امیر کبیر

تکمیلی

سنجش

آمادگی آزمون کارشناسی ارشد

تولید مخصوص

ویرایش و تدوین : گروه مولفان سنجش تکمیلی امیر کبیر

سنجش تکمیلی امیرکبیر

داوطلب گرامی محتویات این مجموعه با توجه به رشته شما ممکن است شامل یک یا چند مورد از موارد زیر باشد:

۱- جزوات نکته و تست

۲- جزوات خلاصه مباحث درسی

۳- جزوات چکیده مطالب درسی

٤- جزوات نکته ها و روشها

٥- جزوات نکات کلیدی

٦- جزوات نکات برتر کنکوری

۷- جزوات نکات تکمیلی

۸- جزوات دانشگاهی دانشگاه های (شریف، امیرکبیر، علم و صنعت، خواجه نصیر، تهران، شهید بهشتی، ایران، علامه طباطبایی، علوم تحقیقات، مشهد، شیراز، اصفهان و تبریز)

برای خواندن مطالب بهتر است از جزوات کاملتر و جزئی تر شروع کنید و در نهایت به جزوات کم حجم تر و کلی تر برسید. مطالب جزوات به موازات هم می توانند خوانده شوند. منوط به اینکه مبحث مشترک در جزوات در یک روز خوانده نشود. مثلاً اگر از جزوه ۱ مطلب x را می خوانید مطالعه مطلب x را از جزوه ۲ به روزی دیگر موکول کنید. خواندن تمام مطالب ارسالی، تکمیل کننده و تثبیت کننده مباحث درسی می باشد. در ضمن با خواندن مطالب ارسالی، شما از مطالعه هر گونه کتاب و جزوه دیگر بی نیاز می شوید. انتخاب جزوات و مطالب ارسالی هدفمند بوده و در گزینش آنها از مشاوره و تجربه رتبه برتر سال های گذشته استفاده شده است گاهی ممکن است بعضی از مباحث در جزوات متفاوت، تکراری بوده یا با مطالب دیگر همپوشانی داشته باشند که هدف این امر مرور و ملکه ذهن شدن این مطالب است. برای آشنایی با میزان تسلط خود بر روی دروس خوانده شده، به صورت اکید توصیه می شود که در کنکور آزمایشی موسسات شرکت کنید تا قبل از کنکور اصلی بتوانید ضعف های خود را یافته و آنها را اصلاح کنید.

www.sanjeshEtakmili.com

سایت سنجش تکمیلی داوطلبان کام! به عنوان معتبرترین سایت مرجع اطلاع رسانی مقطع تکمیلی، وظیفه توزیع اطلاعات مربوطه را بعهده دارد. تا داوطلبان در شرایطی برابر و بدون رقابت پیروز باشند

" فصل اول "

اصول و مبانی فیزیکی ماشین کاری با امواج اولتراسونیک

۱-۱)- مقدمه :

در این فصل ابتدا امواج و انواع آنها و سپس تاریخچه اولتراسونیک مورد بحث قرار می گیرد. توضیح اجزای مهم ماشین اولتراسونیک و پارامترهای موثر بر فرآیند ماشینکاری مبحث بعدی را تشکیل میدهند. در پایان فصل، بحث پیرامون مبانی الکتریکی ترانسدیوسر و مبانی مکانیکی تمرکزدهنده ارائه خواهد شد.

۲-۱)- امواج و انواع آنها :

موج یکی از وسایل انتقال انرژی از جایی به جای دیگر است. انتقال انرژی به دو راه صورت می گیرد. یکی بوسیله انتقال ماده، بدین معنی که ماده به هنگام انتقال، انرژی جنبشی و انرژی درونی خود را نیز با خود می برد، دیگری بوسیله موج، و در اینگونه انتقال انرژی، ماده منتقل نمیگردد. موج انواع مختلف دارد ولی طرز انتقال انرژی توسط همه انواع آن یکسان است : موج صوتی در اثر حرکت ارتعاشی ماده تولید می شود و بوسیله محیط

مادی منتقل می گرددوانرژی حاصل ازمنبع ارتعاش را باخودانتقال میدهد (۶). درواقع موج یک تغییرفشار،تنش،سرعت یا تناب درمحیط ایجاد می نمایدکه این تغییروضعیت درمحیط انتشارمی یابد (۵). امواج الکترومگنتیک درخلاء (محیط غیرمادی) نیزمنتشرمی شوند (۷)،(۶).

انواع امواج:

اگرراستای انتشارامواج وارتعاش ذرات موازی هم باشندامواج را امواج طولی یاامواج نوع L می نامند.چنانچه راستای انتشارامواج عمود برراستای ارتعاش ذرات باشدامواج رابرشی یاعرضی یانوع S می نامند (۷)،(۶)،(۵)،(۲)،(۱). غیرازموج عرضی سادهانواع دیگری ازموجهای عرضی بنامهای امواج سطحی یا Rayleigh، امواج Love وامواج ورقه‌ای Plate یا Lamb وجوددارند (۲). موج سطحی موجب حرکت ذرات محیط درمسیربیضی گون،بصورت حرکت ترکیبی در راستای انتشاروعمودبرراستای انتشارمی شود (شکل ۱-۱).

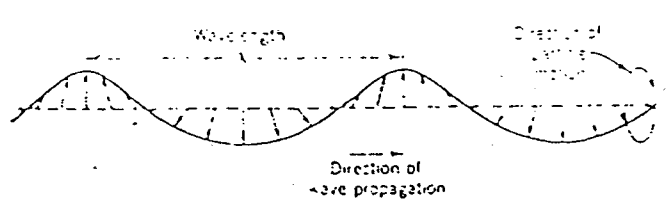


Figure 1-1 Surface (Rayleigh) waves. The particles on the surface of a solid move in an elliptical path. (After Krautkramer) (۲)

دامنه این حرکت بصورت اکسپونانسیل با افزایش عمق کاهش می یابد،درعمق یک طول موج ازسطح،دامنه ارتعاشات کمترازا/۰ دامنه موج درسطح است (۲).

نوع دیگرامواج عرضی امواج Love می باشدکه درشکل (۲-۱)

نشان داده شده است . این نوع موج در یک لایه نازک، کشیده شده بر روی بدنه انتشار می یابد. راستای ارتعاش ذرات لایه بموازات سطح جسم و عمود بر راستای انتشار می باشد (۲).

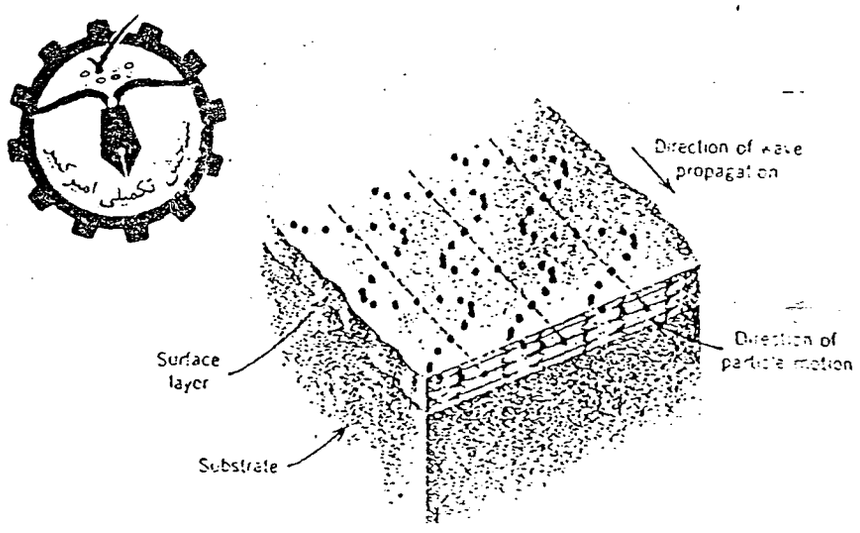


Figure 1-2 Love waves propagate in a thin surface layer which is lying on top of a substrate consisting of another material. (۲)

امواج تولید شده در صفحه ای که ضخامتش قابل قیاس با طول موج باشد، را امواج Lamb یا Plate می نامند (۲).

امواج طولی :

امواج طولی برا حتی تولید و آشکار می گردند (۱). آنها می توانند در مایعات، جامدات و گازها انتشار یابند و با سرعت بالا حرکت کنند (۷)، (۶)، (۵)، (۲)، (۱). همچنین طول موج آنها در اکثر اجسام کوچک است (۵)، (۱). طول موج این امواج در اکثر اجسام در مقایسه با ابعاد سطح مولد ارتعاش کوچک است (۱).

سرعت این امواج در یک جسم جامد بوسیله رابطه زیر بدست می آید (۵)، (۲)، (۱):

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

مدول بانک E_r = سرعت C =

نسبت پواسیون μ = دانسته جسم ρ =

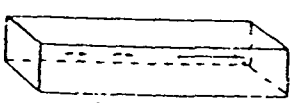


Figure (۱-۵) Representation of particle movement due to Longitudinal wave (۱)

سرعت انتشار موج تابع نسبت قطر مقطع محیط انتشار بر طول موج است و با افزایش این نسبت زیاد می گردد (۵)، (۱). سرعت این موج در مایعات و گازها توسط رابطه زیر بدست می آید (۲)، (۱):

$$C = \sqrt{\frac{1}{\rho B_{ad}}} \qquad (۱)، (۲)$$

دانسیته ρ = ، تراکم پذیری آدیاباتیک B_{ad} =

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho B_{is}}} \qquad (۱)$$

نسبت گرماهای ویژه K =

دانسیته ρ =

$$C = \sqrt{\frac{KP_0}{\rho}} \qquad (۲)$$

تراکم پذیری دردمای ثابت B_{is} =

فشار استاتیکی P_0 = (در گازها)

امواج برشی :

شکل (۴-۱) نشاندهنده حرکت ذره بعلت موج عرضی تولیدشده در جسم، بواسطه بکارگیری یک نیروی برش روی یک صفحه از جسم ، می باشد (۱). با توجه به شکل (۵-۱) کل جسم بصورت عرضی ارتعاش می نماید. در اجسامی که هیچگونه الاستیسیته ای در برابر برش ندارند (مثل مایعات و گازها) انتشار امواج عرضی غیرممکن است (۷)، (۶)، (۵)، (۲)، (۱). سرعت موج عرضی در حدود ۴۸٪ سرعت موج طولی در همان ماده است. بهمین علت طول موج آن نیز

کوتاهتراست (۵)،(۲)،(۱). سرعت این امواج درجامدات بوسیله رابطه زیر مشخص می گردد. .

$C = \sqrt{G/\rho}$

مدل برشی $G=$ دانسیته $\rho=$ (۵)،(۲)،(۱)

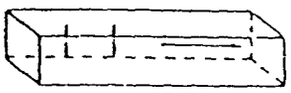


Figure 4-4 Particle movement due to shear waves (1)

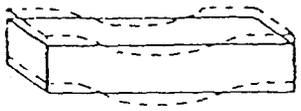


Figure 4-5 Total vibration of a body due to shear waves (1)

امواج سطحی :

چنانچه سطحی از یک جسم مانند تولید امواج برشی مرتعش شود موج را موج سطحی می نامند. موج حاصله تنها روی سطح منتشر می گردد بدون این که بداخل جسم نفوذ نماید (۵)،(۱). .

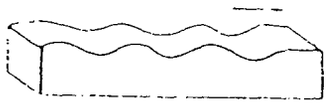


Figure 4-6 Surface wave (1)

طول موج این امواج بی نهایت کوچک است و سرعت آنها ۰/۹ سرعت موج برشی است (۱). .

$C=0.9\sqrt{G/\rho}$

البته برای بدست آوردن سرعت موج سطحی درجامدات رابطه زیر را نیز داده اند (۵)،(۲). .

$C\cong 0.02\sqrt{G/\rho}$

سرعت امواج طولی می تواند در میله های بلند که نسبت قطر به طول موج آنها خیلی کمتر از یک است، توسط رابطه $\sqrt{E/\rho}$ بدست آید (۲)،(۵). .

مدول الاستیسیته $= E$ دانسیته $= \rho$

غیر از تقسیم بندی فوق ، امواج را بدو دسته سطح Plane وکروی Spherical نیز تقسیم می نمایند. امواج سطح وقتی بوجود می آیند که سطحی تخت ، تولید ارتعاش نماید. در این صورت نقاط هم فاز امواج صادره روی سطوح تخت موازی قرار خواهند داشت ، برای تولید امواج کروی منبع ، نقطه‌ای یا متمرکز باید باشد. در این صورت نقاط هم فاز امواج روی سطوح کروی متحدالمرکز قرار خواهند داشت . .

امواج صوتی را بلحاظ فرکانس نیز تقسیم‌بندی می نمایند. امواج قابل شنیدن Audible باند فرکانس ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز را می پوشانند. امواج زیر ۲۰ هرتز را زیرشنوایی Infrasonic و امواج بالاتر از ۲۰ کیلوهرتز را فوق شنوایی Ultrasonic می نامند. لازم به ذکر است که اصطلاحات ماوراء صوت Supersonic ، صوتی Sonic و مادون صوت Subsonic مربوط به سرعت می باشند و نباید برای فرکانس بکار برده شوند. .

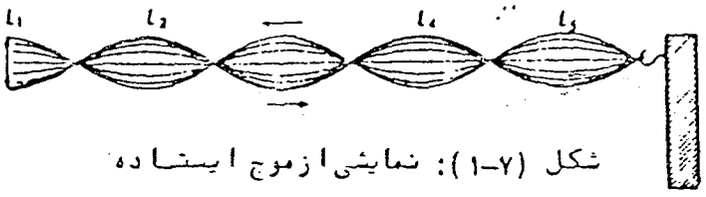
امواج صوتی می توانند همانند سایر امواج منعکس شوند (Reflection) انکسار پیدا کنند (Refraction) یا پراش داشته باشند (Diffraction) . (۱) ، (۲) ، (۴) ، (۵) .

طول موج:

طول موج عبارت است از طول مسیری که موج در زمان یک پریود طی می کند و از رابطه $\lambda = \frac{C}{f}$ بدست می آید که در آن f فرکانس ارتعاش می باشد. .

امواج ایستاده :

تقریبا " تمام صوتهای حاصل از سیمهای موسیقی، درنتیجه تشکیل امواج ایستاده بوجود می آیند. موجهای ایستاده را میتوان درهرنوع ماده اعم از جامد، مایع، یا گاز بوجود آورد و برای تولید آنها کافیست دو دسته موج هم فرکانس را درخلاف جهت یکدیگر در محیط مورد نظر انتشار داد. درشکل (۷-۱) نمونه‌ای از موج ایستاده عرضی در یک طناب نشان داده شده است .



