد.

عبور جریان الکتریکی از آن در دو قطعه در موقع سوراخکاری، خطوط داغ را از آنجا دارد و موجب ایجاد overcut می‌شود. باعث کردن دوباره ابزار می‌توان

زبان overcut را کاهش داد (بوسیله زمین) یا با بستن آن (در صورت ۰.۰۱ تا ۰.۰۲ mm برشته از نظر ابزار)

با استفاده از ابزار چرخشی می‌توان وقت ماشینکاری را از این راه دو سه ۰.۰۱ تا ۰.۰۲ mm رساند.

کاربرد ECM : ۱- قطعه‌های شکل هندسی پیچیده است. ۲- قطعه‌های نازک و پیچیده است بطوری‌که می‌توان از طریق فرایند سنتی برداشت کرد.

۳- جنس قطعه بسیار سخت است. ۴- مکانی سطح بسیار دقیق است.

انتخاب ابزار : مقادیر الکتریکی، هدایت حرارتی، نقطه ذوب، مقاومت در برابر فرسایش، الاستیسیته، قابلیت تکرار، هزینه ابزار

استفاده از روشی خاص در خطا، براساس، شش‌پایه و مختلف می‌تواند شکل هندسی مناسب ابزار برداشتی آورد.

تاثیر الکترولیت : به سرعت تغییر کیفیت قطعه می‌شود. الکترولیت در موقع برکت از سینی اول به تانک کلیف می‌رود و پس از هدایت از آنجا فاصله با استفاده

نیله و سانسور می‌شود. الکترولیت تمیز و داخل تانک هدایت می‌شود. در تانک تیز درجه حرارت آن کنترل می‌شود. اگر پس از هدایت به تانک توسط فلز شده