شکل (۷-۱): نمایشی از موج ایستاده

چنانچه ملاحظه میگردد قسمتهائی از این موج دارای حداکثر دامنه اند، که شکم (Loop) نامیده میشوند و قسمتهائی که دارای حداقل دامنه اند که در واقع ثابتند و گره (Node) نامیده میشود (۶)، (۵).

۲-۱)- تاریخچه اولتراسونیک :

موج اولتراسونیک بطور طبیعی بخشی از امواج صدای خفاشها را تشکیل میدهد (۱۲ هرتز تا ۷۰ کیلوهرتز)(۱). حدود یکصد و سی سال پیش شخصی بنام Rodolph Koeing (کسانیکه حد بالای شنوایی انسان) توانست ارتعاشات اولتراسونیک را تولید نماید و متعاقب آن وسایلی نظیر دیاپازون Tuning fork، میله یا تیغه‌های فولادی Steel bars و لوله‌های ارگ Organ pipes را برای تولید ارتعاش در هوا در فرکانس ۴۰۹۶ HZ تا ۹۰۰۰۰ HZ ساخت (۲).

در سال ۱۸۸۳ شخصی بنام P.Galton لوله مولد موج اولتراسونیک

(سوت اولتراسونیک) کاملتری نسبت به لوله Kooing با فرکانس قابل تغییر در قلمرو شنوایی وفوق شنوایی تا ۲۵ کیلوهرتز ساخت . در سال ۱۹۰۷ شخصی بنام Altberg برای کشف واندازه‌گیری امواج اولتراسونیک در هوا با فرکانس ۲۰۰ کیلوهرتز وسیله‌ای ساخت . او برای تولید امواج اولتراسونیک از تخلیه الکتریکی خازن استفاده نمود . تولد تکنولوژی اولتراسونیک را شاید بتوان در زمان جنگ جهانی اول ، توسط پروفسور P. Langevin ، برای مقابله با زیردریایی هایی که نیروی دریایی فرانسه را تهدید می نمودند ، دانست . وسیله ساخته شده او توسط کریستال کوارتز تولید ارتعاشات اولتراسونیک با قدرت زیاد در آب می نمود . باید دانست که خواص پیزوالکتریک کریستال کوارتز حدود سی وپنج سال قبل از آن کشف شده بود ولی عملاً" مورد استفاده قرار نگرفته بود (۲) . براساس اظهار منابعی (۱) از اولتراسونیک در سالهای جنگ اول (۱۸-۱۹۱۴) برای یافتن زیردریایی ها ، استفاده گردید .

در سال ۱۹۲۷ خواص و اثرات اولتراسونیک نظیر تجمع و توده‌ای شدن ذرات (Agglomeration) (در اثر امواج ساکن قوی در ناحیه گره ها) ، امولوسیون سازی (Emulsification) (خرد کردن و پراکنده کردن ماده‌ای در داخل ماده دیگر زمانی که در حالت عادی با هم قابل مخلوط شدن نیستند) ، پراکندگی کلوئید (Dispersion of colloid) ، اتمیزه شدن مایعات (Atomization) ، ذره ذره شدن و خرد شدن اجسام شکننده (Fragmentation) ، انهدام گلبولهای قرمز خون و پدیده‌های گوناگون ناشی از حرارت . اسکاکی توسط Wood و Loomis کشف گردیدند (۱) ، (۲) . برای تولید امواج ، آنها از دیسکهای کوارتز غوطه‌ور در روغن که بوسیله ولتاژ ۵۰،۰۰۰ ولتی تحریک می شوند ، استفاده نموده و امواجی با فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز تا ۷۰۰ کیلوهرتز تولید نمودند .

تا سال ۱۹۴۶ ، علی رغم مطالعات زیادی که در این زمینه صورت گرفته

بود ،هنوزا ولتراسونیک بعنوان وسیله‌ای برای تولیدوانجام فرآیندبکار گرفته نشده بودُبعد ازاین زمان بودکه‌این پدیده‌ازحیطه آزمایشگاه‌پا به بازارنهاد ودرسالهای بعدازجنگ دوم جهانی ماشین آلات اولتراسونیکی زیادی تولیدگشتند(۲).

غیرازاستفاده‌ازاولتراسونیک درانجام فرآیندها ،ازآن برای یافتن عیوب درموادا ستفاده‌گردیده‌است .اولین باردرسال ۱۹۲۹ شخصی بنام Sokolov کاربرد آنرابرای‌این منظورپیشنهادنمود، درآن زمان وبعدازآن موج پیوسته‌برای مطالعهٔ انتقال صوت ازمرزجدایی موادودرون بدنه‌ها بکاررفت وفعالیت هایی برای ساخت سیستم های نمایشگرمناسب صورت گرفت. درزمان جنگ جهانی دوم روش پالس - اکو(Puls-echo Technique)پایه گذاری گردید وافرادی نظیر Firestone درآمریکا و Sproule در انگلستان مطالعات زیادی دراین زمینه‌انجام دادند(۲).

میل به‌کاربرداولتراسونیک برای ماشین کاری دردهه‌های اخیربدلیل محدودیت های این روش فروکش نموده‌است ومعمولا" تنها برای دریل کاری و ایجادسوراخ درقطعات شکننده‌ازآن استفاده می شود .درحالیکه‌کاربرد اولتراسونیک برای تست غیرمخرب ،درامورپزشکی وبرای سایرفرآیندها همواره‌تحت مطالعه‌وتکمیل وتوسعه‌کاربرد بوده‌است .

۴-۱)- ماشین کاری بااامواج اولتراسونیک :

همانطورکه‌درتعریف‌آمد ،ماشین اولتراسونیک ازنوسانات فرکانس زیادسرابزار،حضورکل سایینده استفاده‌نموده ،عمل برادەبرداری رابانیروی مکانیکی میکروسکوپی امکان پذیرمی سازد .شکل(۸-۱) بطورشماتیک ساختار اجزای آن رانشان میدهد(۸). جداول (۱-۱)و(۲-۱) بعضی ازخصوصیات مهم ماشین کاری اولتراسونیک رانشان میدهند(۸).

TABLE (1-1) Typical Values for USM Operating Parameters (6)

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) (35° to 40°F [2° to 5°C] desirable)
Vibration amplitude	0.0005 to 0.0025 inch [0.013 to 0.063 mm] (method 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
Work 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 μin [0.51 to 0.76 μm]

TABLE (1-2) Typical USM Operating Conditions (8).

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	800
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

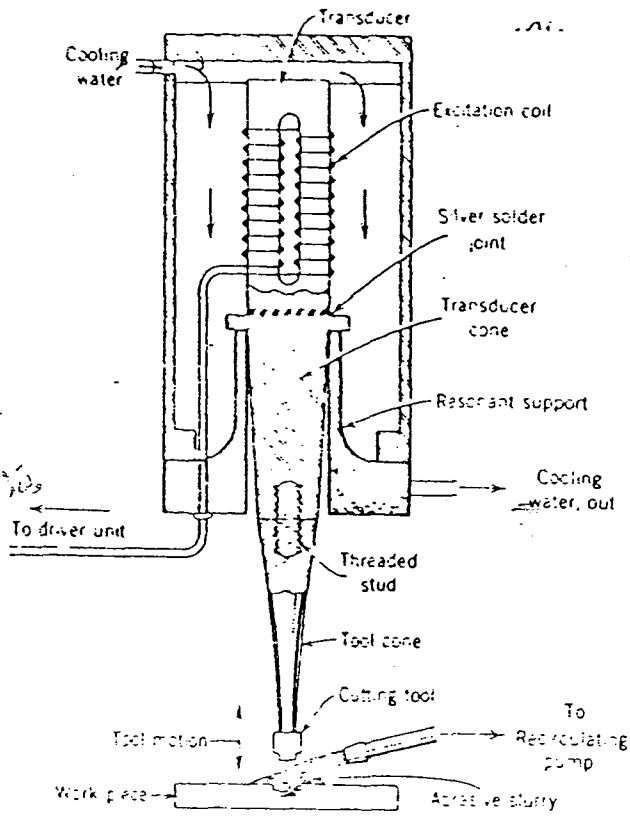


Figure (1-8) This schematic drawing shows a typical magnetostriction transducer and tool assembly that is used to cut a hole in a workpiece by means of ultrasonic impact machining. (Sheffield Corp.) (2)

۱-۴-۱)- اجزای مهم ماشین اولتراسونیک :

قسمتهای مهم واساسی ماشین اولتراسونیک عبارتنداز (۵):

۱- ژنراتور Generator

۲- ترانسدیوسر Transducer

۳- متمرکزکننده Mechanical Transformer or concentrator

۴- ابزار Tool

۵- قطعه‌کار Work piece

۶- سیستم گل ساینده Abrasive slurry system

۷- سیستم بارگذاری استاتیک Static loading system

در این قسمت راجع به هریک از این اجزاء بحث می گردد..

System mechanical components

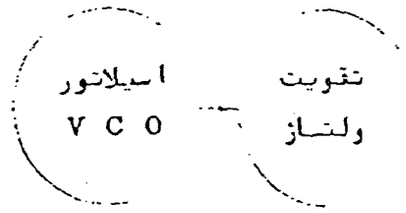
۱-۱-۴-۱)- ژنراتور:

ژنراتور اولتراسونیک تامین کننده انرژی بوبین هسته اولتراسونیک است .وظیفه این ژنراتور تامین انرژی نوسانی هسته اولتراسونیک است .این ژنراتور درواقع ازچندطبقه تشکیل شده است که شامل اسیلاتور- طبقه تقویت ولتاژ- طبقه قدرت اولیه وطبقه قدرت نهائی است . .

اولین طبقه ژنراتور ،طبقه اسیلاتور یا نوسان ساز است وظیفه این طبقه ایجاد موج سینوسی با فرکانس دلخواه (در محدوده کاری مثلا" ۱۸ تا ۳۰ کیلو هرتز که اکثرا" حدود ۲۱ کیلوهرتز مورد نظراست)میباشد .معمولا"ژنراتور را طوری می سازند که بتوان در قلمرو محدودی فرکانس را تغییرداد (مثلا" ۲۱ KHZ± ۱۰۰HZ) (۹)،(۱۰)، مدارهای مختلفی برای اسیلاتور وجود دارد اما چون اسیلاتور مورد استفاده این دستگاه باید از پایداری زیادی برخوردار باشد (تغییرات فرکانس آن بسیار جزئی است)بهتر است که از اسیلاتورهای چندطبقه که شامل طبقات تنظیم گین ودامنه وغیره است استفاده گردد .همچنین بهتر است از اسیلاتوری استفاده شود که فرکانس آن قابل تنظیم با ولتاژ ورودی است (VCO)(Voltage controlOscillator) البته اسیلاتورهای مختلف دیگری هم بصورت ترکیبی از IC های مختلف وجود دارند که میتوان از آنها بعنوان اسیلاتورهای کنترل شده با ولتاژ استفاده کرد (۱۱)..

طبقه بعدی قسمت تقویت ولتاژ است.وظیفه این طبقه همانطورکه از نامش پیداست تقویت دامنه موج سینوسی حاصل از طبقه اول است .موجی که طبقه اسیلاتور ایجاد میکنددرحدود ۵ ولت (درصورت استفاده از اسیلاتورهای IC)

وحداکثر تا حدود ۱۵ ولت است که باید برای استفاده در طبقات بعدی تقویت شود. برای این منظور طبقه دوم ولتاژ طبقه اول را تقویت می کند پس از این طبقه، طبقه تقویت جریان اولیه وجود دارد و احتمالا" ممکن است نیاز به استفاده از طبقه دیگری برای تقویت جریان باشد..

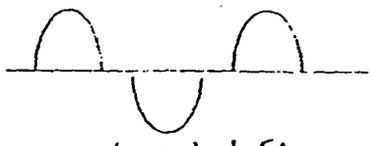


شکل (۹-۱).

در سه طبقه اول این ژنراتور اشکال زیادی وجود ندارد اما طبقه آخر یعنی طبقه قدرت ناشنوبه از مشکلترین قسمتهای این ژنراتور است..

دلیل این امر آنست که باری که به خروجی این ژنراتور وصل می شود یک بار اهمی ساده نیست بلکه یک اندوکتانس تقریبا" بزرگ و در فرکانس نسبتا" بالاست و با توجه به این که امپدانس این بار از رابطه $L\omega=2\pi fL$ بدست می آید چون هم L و هم f خیلی زیاد است بار دارای امپدانس خیلی بالائی است و برای این که جریان مثلا" ۱۰ آمپری به آن تزریق شود به ولتاژ خیلی بالائی احتیاج می باشد (بالاتر از کیلوولت) که این امر با مدارهای ترانزیستوری ممکن نیست. پس باید با اصلاحی در مدار اثر سلفی را تقلیل داد این کار با استفاده از خازن امکانپذیر می باشد..

در مورد راندمان ژنراتور، راندمان طبقه اسیلاتور و طبقه تقویت ولتاژ چندان مهم نیست. چون این طبقات توان بسیار کمی در مقایسه با توان اسمی ژنراتور مصرف می کنند طبقه ای که راندمان ژنراتور را تعیین می کند طبقه قدرت است اگر طبقه نهائی بصورت تقویت کننده Push-Pull کلاس A بسته شود از نظر تئوری راندمان آن ۷۸٪ خواهد بود اما در این صورت اعوجاج Cross over پدید می آید یعنی شکل موج به صورت شکل (۱۰-۱) خواهد شد (۱۱)..



شکل (۱۰-۱)

برای اینکه چنین نشود از Push Pull کلاس AB استفاده میشود که راندمان آن کمی کمتر خواهد شد (۱۱).

درنهایت با توجه به طبقات قبلی وتوان مصرفی آنها اگر راندمان تقویت کننده به حدود ۷۰٪ برسد بسیار مناسب خواهد بود.

۲-۱-۴-۱)- ترانسدیوسر:

برای تبدیل نوسانات الکتریکی به ارتعاشات مکانیکی ۲ روش وجود دارد. درروش اول از خاصیت پیزوالکتریک بعضی کریستالها استفاده می گردد و در روش دوم که یک روش مغناطیسی است، از یک سیم پیچ که بدور هسته‌ای مغناطیسی پیچیده شده است استفاده می شود. هسته درخلال یک سیکل مغناطیس شوندگی، که در اثر عبور یک جریان متناوب با فرکانس بالا از سیم پیچ بوجود می آید، تغییر طول می دهد. در ماشینهای اولتراسونیک مدرن از این روش برای تولید ارتعاشات استفاده می گردد. هسته ترانسدیوسر شامل یک توده ورقه ورقه نازک می باشد که از فلزی ساخته شده است که دارای حداقل سطح هیسترزیس وبیشترین مقاومت الکتریکی می باشد. هسته را بدین جهت بصورت ورقه ورقه می سازند تا بتوانند افت فوکو (جریان ادی Eddy current) را کاهش دهند وانرژی اتلافی را بحداقل برسانند وازطرفی هسته بتواند تغییر طول ماگزیمم را با تحمل تنش ها وحداقل آسیب پذیری در میدان مغناطیسی بدهد. همچنین جنس مورد استفاده برای هسته، باید مقاومت خوبی در مقابل خستگی داشته باشد. در میان مواد فرومغناطیس عموما "از نیکل و یا آلیاژهای

آن برای اینکار استفاده می گردد (۱۰)، (۹). شکل زیر (شکل ۱۱-۱) ۲ ترانسدیوسر مغناطیسی را نشان می دهد برای توانهای بالای ۲۵۰ وات از آب خنک کـــــن (Water Jacket) برای خنککاری استفاده میگردد. البته این روش بـــرای ترانسدیوسر نوع شکل (۱۱-۱i) مشکل است. لذا از نوع (۱۱-۱i) کـــه دارای سیستم خنککاری راحت تر و جمع وجورتری است، برای توانهای بالای ۲۵۰ وات استفاده می گردد. که البته دارای راندمان طرح i نمی باشد (۱۰)، (۹).

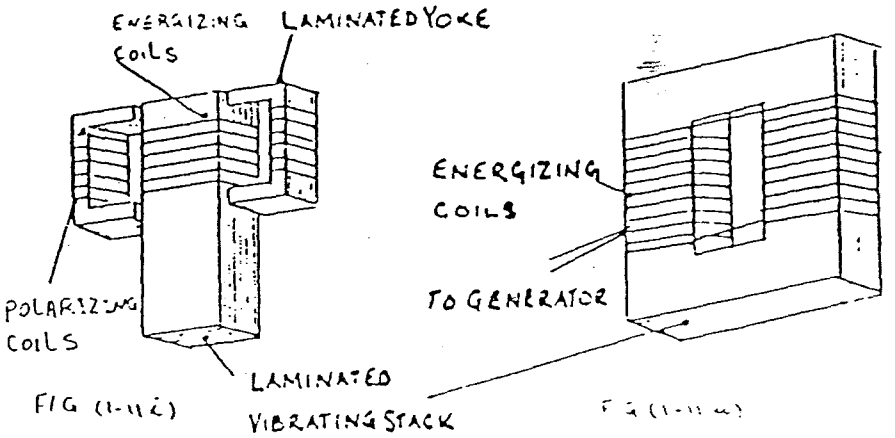


FIG (1-11i)

" نکات مربوط به طراحی ترانسدیوسر در قسمتهای بعدی به تفصیـــل خواهند آمد. "

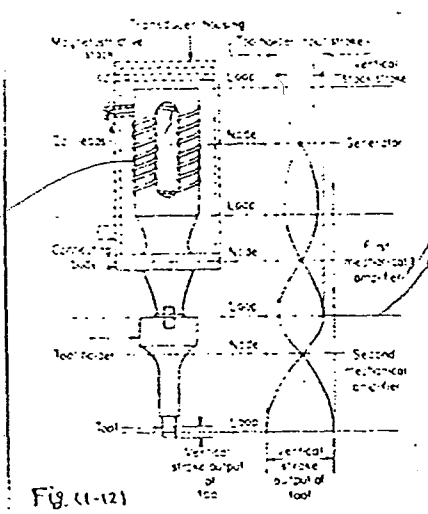


Fig. (1-12)

جنس ابزار	جنس قطعه کار	
	شیشه	تنگستن کاربابد
مس	۱:۲۰۰	-
فولادنرم	۱:۱۰۰	۱:۱/۴
فولادنقره‌ای	۱:۲۲۰	۱:۲/۸۵
فولادفدزنگ	۱:۱۴۵	۱:۲/۸۱
برنج	۱: ۵۰	۱: ۰/۷
تنگستن کاربابد	۱:۱۰۰۰	۱: ۰/۹

جدول (۳-۱): نسبت سایش ابزار به سایش قطعه‌کاربرای ابزارها وقطعات کارمختلف (۱۰)، (۹).

نتایج رضایت بخشی ازابزارهائی با جنسهای چقر (Tough) وغیر شکننده وغیرترد (Ductile) بدست آمده است (۵)، (۶)، (۳)، (۲)، (۱).
نمونه‌هائی ازاین ابزارها عبارتنداز: فولادهای فدزنگ وآلیاژی، فولاد نرم، فولادکربن متوسط (۱۰)، (۹)، مونل متال ومولیبدنیم (۸).

جدول (۴-۱) اثرجنس ابزاررا روی نرخ براده‌برداری نشان میدهد (۸).

جدول (۵-۱) سایش ابزاررا برای جسمهای مختلف نشان میدهد در این جدول ذرات ساینده B_4C با مش ۱۰۰ می باشد (۸).

ابزاربایدبه‌سادگی قابل ماشین کاری باشدولی بایدحداقل سایش را درعمل ماشین کاری اولتراسونیک داشته باشد. جنس ابزاربابد نسبت به خستگی مقاوم باشد (۲)، (۵). بهمین خاطرانبارابزاراحتیاج به مراقبت خاص داردچراکه دراثرهرگونه خراش یا ترک ریز، شکست ابزاردراثرخستگی خیلی سریع رخ می دهد (۱۲)، (۸). لازم به ذکراست که موادنرم برای ابزارمناسب نیستندچراکه درهنگام ماشینکاری، مخصوصا" دردامنه‌زیاد، دچارتغییرفرم

بلاستیک می گردندوروی آنها پلیسه هائی بوجودمی آید .همچنین مواد نرم انرژی مکانیکی را جذب نموده وبه حرارت تبدیل مینمایند (۱۰)، (۹)، (۵).هر چه ابزار بلندتر انتخاب گردد با تغییرفرم الاستیکی جانبی، که ابزار هنگام کاهش و افزایش طول می دهد احتمال داردکه سوراخ ایجاد شده کشیده گردد (۱۲)، (۱۰)، (۹)، (۵). این پدیده دراثرضربه های جانبی ابزار به گل ساینده ودیواره اطراف سوراخ بوجودمی آید .لذا برای کم کردن این احتمالات بهتر است که حتی الامکان ازابزارکوتاه استفاده گردد (۱۲)، (۱۰)، (۹)، (۵). جرم ابزارنیزدارای اهمیت است.چراکه ابزارهائی که دارای جرم زیادمی باشند انرژی اولتراسونیک ودرنتیجه راندمان ماشینکاری راکاهش میدهند (۱۲).

TABLE(1-4) Effect of Tool Material on Cutting Rate (8).
(Soda glass work material, B,C abrasive, optimum static load at 22 kHz)

TOOL MATERIAL	TOOL SHAPE	CUTTING RATE, mm/min			
		Amplitude = 0.002 in		Amplitude = 0.001 in	
		Abrasive 100 mesh	Abrasive 400 mesh	Abrasive 100 mesh	Abrasive 400 mesh
Copper	Circular, 12.7 mm dia.	0.063	0.020	0.015	0.006
Brass (BSS 251)	Circular, 12.7 mm dia.	0.090	0.028	0.022	0.008
Mild steel (EN2)	Circular, 12.7 mm dia.	0.085	0.022	0.021	0.007
Silver steel	Circular, 12.7 mm dia.	0.074	0.022	0.020	0.008
Stainless steel (18% Cr, 8% Ni, 0.1% C)	Circular, 12.7 mm dia.	0.071	0.020	0.018	0.006
Tungsten carbide	Triangular, 19 mm base	0.156	0.100	0.035	0.030
Mild steel (EN2)	Triangular, 19 mm base	0.150	0.102	0.035	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.	2.18	0.56	0.53	0.18
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	3.96	2.54	0.97	0.76
Mild steel (EN2)	Triangular, 3.2 mm base	3.81	2.59	0.91	0.74

SOURCE: Adapted from E. A. Neppiras and R. D. Fawcett, p. 302.
*Averaged over about 0.1 inch (2.5 mm) penetration.
†0.87% C, 0.022% S, 0.025% P, 0.28% Mn, tempered in air after conquenching from 830°C.

TABLE(1–5) Tool Wear for Various Tool Materials Cutting with 100 Mesh B_4C Abrasive (8).
(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		Total penetration in workpiece		Tool wear as % of stock removal	Longitudinal tool wear		Total penetration in workpiece		Tool wear as % of stock removal
		in	mm	in	mm		in	mm	in	mm	
Copper	Circular, 1/2 in [12.7 mm] dia.	0.0025	0.063	0.520	13.2	0.48	–	–	–	–	–
Mild steel (EN2)	Circular, 1/2 in [12.7 mm] dia.	0.018	0.46	1.650	42.0	1.0	0.110	2.79	0.125	3.18	88
Silver steel†	Circular, 1/2 in [12.7 mm] dia.	0.0025	0.063	0.546	13.9	0.46	0.012	0.30	0.046	1.17	26
Stainless steel (18% Cr, 8% Ni, 0.1% C)	Circular, 1/2 in [12.7 mm] dia.	0.008	0.20	1.150	29.2	0.7	0.016	0.41	0.045	1.14	35
Brass (BSS 251)	Circular, 1/2 in [12.7 mm] dia	0.021	0.53	1.250	31.8	1.68	0.175	4.45	0.125	3.18	140
Sintered tungsten carbide	Triangular, 1/8 in [3.2 mm] base	0.0015	0.038	1.510	38.4	0.1	0.138	3.51	0.125	3.18	110
		Tool Steel					Tungsten Carbide				
Mild steel	Circular, hollow, int. dia. = 1/8 in [3.2 mm], ext. dia. = 1/4 in [6.4 mm]						0.156	3.96	0.125	3.18	125
Mild steel	H-form, 1/2 in [12.7 mm] square, limbs, 1/16 in [1.6 mm] thick	0.053	1.35	0.024	0.6	220					
Mild steel	Circular, hollow, int. dia = 0.33 in [8.4 mm], ext. dia = 0.39 in [9.9 mm]						0.170	4.32	0.075	1.91	222
Brass	Extrusion shape T-form, height of T = 16 mm (0.63 in)						0.256 (avg.)	6.5 (avg.)	0.125	3.18	205

SOURCE: Adapted from E. A. Neppiras and R. D. Foskett, p. 373

*Average over 0.1 inch [2.5 mm] penetration.

†0.87% C, 0.020% S, 0.025% P, 0.28% Mn, tempered in air after oil-quenching from 800°C.

برای سهولت جریان گل ساینده بداخل فاصله مابین ابزاروقطعه کـــار، گل تازه را ازمیان سوراخ ایجادشده در درون تمرکزدهنده به سرابزار میرسانند (همچنین می توان گل را ازمیان سوراخ ازپیش تعبیه شده درقطعه کار به موضع ماشینکاری تغذیه نمود)(۱۲)،(۵). .

جنس دیگری نیزبرای ابزاربکار می رودکه دراین حالت برای ماشینکاری احتیاجی به گل ساینده نیست ولی هنوزنیازبه خنک کردن موضع ماشین کـــاری وجود دارد .این ابزارکه ازنوع کامپوزیت است، Diamond Impregnated Tool نامدارد(۱۰)،(۹)،(۵). .

۵-۱-۴-۱)- قطعه کـار :

دراین روش قطعات سخت وباتردی که هادی الکتریسیته نیستند ماشینکاری می گردند (۱۲)،(۱۰)،(۹)،(۸)،(۵) .درجدول زیرموادی که بروش USM قابل ماشینکاری می باشندلیست شده اند (۸). .

TABLE(1-6) Materials That Have Been Successfully Machined Ultrasonically (8)

Agate	Composites	Limestone	Silicon carbide
Alumina	Cold rolled steel	Lithium fluoride	Silicon nitride
Aluminum oxide	Ebony	Mica	Stainless steel—hardened
Barium titanate	Ferrite	Molybdenum	Steatite
Beryllium oxide	Formica	Molybdenum disilicate	Steel—hardened tools
Boron carbide (fused)	Garnet	Mother of pearl	Ti-6A-4V
Boron composites	Germanium	Plaster of paris	Tungsten
Brass	Glass	Pyrolytic graphite	Tungsten carbide
Calcium	Glass-bonded mica	Quartz	Thorium oxide
Carbides	Graphite	Ruby	Uranium oxide
Carbon	Hardened 1095 steel	Sapphire	Uranium carbide
Ceramics	High pressure laminates	Silicon	Zirconium oxide

لازم بذکراست که دراین روش موادنرم بهیچوجه قابل ماشینکـــاری نمی باشندچراکه اولا" بخاطرتغییرفرم انرژی مکانیکی راجذب می نمایند

ثانیا " ذرات ساینده درحین عمل ماشینکاری درآنها فرومی روندوعمـــــل براده برداری تقریبا "متوقف می شود (۱۲)، (۱۰)، (۹)، (۸)، (۵).

۶-۱-۴-۱- سیستم گل ساینده : آب بهترین ماده حل کننده ذرات است

این سیستم متشکل ازگل ساینده ،وان ماشین کاری ،لوله‌های حمل گـل ساینده ،پمپ ،مخزن گل ساینده وسیستم مکش مواد حاصل ماشین کاری می باشد. مجموعه ذرات ساینده ومایع حمل کننده آن ،که می تواند آب یا روغن باشـــد، راگل ساینده می نامند (۱۲) (۱۰)، (۹)، (۸)، (۵). دراین قسمت بیشتـــــردر رابطه با ذرات ساینده از نظر نوع ،جنس ومورد کاربرد بحث می گردد .

درمیان ذرات ساینده مورد استفاده، الماس بهترین توانائی بـــــراده برداری را دارد (۱۰)، (۹)، (۸)، (۵) .ازذرات مهم دیگر می توان از بورن کاربید، سیلیکون کاربید وآلومینا نام برد .

چنانچه توانائی براده برداری برای الماس ۱ فرض شودبرای ۲ نوع ذره فوق ،این فاکتور بترتیب زیرخواهد بود (۱۰)، (۹)، (۵):

برای بـرن کاربید ۰/۶۰ـ۰/۵ این نسبت به الماس کمتر از نیمه در داخل آب خیلی خوب است ولی در روغن

برای سیلیکون کاربید ۰/۴۵ـ۰/۲۵

برای آلومینا ۰/۱۶ـ۰/۱۴

برن نیترایدنیزیکی ازذرات مورداستفاده می باشد ودرجدول زیرموقعیت آن با توجه به سختی وتوانائی براده برداری مشخص شده است (۸).

TABLE(1-7) Abrasives Used In USM (8)

ABRASIVE	KNOOP HARDNESS	RELATIVE CUTTING POWER
Diamond	6500-7000	1 0
Cubic boron nitride (CBN)	4700	0 95
Boron carbide (B_4C)	2800	0 50-0 60
Silicon carbide (SiC)	2480-2500	0 25-0.45
Aluminum oxide (Al_2O_3)	2000-2100	0 14-0 16

سنگزنی تمیز و سنگزنی فاز بابکار مطابق میرود

در بیشتر عملیات از برن کاربا ید استفاده می گردد. ذرات برن کاربا ید براحتی شکسته می شوند. لذا می توانند تیزی لازم را حفظ نمایند. درضمن دارای جرم مخصوص کم می باشدوبهمین خاطرپودربرن کاربا ید می تواندمدتهای طولانی بصورت شناوردرمایع حمل کننده باقی بماندوبراحتی جابجا گردد (۱۰) (۹)، (۵). این ماده برای ماشین کاری تنگستن کاربا ید، فولاد آبدیده و سنگهای قیمتی مورداستفاده می باشد. سیلیکون کاربا یدیا کاربورا ندوم سیاه به سختی برون کاربا یدنمی باشدولیکن براحتی شکسته می شودوکیفیت ماشین کاری خودرا برای مدت طولانی حفظ می کند. بعلت داشتن جرم مخصوص بالاتر، این ذرات نمی توانندمدتهای زیادبصورت شناوربا قی بمانند، ازضعفهای دیگرآن که ذرات سیلیکون کاربا یدبراحتی برن کاربا یدخیس نمی شوندا ما درعوض ارزان می باشدوبرای براده برداری تمام مواد بجزمواد خیلی سخت مناسب است (۱۰)، (۹)، (۵).

اکسیدآلومینیم نیزبسیارارزان است وبرای ماشینکاری شیشه وسرامیک بسیارمناسب می باشدا ما برای ماشین کارفولادسخت خوب نیست (۱۰)، (۹)، (۵).

درجدول (۸-۱) قطعات قابل ماشینکاری بوسیله هریک ازذرات فوق داده شده است (۸).

TABLE (1 -8) Selection of Abrasive (8)

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 Littlefield, Machining by ultrasonics, 1971.

درجدول (۹-۱) سرعت برش نسبی برای قطعات کار تردبا استفاده از بورن کاربایدوسیلیکون کاربایدداده شده است (۸). (دراین جدول و ۲ جدول بعدی فرض شده است که برای حالتی که قطعه کار Soda glass وذرات سا ینده B_4C با عددمش ۱۰۰ باشد، سرعت برش برابر ۱۰۰ واحداست).

TABLE (1 - 9) USM Cutting Speed Index for Brittle Work Materials (8)
(Soda glass using 100 mesh B_4C abrasive = 100)

WORK MATERIAL	ABRASIVE			
	Boron Carbide			Silicon Carbide
	100 mesh	200 mesh	400 mesh	100 mesh
Soda glass	100	90	77	85
Hyalt	73	56	54	
BS borosilicate glass	85			
Ferroxcube #IC	37			34
Ferroxcube (demagnetized)	(32)			
Quartz crystal	(57)			
Fused alumina	19			
Synthetic sapphire	19			
Synthetic ruby	18			
Flint stone	(72)			
Barium titanate ceramic	110			109
Ceramic 507	38			35
Garnet	55			
Feldspar	(40)			
Spinel	(43)			
Slate	67			
Mica ex.	(240)			(200)

SOURCE: E. A. Neppiras and R. D. Fassett, Ultrasonic machining, Physics Technology Review 19 (1958-59) p. 372.

NOTES: Tool used was mild steel, either 1/2 inch (12.7 mm) square ends or 1/16 inch (1.59 mm) in dia. see figure 10-9.

Numbers in parentheses are estimates interpolated from measurements under somewhat different conditions.

درجدول (۱۰-۱) نیزسرعت برش نسبی برای فلزات وپودرهای مختلف آمده است (۸).

جدول (۱۱-۱) سرعت برش نسبی را برای سرامیکها میدهد (۸).

TABLE(1–10) USM Cutting Speed Index for Metals (8)
(Soda glass, using 100 mesh B_4C abrasive = 100)

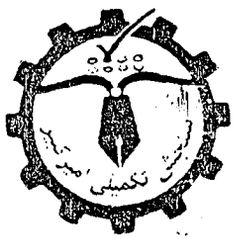
WORK MATERIAL	ABRASIVE						
	Boron Carbide			Silicon Carbide	Alumina	Sand	Diamond Powder
	100 mesh	220 mesh	400 mesh	100 mesh	220 mesh	(grit size 0.012 in)	(grit size 0.001 in)
Soda glass	100	90	77	85	65	47	90
Brass (common yellow)	6.6	5.6					
Die steels							
K.E. 672 (approx. AISI O1), R. 66	1.4	1.3					
C.S.K., R. 62	3.9	3.6					
K.E. 672 (approx. AISI O1), R. 61	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, 8.4% W, 0.35% V, 0.3% 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(1 – ۱۱) USM Cutting Speed Index for Ceramic Work Materials (8)
(Soda glass, using 100 mesh B_4C 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	25
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	8	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.



اندازه دانه‌های پودر با توجه به نوع عملیات (پرداخت کاری یا خشن کاری) تعیین می گردد.

درجدول (۱۲-۱) اندازه دانه‌ها با توجه به موردکاربرد آمده است (۸).

TABLE(1 -12) Grit Sizes Used In USM (8).

GRIT SIZE	PARTICLE SIZE	
	in	μm
Roughing		
120	0 0056	142
140	0 0048	122
170	0 0034	86
200	0 0026	66
230	0 00248	63
270	0 00175	44
325	0 00128	33
400	0 00090	23
Finishing		
500	0 00073	19
600	0 00057	14
800	0 00044	11
900	0 00038	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 0034 (86 μm x 10⁻⁶) or approximately 0 257 inch (6 53 mm)

برای سرعت برداده برداری بیشتر باید اندازه دانه‌ها بزرگ باشد (۸).

برای داشتن سرعت برداده برداری بهینه ضرورت دارد اندازه دانه‌ها اندکی کوچکتر از دامنه ارتعاشات سر ابزار باشد (نصف Peak to Peak) واز طرفی اندازه دانه‌ها باید کمتر از ۰/۱ مینیمم ابعاد جانبی ابزار باشد (۱۰)، (۹). اگر اندازه دانه‌ها خیلی کوچکتر از دامنه ارتعاشات باشد، بجای عمل برداده برداری، حرکت ابزار باعث اسپری نمودن گل ساینده می شود و انرژی صرف فرار گل و غلبهٔ اصطکاک می گردد (۱۰)، (۹).

منحنی های (۱۲-۱)، (۱۴-۱)، (۱۵-۱) تاثیر اندازه دانه ها را بر زبری سطح می دهند (۸).

واضح است که اندازه دانه های ساینده بر روی گشادی جانبی Over cut وتلرانس tolerance تاثیر زیادی دارد. زمانی که دقت ابعادی زیاد و صافی سطح خوب مورد نظر است، لازم است بیش از یک ابزار و اندازه دانه مورد استفاده واقع شود. ابزار خشن کاری باید حدود ۲-۳ برابر اندازه متوسط "دانه های ساینده خشن کاری" ، کوچکتر انتخاب گردد. سوراخهای عمیق باید در سه مرحله ایجاد شوند؛ مرحله اول با ابزار زیر اندازه (اندازه قطر سوراخ)، دانه های ساینده بزرگ و دامنه ارتعاش زیاد؛ مرحله دوم با ابزار زیر اندازه، دانه های ساینده کوچک و دامنه متوسط و مرحله سوم با اندازه ابزار نهایی (اندکی زیر اندازه قطر سوراخ)، دانه های ساینده خیلی کوچک و دامنه کوچک. تلرانس حاصل از ذرات ساینده با مش ۲۸۰ معادل ۰/۰۲۵۴ ± میلی متر و با مش ۸۰۰ معادل ۰/۰۱۲۵ ± میلی متر می باشد (۱۰)، (۹).

برای حمل مواد ساینده به ناحیه ماشینکاری به یک مایع حمل کننده احتیاج می باشد (۱۲)، (۱۰)، (۹)، (۸)، (۵). ذرات با مایع مخلوط شده و گلی را بوجود می آورد که به گل ساینده معروف است (۵). گل ساینده باید حد قابل قبولی از ماده ساینده را به محل ماشینکاری بیاورد. همچنین باید دارای قابلیت سیلان و نفوذ خوبی باشد. درصد ذرات ساینده در گل نقش مهمی دارد (۱۰) (۹)، (۵). نمودار شکل (۱۶-۱) تغییرات سرعت براده برداری را با افزایش درصد حجمی ذرات ساینده نشان می دهد (۸).

ملاحظه می گردد که با افزایش درصد حجمی ذرات ساینده در گل ساینده ابتدا سرعت براده برداری افزایش می یابد ولی از حدود ۳۰% به بالا سرعت براده برداری چندان تغییر نمی کند، چون پمپهای مکانیکی زیر غلظت ۳۰% کار می کنند لذا عملاً از غلظت های زیر ۳۰% استفاده میگردد (۱۰)، (۹).

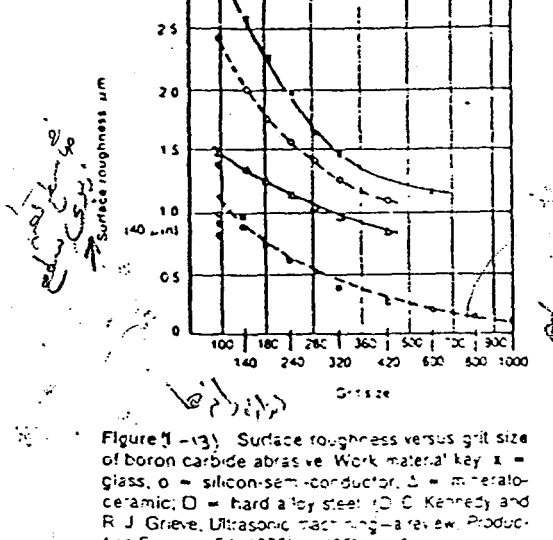


Figure 1 – 13) Surface roughness versus grit size of boron carbide abrasive. Work material: key. x = glass, o = silicon-semiconductor, Δ = mineralo-ceramic; □ = hard alloy steel. (D. C. Kennedy and R. J. Grieve, Ultrasonic machining—a review. *Production Engineer* 54 (1975), p. 485) (8).

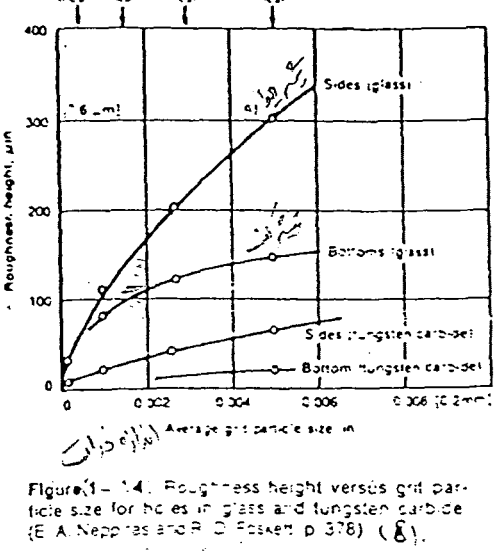


Figure 1 – 14) Roughness height versus grit particle size for holes in glass and tungsten carbide (E. A. Neppiras and R. D. Foskett, p. 378) (8).

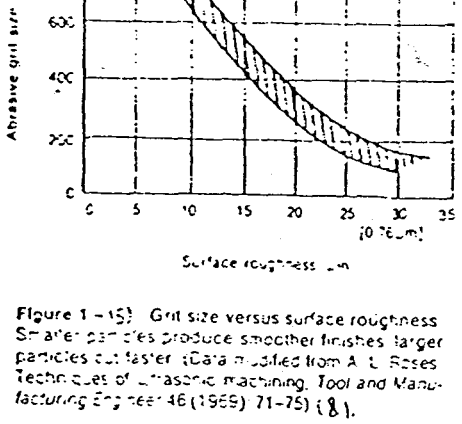
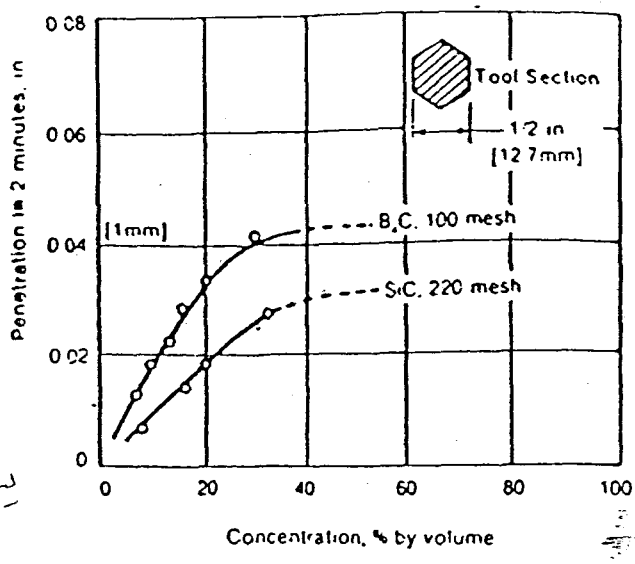


Figure 1 – 15) Grit size versus surface roughness. Smaller particles produce smoother finishes; larger particles cut faster. (Data modified from A. L. Roses, Techniques of ultrasonic machining, *Tool and Manufacturing Engineer* 46 (1969) 71–75) (8).



Figure(1-16) Penetration in glass as a function of slurry concentration. (E. A. Neppiras and R. D. Foskett, p. 373) (8).

چنانچه در بخش قبلی بیان گردید برای سهولت جریان گل به موضع ماشینکاری سوراخی در ابزار یا قطعه کار تعبیه می نمایند در حالاتی که این سوراخ وجود ندارد و عمل رساندن گل به موضع ماشینکاری بطرق معمولی انجام می شود توصیه میگردد که غلظت گل ساینده کم باشد[۱۲] این اجازه می دهد که ذرات براحتی به مرکز موضع ماشینکاری برسند و همچنین سیلان گل را نیز راحتتر می نماید، ولی باید گفت که نرخ برشبرداری برای سطح مقطعهای بزرگ کم میگردد (۱۲). مایع حمل کننده ذرات ساینده باید دارای خصوصیات زیر باشد (۱۰)، (۹):

۱ـ خاصیت خنک کنندگی خوب؛ عدم خنک شدن موضع ماشین کاری باعث نرم شدن ابزار و قطعه کار می شود، در این صورت نه تنها انرژی مکانیکی ارتعاشات اتلاف میشود، بلکه فرورفتن ذرات ساینده بداخل سطح قطعات باعث ایجاد یک لایه سخت برروی قطعه کار شده و عملاً" برادهبرداری را متوقف مینماید

۲ـ قابلیت ترکنندگی و نفوذ خوب به مواضع تنگ (خاصیت موئینگی).

۳ـ ایجاد پاندولی مناسب بین سرابزارودانه‌های ساینده‌وقطعه‌کار.

۴ـ داشتن ضریب هدایت حرارتی بالا.

۵ـ داشتن هدایت الکتریکی خوب؛چراکه دراثرارتعاش،الکتریسیته ساکن بوجودمی آیدکه بایدازمحل ماشینکاری تخلیه گرددوگرنه ذرات ساینده تحت میدان الکتریکی بهم می چسبندودلمه می شوند(Electro-phoresis) (۱۰)،(۹)،(۵).

پس برای تهیه‌گل ساینده‌به‌یک مایع باویسکوزیته‌کم احتیاج میباشد که‌دارای خاصیت ترکنندگی خوب،هدایت حرارتی وگرمای ویژه‌بالاباشد. آب مایعی است که‌تقریبا" تمام این مواردرا تامین می نماید(۱۰)،(۹)،(۵). لازم به‌ذکراشت که‌گل ساینده‌بایدازآلودگی به‌موادی چون روغن وگریس محفوظ باشد(۱۰)،(۹). بهترین خنک کن برای ابزارDiamondImpregated tool پارافین می باشد.درجه‌حرارتی که‌برای گل ساینده‌توصیه می شود بین۲۰-۲۵°C می باشدکه‌این درجه‌حرارت باید درسیکل گردش گل ثابت نگهداشته شود(۱۲). ذرات ساینده‌رابعدازمدتی دورمی ریزندچون اولا" ذرات کند می شوندوثانیا" براده‌های حاصل ماشین کاری درگل بصورت شناوردرآمده وخاصیت گل ساینده‌ازدست می رود(۵). اگرذرات حاصل ماشین کاری ازمواد فرومغناطیس(آهن ـ نیکل ـ کبالت) باشدمی توان بوسیله‌آهن رباآنها را ازگل ساییده‌جدا نمود(۵).

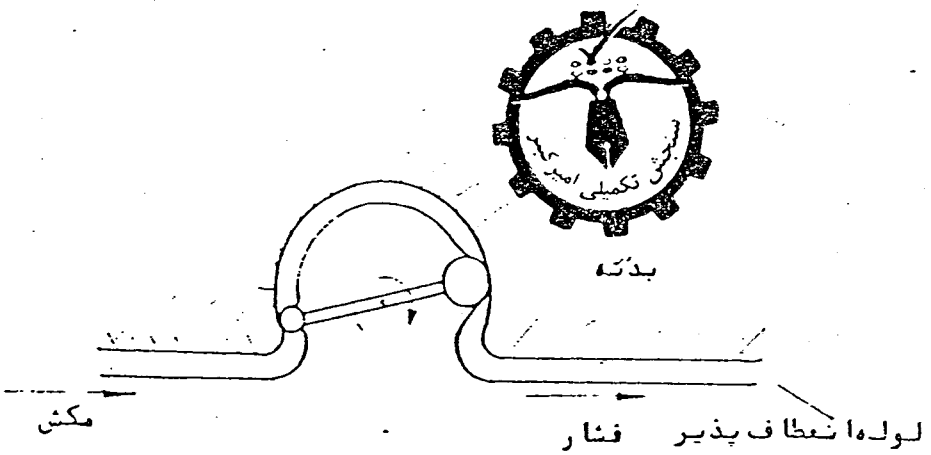
جزء دیگردرسیستم گل ساینده‌پمپ می باشد.ازآنجائی که‌سایش مکانیکی Erosionوفرسایش شیمیایی Corrosion دراینجازیاداست بهمین علت‌ازپمپهای مخصوصی مانندپمپ شکل (۱۷-۱) استفاده می شود. دراین پمپ باگردش بازوگل ساینده‌ازمیان لوله‌انعطاف پذیربه‌طرف جلو هل داده‌می شود(۵).

کلیه‌اجزاء سیستم گل ساینده‌نظیرلوله‌های انتقال گل،وان ماشینکاری

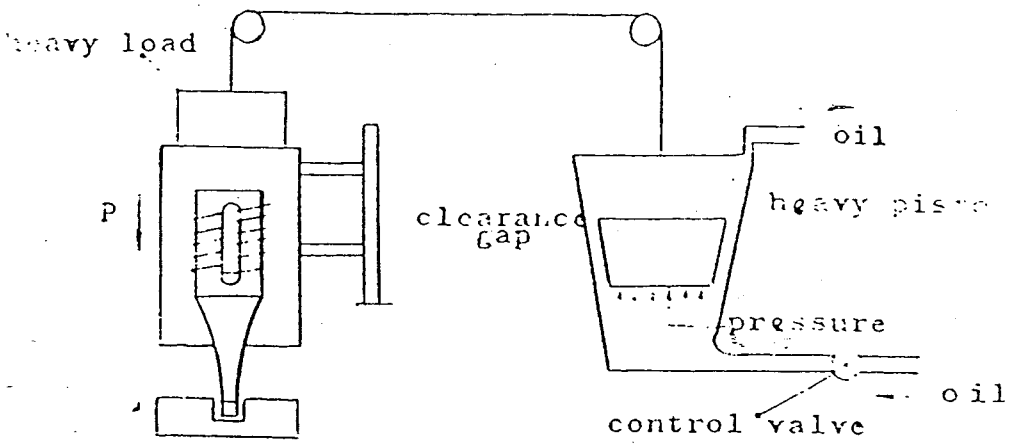
مخزن گل وسیستم مکش مواد حاصل برادهبرداری باید درمقابل سایش مکانیکی وخورندگی شیمیایی مقاوم باشندومعمولا" آنهارا ازجنس فولادضد - زنگ ویا پلی مرها انتخاب می نمایند (۵). برای مکش مواد حاصل برادهبرداری ازموضع ماشین کاری ازپمپ خلا استفاده میشودوترتیبی اتخاذ می گرددکه ازنفوذگل بداخل پمپ خلا جلوگیری بعمل آید. اجزاء بدنه وحرکت ماشین باید بخوبی پوشیدهشده باشند،تاذرات گل سایندهوبخارمایع حامل ذرات بهآنها صدمه نزند. شاید ضرورت داشته باشد،باقراردادن اجزاء حساس نظیرگیربکس ها، پولی ها ،بلبل اسکروها ،یاتاقانهای حرکتی وغیره درداخل جعبههای بسته، بااعمال هوای فشردهخشک وتمیزمحیط راازنفوذعناصرخارجی حفاظت نمود (۵).

۷-۱-۴-۱)- سیستم بارگذاری استاتیک :

ضرورت داردنیروی فشاری معینی ابزاررا بهسطح قطعهکاربفشارد. مقدارنیروبرحسب جنس قطعهکار،جنس ابزاروشکل آن وجنس ونوع گل سایندهحداپتیمیی برای ماکزیمم سرعت برادهبرداری دارد. معمولا" سیستمبارگذاری استاتیک درطول فرآیندهمواره بار ثابتی رادرحدتنظیمی،اعمال وحفظ می نماید. این سیستم می تواندمکانیکی،هیدرولیکی ویاپنوماتیکی باشد، شکل (۱۸-۱)،جهت ایدهگرفتن ،سیستم بارگذاری استاتیک رانشان میدهد. باافزایش جریان روغن هیدرولیک ،بوسیلهشیرهیدرولیک ،باراعمالی زیاد می شود (۵).



شکل ۱۷-۱: شماتیک عملکرد پمپ مخصوص گل ساینده (۵)



شکل ۱۸-۱: سیستم بارگذاری بکمک فشار روغن (۵)

۲-۴-۱)- تاثیر پارامترهای مختلف بر نتایج فرآیند ماشین کاری:

پارامترهای ماشینکاری اولتراسونیک را میتوان بدو دسته تقسیم نمود، پارامترهای ورودی و پارامترهای خروجی.

پارامترهای ورودی آندسته از پارامترهایی می باشندکه با تغییر آنها خواص فرآیند تغییر می کند. این پارامترها شامل جنس قطعه کار، گل ساینده (جنس مایع حمل کننده، جنس و اندازه دانه های پودر و درصد حجمی پودر گل ساینده)، جنس ابزار، ساخت و شکل سر ابزار، نحوهٔ شستشوی موضع ماشینکاری، دامنهٔ ارتعاشات سر ابزار، فرکانس ارتعاشات، پارامستاتیک و عمق موضع ماشینکاری می باشند.

پارامترهای خروجی درواقع حاصل فرآیند می باشندکه عمدتا" بعداز ماشینکاری قابل ارزیابی می باشند. این پارامترها شامل نرخ ماشینکاری، فرسایش ابزار، زبری سطح، گشادی کناری (Over Cut) و تلرانس می باشند (۵).

در مورد قطعات کار قابل ماشینکاری با اولتراسونیک و پودرهای ساینده بترتیب در جداول (۶-۱) و (۷-۱) اطلاعاتی آورده شده است (۸). جدول (۸-۱) پودرهای مناسب برای قطعات کار مختلف را نشان میدهد (۸).

در مورد اندازهٔ ذرات پودر ساینده جدول (۱۲-۱) اطلاعاتی را بدست می دهد (۸). جدول (۲-۱) نیز انواع جنس های مهم ابزار را نشان میدهد (۱۰) (۹).

۱-۲-۴-۱)- تاثیر پارامترهای مختلف بر نرخ ماشینکاری:

- جداول (۹-۱)، (۱۰-۱) و (۱۱-۱) بترتیب تاثیر جنس قطعات کار ترد فلزی و سرامیکی را (برای پودرهای ساینده مختلف با اندازه های مختلف)

برنرخ ماشینکاری نشان میدهند(۸). همچنین جداول (۱۲-۱) و (۱۴-۱) مقادیر نرخ براده‌برداری وایندکس براده‌برداری را برای جنس های مختلف قطعه‌کار نشان میدهند(۸). همانطورکه ملاحظه میشود هرقدر قطعه‌کارتردترباشدنرخ ماشین‌کاری بیشتراست.مسلما " سختی قطعه‌کاربطورقابل توجهی نرخ براده‌برداری راکاهش میدهد.

TABLE (1-13) Material Removal Rates for Various Work Materials (8)

WORK MATERIAL	MATERIAL REMOVAL RATE	
	in³/min	mm³/min
Carbon	0.015	246
Glass	0.016	262
Ceramics	0.005	82
Silicon	0.005	82
Germanium	0.005	88
Quartz (crystal)	0.007	115
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 (1-14) USM Material Removal Rate Index (8)
(Cutting soda glass at 0.060 in/min [1.52 mm/min] = 100)

WORK MATERIAL	INDEX
Soda glass	100
Ceramic	70
Silicon	60
Tungsten carbide	4
Stainless steel	2

SOURCE: G. E. Littleford, Machining by ultrasonics, 1971.

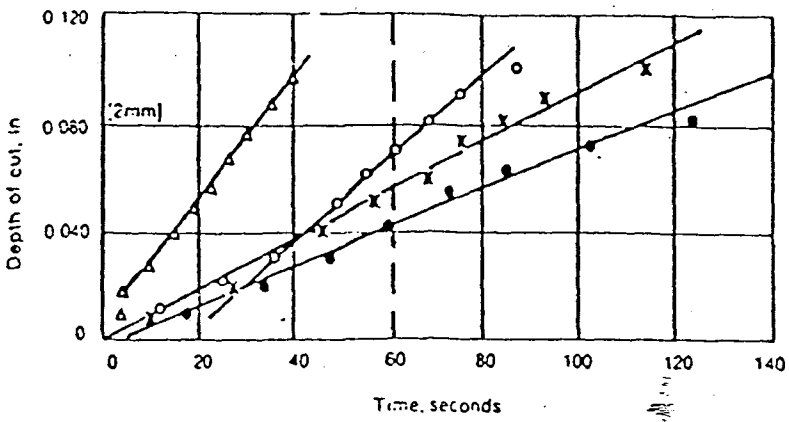
— جداول (۹-۱)، (۱۰-۱) و (۱۱-۱) تاثیر جنس و اندازهٔ دانه ساینده را نیز بر سرعت ماشین کاری میدهند (۸). همانطور که ملاحظه میشود پودر برن کار باید با دانه‌های درشت‌تر (مش کم) نسبت به سایرین نرخ براده برداری بیشتری میدهد.

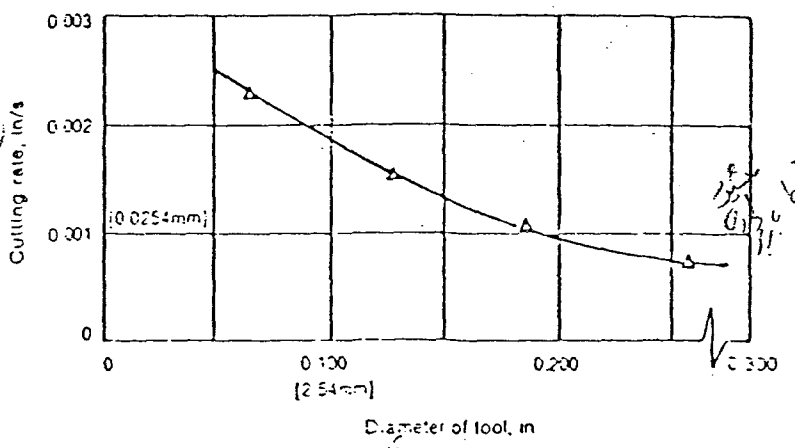
شکل (۱۶-۱) تاثیر نسبت حجمی پودر ساینده گل را بر روی سرعت براده برداری نشان میدهد (۸). ملاحظه می گردد که در بالاتر از ۳۰٪ حجمی سرعت براده برداری چندان افزایش نمی یابد.

— اثر جنس ابزار بر سرعت براده برداری برای دامنه‌های مختلف ارتعاش و مش مختلف برن کار باید در جدول (۴-۱) نشان داده شده است (۸). طاهرا" ابزارهای دارای جنس چغرو داکتایل سرعت براده برداری بیشتری نتیجه میدهند. همین جدول نشان میدهد که دامنه نوسان بیشتر و مش کوچکتر سرعت براده برداری بیشتری میدهند.

شکل (۱۹-۱) نشان میدهد که در عمق ماشینکاری معین سرعت پیشروی ابزار بداخل کار با افزایش مساحت ابزار کاهش می یابد (۸). این پدیده عموما" بخاطر افزایش مساحت است و همانطور که در جدول پائین شکل آمده است اگر چه قطر، مثلا"، چهار برابر میشود (مساحت شانزده برابر میشود) اما سرعت پیشروی $\frac{1}{3}$ می شود که در مجموع می توان گفت سرعت حجمی براده برداری $\frac{16}{3}$ برابر یعنی حدود پنج برابر می شود. البته بنظر میرسد که در این حالت علی رغم افزایش مساحت، دامنهٔ ارتعاشات محفوظ نگه داشته شده است و گل ساینده نیز بخوبی به گپ ماشین کاری تغذیه میشود والاّ، افزایش مساحت ابزار اولا" باعث کاهش نسبت تقویت متمرکزکننده می شود و ثانیا" نفوذ گل نو به محل ماشین کاری را خراب می کند (۵).

— اثر دامنهٔ ارتعاشات سر ابزار بر سرعت براده برداری در فرکانسهای مختلف در شکل (۲۰-۱) آمده است (۸). شکل نشان میدهد با افزایش دامنه،





KEY	DIAMETER OF TOOL		CUTTING RATE	
	in	mm	in/s	mm/s
Δ	0 0625	1.59	2 3	58
O	0 125	3.18	1.58	40
X	0 180	4.57	1 1	28
●	0 250	6.35	0 7	18

Figure(۱۲-۱۵) 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) (6)

سرعت براده برداری درهمهٔ فرکانسها افزایش می یابد. نتایج جدول (۴-۱) نیز این مطلب را تائید می نماید. نتایج جدول (۱۵-۱) نیز موید موضوع فوق است (۸). بهترین حالت برای براده برداری آنست که اندازهٔ دانه های ساینده اندکی کوچکتر از دامنه ارتعاشات سرابزار باشد. اگر اندازهٔ دانه ها محفوظ باشد و دامنه افزایش داده شود، زمانی میرسد که سرعت براده برداری چندان افزایش نخواهد یافت زیرا دانه های ساینده از زیر ابزار فرار می کنند و انرژی اضافی مصرف شده، صرف عمل پمپاژ گل به بیرون گپ ماشین کاری و غلبه بر اصطکاک می شود (۱۰)، (۹).

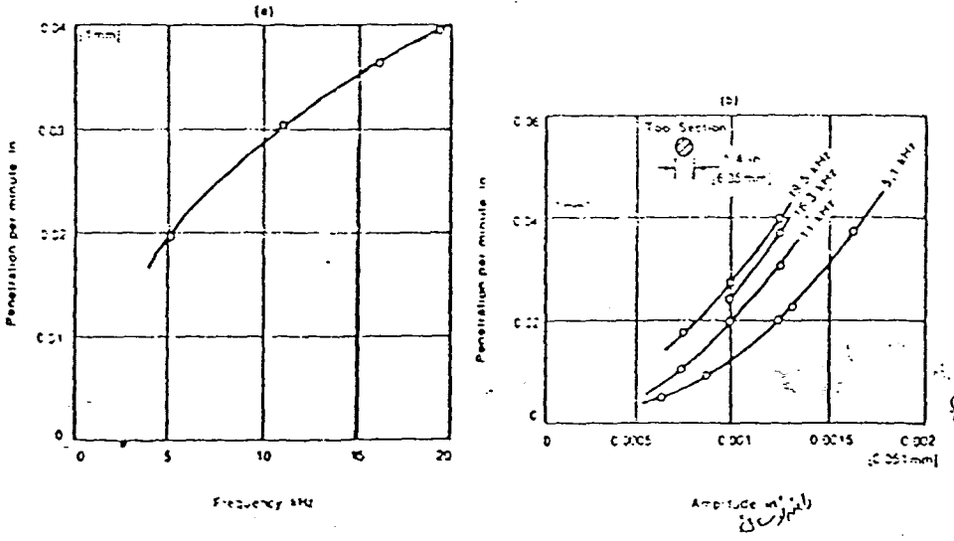


Figure 1-2 (a) Penetration rates in glass as a function of (a) frequency, for a peak to peak amplitude of 0.00125 inch (0.038 mm) and constant static load, and (b) amplitude, for four operating frequencies and constant static load (E. A. Neppiras and R. D. Foster p. 359, [8])

TABLE(1-15) Equipment Size (8)
(Estimate of watts required for 20 kHz equipment using 120 mesh B_4C abrasive and optimum parameters)

CUTTING RATE						WATTS
Glass		Hard Alloy		Germanium		
$in^3/min \times 10^{-4}$	mm^3/min	$in^3/min \times 10^{-4}$	mm^3/min	$in^3/min \times 10^{-4}$	mm^3/min	
92	150	3.1	5	31	50	250
214	350	4.9	8	61	100	500-600
490	800	12.2	20	122	200	1000
900	1500	18.3	30	183	300	1500
1830	3000	45.8	75	427	700	4000

— شکل (۲۰-۱) اثرفرکانس را برسرعت براده برداری نشان میدهد (۸).
دیده میشودکه با افزایش فرکانس ارتعاشات سرابزار، سرعت براده بـــرداری افزایش می یابدولی نرخ افزایش سرعت براده برداری درفرکانس های بـالا کم تراست .فاصله نزدیک منحنی هـای ۱۹/۵ کیلوهرتزو ۱۶/۲ کیلوهرتزموید این موضوع می باشد .بنابراین نتیجه می شودکه بکارگیری فرکانسهای خیلی بالا درماشین کاری اولتراسونیک بی ثمراست .این موضوع وقتی بیشترجدی می شودکه رابطه قدرت وفرکانس مدّنظرقرارگیرد (قدرت مصرفی تقریبا "متناسب با مجذورفرکانس می باشد؛ لذا افزایش فرکانس ضرر مهم افزایش مصرفـــی را بدنبال دارد). درفرکانسهای زیر ۱۵ کیلوهرتزصدای سوت دردناکی پذیـــــد می آید؛ لذا، فرکانس حدود ۲۰ KHZ حدمعقولی من جمیع جهات می باشد (۱۰)، (۹).

— شکل (۲۱-۱) اثرباراستاتیک را برسرعت پیشروی خطی ابـــزاردر دامنه های ارتعاشی مختلف ومساحتهای مختلف مقطع ابزارنشان میدهد (۸). همانطورکه ملاحظه میشود منحنی ها ،باراستاتیک اپتیممی را برای ماکزیمـــم سرعت پیشروی نشان میدهند. افزایش دامنه ارتعاش هم باعث افزایش سرعـت پیشروی می شودوهم اپتیمم باراستاتیک را بیشترمی نمایدبرای ابـــزار،با مساحتهای بیشتراپتیمم باراستاتیک بیشتراست .کاهش نرخ پیشـــــروی

دربارهای استاتیک با لاترازنقطه، اپتیمم احتمالا" بخاطر کاهش دامنه ارتعاشات دراثر بار استاتیک می باشد (۱۰)، (۹).

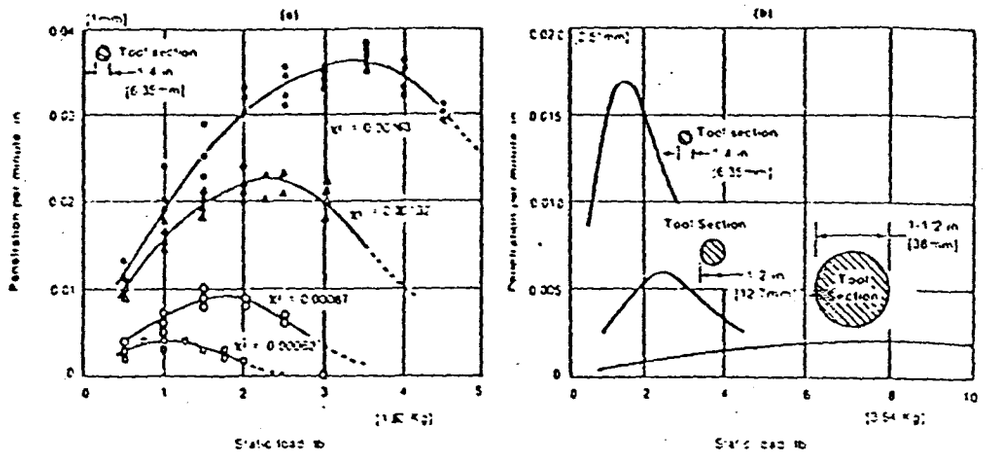
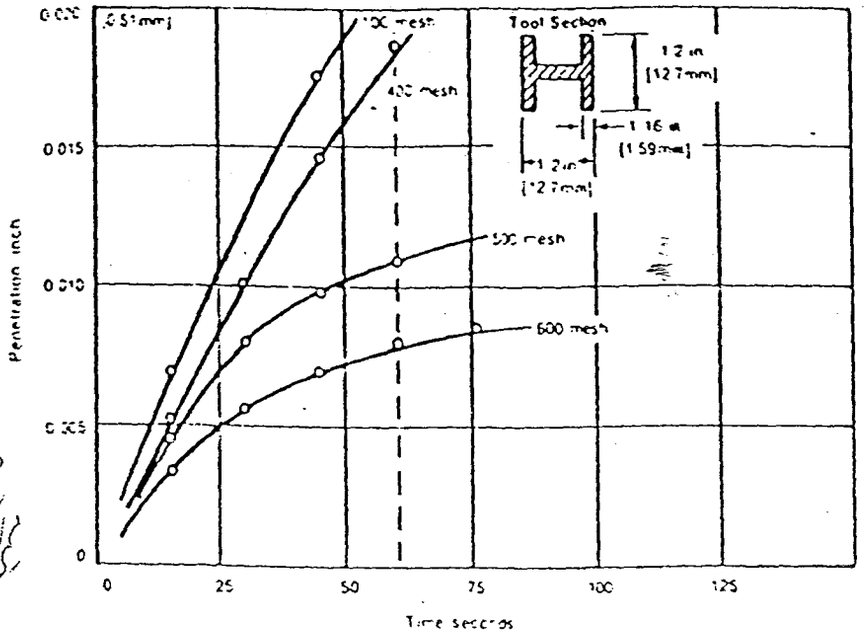


Figure 1-21 Penetration rate as a function of static load for (a) various amplitudes (f) and (b) various tool areas (E. A. Neppiras and R. D. Fossett, p 563) (۴)

— شکل (۲۲-۱) نشان میدهدکه دراعماق بیشتر، زمان زیادتری لازم است تاابزارمقدارمعینی پیشروی نمایدواین نشانه کاهش سرعت پیشروی دراعماق زیادتراست (۸). همچنین این شکل نشان میدهدکه کوچکترسرعت براده برداری زیادتری دارد. علت کاهش سرعت براده برداری را درعمق زیادمی توان بدو عامل اتلاف انرژی دراثراصطکاک بدنه ابزارباگل سایندهعبوری ازجداره های سوراخ (باعث کاهش دامنه ارتعاشات میشود) ومشکل شدن امکان جایگزینی گل سایندهنوبجای گل سایندهقدیمی موجوددرگپ ماشین کاری دانست. گل قدیمی محتوی ذرات براده برداری شده واحتمالا" ذرات سایندهکندمی باشدو قدرت ماشین کاری کافی راندارد (۱۰)، (۹).

شایدخوب باشدکه درفواصل زمانی معینی ابزاررابطورپریودیک از سوراخ خارج وبه آن داخل نمودتا جایگزینی گل سایندهانجام شود. میتوان

این عمل را با فرستادن گل نو ازمجرای داخل ابزاریا قطعه‌کاروبا مکش گل کهنه ازداخل مجرا توام نمودوهمانندفرآیند EDM عمل شستشورا انجام داد (۵).



Figure(1-22) 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. Fosker, p. 370,(8)

۲-۲-۴-۱)- تاثیرپارامترهای مختلف برفرسایش ابزار:

- جداول (۱۶-۱)، (۱۷-۱) اثرجنس قطعه‌کار را برفرسایش نسبی ابزار فولادی (غلطک سردشده) باگل ساینده برن کاربابد (مش ۲۲۰) بترتیب تحت قدرتهای ۷۰۰ واتی ۱۰۰ وات نشان میدهند (۸). ملاحظه میگرددکه هرقدرقطعه‌کارتردترباشد فرسایش نسبی ابزارکم تراست، هرقدرقطعه‌کارچغرترباشد فرسایش نسبی ابزاربیشترمی شود، فرسایش نسبی ابزاردربعضی مواردقدرت بیشتر، کم تراست.

شکل (۲۲-۱) نمایانگرفرسایش نسبی ابزارفولادی ونرخ ماشینکاری برای موادمختلف قطعه‌کاراست (۲). دراین شکل نیزملاحظه میگرددکه

TABLE(1–16) Representative USM Penetrating and Tool Wear Rates at 700 Watts Input (8).

MATERIAL	RATIO STOCK REMOVED TO TOOL WEAR	MAXIMUM PRACTICAL MACHINING AREA		AVERAGE PENETRATING RATE*	
		in²	cm²	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	22.6	0.085	2.16
Tungsten carbide	1.5:1	1.2	7.7	0.010	0.25
Tool steel	1:1	0.875	5.6	0.005	0.13
Mother of pearl	100:1	4.0	25.8	0.150	3.81
Synthetic ruby	2:1	0.875	5.6	0.020	0.51
Carbon-graphite	100:1	3.0	19.4	0.080	2.00
Ferrite	100:1	3.5	22.6	0.125	3.18
Quartz	50:1	3.0	19.4	0.065	1.65
Boron carbide	2:1	0.875	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, 1/2-inch [12.7 mm] deep.

TABLE 1-2 General Wear Ratios (8)

TOOL MATERIAL	APPROXIMATE WEAR RATIO (ratio of depth of cut to loss of tool size)			
	Workpiece Materials			
	Glass	Stellite	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 grit B_4C, 1-1/2 lb pressure.

TABLE(1 – 17) Representative USM Penetrating and Tool Wear Rates at 100 Watts Input (8).

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		
Glass	0.25	6.35	1	0.45	0.075	1.91	1.4:1	100:1
Aluminum oxide	0.25	6.35	5	2.27	0.010	0.25	1.4:1	13:1
Tungsten carbide	0.25	6.35	1	0.45	0.002	0.05	1.4:1	1:1
Carbon	0.25	6.35	0.5	0.27	0 100	2.50	1.4:1	100:1
Steatite	0.25	6.35	1	0.45	0 090	2.29	1.4:1	200:1
Germanium	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
Quartz	0 25	6.35	3	1.36	0 070	1.79	1.4:1	50:1
Glass	0 125	3.18	1	0.45	0 125	3.18	1.4:1	100:1
Aluminum oxide	0.125	3.18	1	0 45	0 030	0.76	0 25:1	10:1
Carbon	0.125	3.18	0.5	0.27	0 250	6.35	0.25:1	100:1
Germanium	0.125	3.18	1	0.45	0 125	3.18	0.25:1	100:1
Silicon	0.125	3.18	1	0.45	0.125	3.18	0.25:1	100:1
Tungsten carbide	0.125	3.18	1	0.45	0 004	0.10	0.25:1	1:1

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

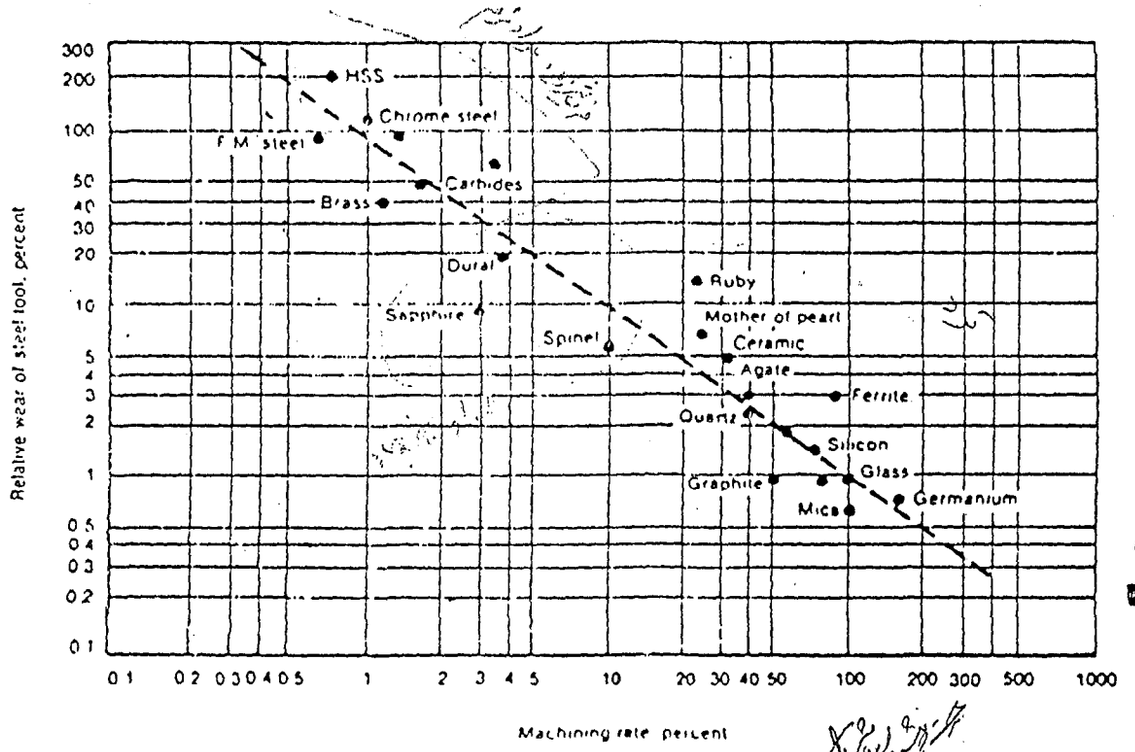


Figure (1 - 7 ٪) Tool wear versus machining rate. Relative wear rate of steel tool in various work materials. 100% is 5 mm/min (0.20 in/min) in glass. (M. Adithan and V. C. Venkatesh, Tool wear phenomenon in ultrasonic drilling, *Proceedings of 5th all India machine tool design and research conference*, University of Roorkee, 1972, p. 625) (٪)

قطعات کار تردتر سرعت ماشین کاری بیشتر و فرسایش نسبی ابزار کم تری دارند.

— جداول (۲- ۱)، (۵-۱) و (۱۸-۱) اثر جنس ابزار و قطعه کار را بر فرسایش نسبی ابزار نشان میدهند (۲)، (۳)، (۴). کلا" ملاحظه میگردد که ابزار جغر و داکتایل (Tough &Ductile) فرسایش نسبی کمتری دارد. تنگستن کاربایدبرای ماشین کاری هم جنس خود مناسب نیست ولی فولاد غلطکی سرد و فولاد و نقره‌ای برای ماشین کاری تنگستن کاربایدمناسب می باشند.

۳-۲-۴-۱)- تاثیر پارامترهای مختلف بر زبری سطح قطعه کار:

منحنی های شکل (۱۳-۱) و (۱۴-۱) اثر جنس قطعه کار را بر صافی سطح نشان میدهند (۸). ملاحظه میگردد که برای جنس چغر و داکتایل صافی سطح بهتر می باشد. همچنین صافی سطح کف سوراخ بهتر از صافی سطح دیواره‌ها می باشد. منحنی های مذکور و منحنی شماره (۱۵-۱) نشان میدهند که با افزایش اندازهٔ دانه‌های سایندهٔ صافی سطح خراب می شود. چون درخشن کاری مقصود حداکثر سرعت براده برداری است، دامنهٔ ارتعاشات و در نتیجه اندازهٔ دانده‌های گل سایندهٔ باید بزرگ انتخاب شوند لذا ضرورتا " صافی سطح درخشن کاری خراب خواهد بود.

۴-۲-۴-۱)- تاثیر پارامترهای مختلف برگشادی کناری

منحنی های شکل (۲۴-۱) نمایانگر گشادی قطری نسبی، نسبت به قطر ابزار، برای قطعات کار تنگستن کاربایدو شیشه، در عمقهای مختلف ماشینکاری، برای اندازه‌های مختلف ذرات گل سایندهٔ می باشند (۸). ملاحظه میگردد که درشرایط ماشینکاری یکسان، گشادی کناری نسبی سوراخ تنگستن کاربایدد.

بیشتر است ،همچنین ملاحظه می گرددکه افزایش عمق سوراخ،کنادی کناری را افزایش میدهد .دلیل این موضوع شاید افزایش طول زمان عبورگل سایننده ازکناره ها وفرسایش ناشی ازآنها باشد .دیده میشودکه افزایش اندازهٔ دانه سایندهٔگشادی کناری راافزایش میدهد .

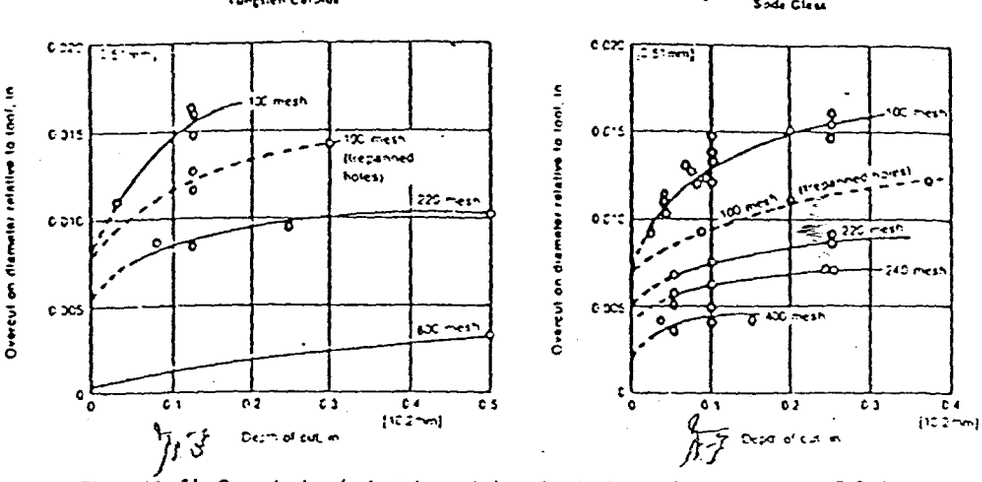


Figure 1-24 Overcut values for tungsten carbide and soda glass work materials cut with B4C abrasive at various depths (E. A. Neppiras and R. D. Foskett, p. 374) (8)

۵-۲-۴-۱)- تاثیرپارامترهای مختلف برتلرانس ماشینکاری :

همانطورکه قبلاً اشاره گردیدتلرانس حاصل از ذرات سایندهٔ با مش ۲۸۰ معادل ۰/۰۲۵۴ ± میلی متروبا مش ۸۰۰ معادل ۰/۰۱۲۵ ± میلی متر می باشد (۱۰)،(۹)؛ لذاکاهش اندازهٔ ذرات گل سایندهٔ تلرانس را بهبود می بخشد .

۶-۲-۴-۱)- جمع بندی تاثیرپارامترهای مهم:

دریک جمع بندی می توان گفت که هرقدرجنس قطعه کار تردتر باشد سرعت برادهٔ برداری بیشتر ،فرسایش نسبی ابزارکم تروصافی سطح بدتراست وبرعکس هرقدرقطعه کار چغرتروسخت تر باشدسرعت برادهٔ برداری کم تروفرسایش

نسبی ابزار بیشتر است .برای قطعات کار چقرو داکتایل مافی سطح بهتر است.

هرقدر ابزار چقرو داکتایل تر باشد سرعت ماشین کاری بیشتری داردو فرسایش نسبی آن کم تر است .

افزایش اندازهٔ دانه‌های گل ساینده،سرعت ماشین کاری را افزایش می دهد ،مافی سطح را خراب می کند ،گشادی کناری را افزایش می دهدوتلرانس را زیاد می کند.

جداول (۱۹-۱) و (۲۰-۱) توصیه‌هایی برای تنظیم پارامترهای ورودی واثرآنها برپارامترهای خروجی،برای جنس های مختلف قطعه کار،دارندکه میتوانندبرای اپراتورها راهنمای خوبی باشند (۸).

جدول (۲۱-۱) نیزقدمهای تعیین پارامترهای ماشینکاری اولتراسونیک را مشخص می نماید (۸).

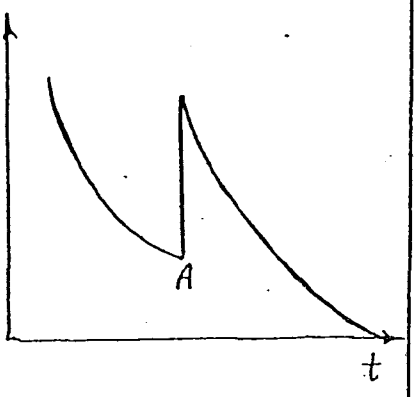
TABLE 3 -(۹) General Recommendations of Conservative Starting Conditions for USM (8)

PARAMETER	WORK MATERIAL							
	Glass		Ceramics		Hard Metals (40-60 R_c)	Composites (e.g., glass epoxy)	Tungsten Carbide	Stone
	Roughing	Finishing	Large area	Small area				
Tool material	mild steel	mild steel	stainless steel	stainless steel	tool steel	mild steel	mild steel	tool steel
Abrasive								
Type	B_4C	B_4C	B_4C	B_4C	SiC	B_4C	B_4C	Al_2O_3
Size	320	500	320	180	240	320	240	180
Percent concentration	20	60	20	40	50	40	50	20
Carrier fluid	H_2O	light oil	H_2O	H_2O	H_2O	H_2O	H_2O	H_2O
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 [3.27]	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	6.6
Material ratio (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 μin [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]	60-80 [1.5-2]

NOTE: Based generally on a tool face area of 0.2 in^2 [1.25 cm^2].
*Based on soda glass as 100%.

لطفاً قبل از مطالعهٔ جزوه، اصلاحات ذیل را بعمل آورید.

شماره صفحه	سطر	نادرست	درست
٦	١	٨-٧ هزاربار	٨-٧ بار
٦	روی نمودار	٤تا٣ هزاربار	٤-٣ بار
٦	٥	$q=K_A \frac{dT}{dx}$	$q^\circ = K \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$
٦	٣	گسترش مقطع ناگهان پلازما است	گسترش ناگهانی مقطع پلازما است
٧	آخر	Cm/ لگاریتم	Cm/ مگا اهم
٨	١١	١٩٦٨	١٧٦٨
٨	آخر	١٩٤٥	١٩٤٣
٩	٢	ماشین حبت	موتور حبت
٩	٤	مباحثی مانند ...	مباحثی مانند سی کاندالکتور
١٠	٢٠	نیروهای مستقیم	نیروهای مکانیکی
١١	١٣	توسط روشهای ساده ای همچون ...	توسط نگهدارنده های ساده ای همچون ...
١٢	٧	دیگر احتیاجی به عملیات حرارتی ندارند	دیگر احتیاجی به عملیات حرارتی ندارند و وقتی بکار می آید که ماده Material بخواهد روی سطح قالب بلغزد که یا در حالت سرد و یا در حالت گرم روی قطعه می لغزد و جریان پیدا میکند. چرا که نگه ماده روی سطح قالب دارد ایجاد سایش میکند و اگر سطح کار سخت باشد میتواند در مقابل کنده شدن سطح مقاومت نماید.
١٢	٥	محدودهٔ چین هم بگذریم .... ایجاد میشود	محدودهٔ چین هم بگذریم باعث نرمی قطعه کار میشود
١٥	١٠	الکتروترمال الکتریسیته	الکتروترمال پروسه
٢٢	١٠	ترکستان	برک داون

شماره صحه	سطر	نادرست	درست
۶۲	۳	تعداد الکترونها را زیاد باشد	تعداد الکترونها را زیاد باشد
۶۳	۵	۰ ۰ ۰ بارهای مثبت را داریم	... بارهای مثبت را نیز داریم
۶۴	۱	پیوستگی حباب ها نه هم که بصورت ..	پیوستگی حباب ها به هم بصورت ..
۶۶	۸	از اینرو بدین منظور ...	بدین معنی که
۷۳	نمودار		
۷	۶	جریان بین $\int_{T_i}^{T_i+T_0} + \int_{T_i}^{T_d} + \int_{0}^{}$	جریان بین $\int_{T_i}^{T_i+T_d} + \int_{T_i}^{T_d} + \int_{0}^{}$
۷۹	نمودار	$T_{sp_n} - T_{sp_3} - T_{sp_2} - T_{sp_1}$	$I_{sp_n} - I_{sp_3} - I_{sp_2} - I_{sp_1}$
۷۱	۲	زیری سطح بر یک ... I_{sp}	در یک ... I_{sp}
۸۴	۱۵	Pavn	Wav.n
۹۰	نمودار		$I_{sp_n} - I_{sp_3} - I_{sp_2} - I_{sp_1}$ محور عمودی سرعت باربرداری محور افقی T_I
۹۰	۱	جدول ( )	جدول (ص ۱۰۳ به بعد)
۹۳	۱۶	نقاط T_{I_1} ، T_{sp_1} ، T_{I_2} ، T_{sp_2}	نقاط T_{I_1} ، I_{sp_1} ، T_{I_2} ، I_{sp_2}
۹۴	۱۸	T_{I_1} و T_{sp_1}	T_{I_1} ، I_{sp_1}
			تعداد

شمارهٔ صفحه	سطر	نادرست	درست
۳۰	۱۱	جهت کامل سرد کردن	جهت سد کردن کامل جریان
۳۶	۴ پاورقی	تحریک بین استفاده میشود ...	تحریک بیس (Base) استفاده میشود ...
۳۷	۶ پاورقی	ترازیستورهای ...	ترانزیستورهای ...
۳۹	۱۰	یعنی Base ...	یعنی محرک Base ...
۴۵	۵	مقاومت 43.2 Ω	مقاومت معادل 43.2 Ω
۴۶	۱۰	مدار باز را	مدار بازگیر را
۴۸	۲	ابزار در	ابزار و قطعه کار در
۴۸	۴	برقراری ولتاژ و برقراری جریان	برقراری ولتاژ تا برقراری جریان
۵۱	۷	پالس بعدی در جای پالس قبلی	جرقهٔ بعدی در جای جرقه قبلی
۵۱	۱۵	زمان حداقل ممکن	زمان (To) حداقل ممکن
۵۲	۱۴	آما دی الکتریک ...	آما آلودگی دی الکتریک
۵۵	۱۲	فرآیندهایی هستند که ...	پارامترهایی هستند که به عنوان نتیجهٔ فرآیند هستند
۵۹	۹	یعنی درهمان ابتدای جریان بالاست	که جریان بالاست، و پس ...
۶۱	۲	کال	کانال
۶۲	۱۰	بیشتر راحت تراست	راحت تراست
۶۳	۱۵	میباشیت انرژی ابزار و قطعهٔ کار ...	انرژی ابزار و قطعهٔ کار، کنده شد
۶۴	۴	گرانیت	گرادیت

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
دکتر عبداله

«تولید مخصوص»

(قسمت ثانی)

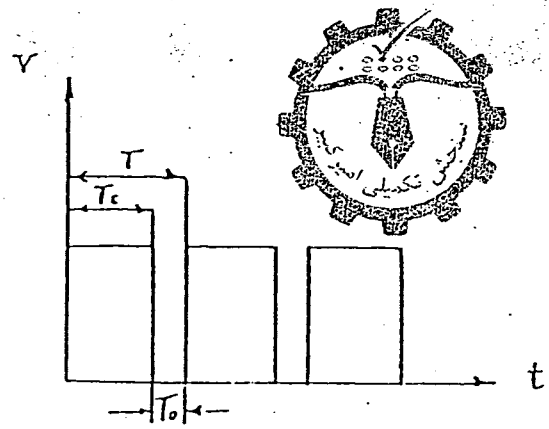
ماشینکاری با پروسه های EDM "Electro Dischary Machining"

این روش براده برداری، توسط تخلیه الکتریکی انجام میشود و یک روش Electro thermal است یعنی در آن الکتریسیته حرارت داخل میکند. ماشینهائی مانند Die Sinking (اسپارک)، و ایرکات یا برش با سیم، Drilling یا سوراخکاری همگی با استفاده از روش EDM عملیات ماشینکاری را انجام میدهند و اساس و مبنای فیزیکی همگی آنها یکسان است بنابراین تمامی مطالبی که ما در پروسهٔ EDM خواهیم گفت در مورد همگی این ماشینها صادق است.

تعریف. روش براده برداری است که در آن ولتاژ بالسی و منقطع برقرار شده بین دو الکترود بنام های ابزار و قطعه کار که در سیالی بنام دی الکتریک غوطه ور میباشند (وقتی بین آنها اختلاف دی الکتریک پر شده است. عامل جرقه در نزدیکترین نقطه یا (نقاط) گردیده و هر جرقه چزء کوچکی از ماده را از سطح قطعه کار جدا میکرداند و در نهایت بعد از تعداد زیادی جرقه شکل مکمل پیشانی ابزار با ایجاد حفره ای در قطعه کار حک میگردد. لازم به ذکر است که در طول این فرآیند همواره ابزار در فاصلهٔ نزدیک و کنترل شده ای از قطعه کار نگهداشته میشود.

از تعریف فوق ممکن است سؤالاتی به ذهن انسان خطور کند که در ادامهٔ بحث به آن اشاره میکنیم. مثلاً: الف- این روش براده برداری است چرا که از سطح قطعه کار براده ها را جدا میکند (مانند تمام ماشینهای سنتی) ب- ولتاژ باید بالسی و منقطع باشد. چون اگر پیوسته باشد، جرقهٔ پیوسته ای بنام "آرک" تولید میشود که تنها در لحظهٔ شروع میتواند باربرداری کند و بعد از آن هرچند ابزار را نگهدارم ولکن باربرداری صورت نخواهد گرفت. یکی از این مدارهای

پالس و منبع مدار ی بنام آیزو فرکانس است (فرکانس ثابت کنترل و تغییر آن بر عهده ما میباشد) پالسهای تولید شده توسط این مدار مربعی بوده و به شکل زیر است.[1]



شکل (۲-۱)

$1\mu sec = 10^{-6} sec$

T : پریود پالس (μsec)

T_I : پریود روشنی پالس $1 \leq T_I \leq 3000$

T_0 : پریود خاموشی پالس $1 \leq T_0 \leq 1500$

f : فرکانس ($\frac{\text{تعداد پالس}}{\text{ثانیه}}$)

$$T = T_I + T_0$$

$$f = \frac{1}{T \times 10^{-6}}$$

در ماشینهای EDM' طول T_I از $1\mu sec$ تا $3000\mu sec$ و طول T_0 از $1\mu sec$ تا 1500 میباشد (مقادیر T_I و T_0 در اختیار ما میباشد و میتوانیم آنها را تغییر دهیم و ما وقتی که آنها تغییر داده نشوند این سیستم، مدار آنها را ثابت نگهدارد. ولتاژ در این ماشینها open circuit است و به $V_{o.c}$ نمایش داده میشود که همان ولتاژ مدار باز است و به این دلیل این نام را روی آن گذاشته اند که اگر ابزار از قطعه کار فاصله زیادی داشته باشد و جرقه ای ایجاد نشود شما میتوانید روی اسیلوسکوپی که بین ابزار و قطعه کار بسته میشود این ولتاژ را ببینید یعنی مانند آنست که مدار باز است و هیچ جرقه ای بوجود نمیآید (به علت فاصله زیاد) این ولتاژ در ماشینهای EDM میتواند محدوده ای بین 60 تا 300 ولت را اختیار کند که این ولتاژ حالت پیوسته نبوده بلکه مجزا (discrete) میباشند. در آینده نام ابزار و قطعه کار

---

(۱) توجه کنید که بین جرقه و پالس تفاوت است و اینها دو یکی نیستند. پالس همانست که در شکل (۲-۱) ملاحظه میشود و مفهوم جرقه را در آینده توضیح خواهیم داد.

داریم که چون جریان از آنها عبور میکند طبعاً باید هادی و یا حداقل نیمه هادی جریان برق باشند که این مورد خود یک محدودیت برای این پروسه میباشد. همچنین دی الکتریکی[1] داریم که ابزار و قطعه کار در درون این دی الکتریک میباشند و فاصله بین آنها را دی الکتریک پر کرده است این فاصله یا GaP محدوده‌ای بین 1 تا 2000 میکرومتر را میتواند اختیار کند که هرچه پروسه ظریف‌تر باشد این GaP کوچک‌تر انتخاب میشود ولیکن بطور عمومی این فاصله مابین 5 تا 100 میکرومتر میتواند تغییر نماید. عامل جرقه همان ولتاژ بالایی است که بین نزدیکترین نقطه یا نقاط ایجاد میشود. این مسئله به دلیل آنست که V_{OPC} ایجاد یک میدان الکتریکی میکند که از رابطه $E = \frac{V \cdot P \cdot C}{d}$ تبعیت میکند که با d نسبت عکس دارد. پس در کوچکترین فاصله؛

---

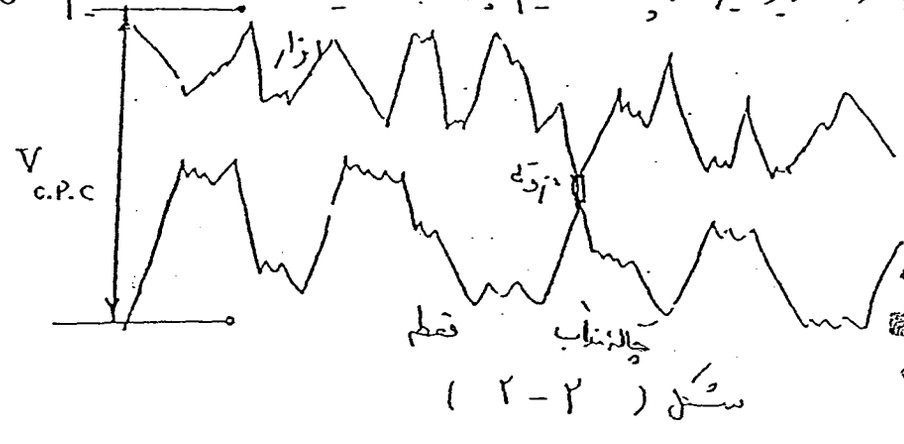
(1) دی الکتریک به موادی اطلاق میشود که به راحتی جریان برق را از خود عبور نمیدهند. (موادی که به راحتی جریان برق را از خود عبور میدهند یا فلزات هستند که الکترون آزاد در شبکه خود دارند و یا الکترولیت‌ها مانند نمک‌ها، اسیدها و... در آب که چنانچه یونیزه شوند، یونها میتوانند حامل جریان برق باشند). انواع دی الکتریک‌ها عبارتند از:

الف- دی الکتریک گازی مانند هوا و یا حتی بخار آب

ب- دی الکتریک مایع مانند نفت و گازوئیل (آب مواد آلی به دلیل خصوصیت دی الکتریک بودن آنها از ویژه گی خاصی برخوردار هستند) و یا آب دی یونیزه در صورتیکه (1) مواد محلول مانند نمک‌ها آن را آلوده و بصورت آب مقطر درآوریم و (2) اکسیژن و هیدروژن که بطور طبیعی به میزان 10^{-7} مولکول گرم تجزیه میشوند را جدا کنیم.

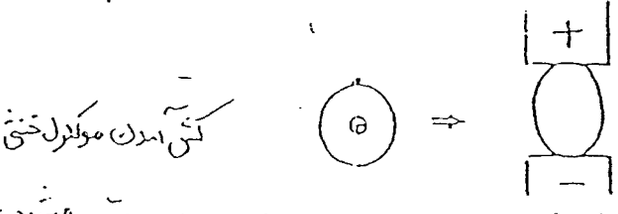
ج- دی الکتریک جامد مثل انواع پلی مرها، پلاستیک و لاستیک و ...

میدان الکتریکی بیشترین مقدار خود را خواهد داشت. پس جرقه در این نقطه ایجاد میشود. چنانچه سطح ابزار و قطعه کار را در زیر میکروسکوپ نگاه کنیم پستی بلندی هایی را در روی آن مشاهده میکنیم (شکل (۲-۲)).



شکل (۲-۲)

چنانچه دی الکتریک را بین میدان الکتریکی قرار گیرد مولکولهای خنثی و متقارن آن به مولکولهای قطبی تبدیل میشوند و دو قطب میدان مولکولهای خنثی دی الکتریک را کشش میآورد. الکترونها به سمت قطب مثبت و هسته که شامل پروتونهاست به طرف قطب منفی کشیده میگردد که اگر این میدان خیلی قوی باشد بر مقاومت دی الکتریک غلبه کرده و الکترونها را جدا میکند و در نتیجه مولکولهای دی الکتریک در محلی که میدان الکتریکی خیلی قوی است در نزدیکترین نقطه یا نقاط به یونیزه میشوند. در این حالت گفته میشود مقاومت دی الکتریک شکسته (breakdown) شده است) میدانی که در آن عمل فوق اتفاق می افتد حدود $10^6 \frac{V}{m}$ است[1] که البته در حالتهای معدود و بخصوصی در بیشتر از یک نقطه در این حالت ایجاد میشود مگر آنکه دو نقطه فاصله (d) و شرایط یکسانی داشته باشند.

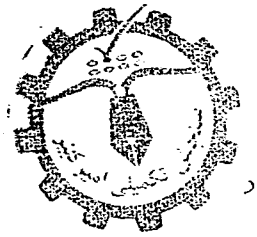


شکل (۲-۲) ⇒ کشش آمدن مولکول خنثی

در نقطه‌ای که دی الکتریک شکسته و یونیزه شد کانال پلاسما ایجاد خواهد شد و جرقه زده میشود)

---

(۱) چنانچه $V_{o-p-c} = 100\ V$ باشد و فاصله نیز 5 میکرون باشد داریم $E = \frac{100\ V}{5\times10^{-5}} = 20\times10^6 \frac{V}{m} \simeq 10^7$



وبدین صورت عمل برادہ برداری انجام میگیرد | دراین محل مقدار متمرکز یا دانسیته انرژی حدود

10^{9} تا 10^{10} وات بر سانتیمتر مربع است و سرعت یا نرخ افزایش درجه حرارت در اثر این دانسیته انرژی حدود 10^{10} درجه سانتیگراد بر ثانیه است. بدین معنی که در عرض یک میلیونم ثانیه درجه حرارت به ۱۰۰۰۰ درجه سانتیگراد میرسد و در عرض ۱۰۰ میکرو ثانیه درجه حرارت به یک میلیون درجه سانتیگراد خواهد رسید ولیکن عملاً چنین چیزی ممکن نیست (بدلیل پدیده هوشش)

بطور مثال آب در $100^{\circ}C$ به جوش میآید، پس از آن هرچه حرارت دهیم صرف تبخیر آب میشود و حرارت بیشتر تنها سرعت تبخیر را افزایش میدهد. آهن در حدود 2500 درجه سانتیگراد به جوش میآید و اگر کمی فشار کانال پلازما را هم زیاد کنیم حدود $3000^{\circ}C$ میشود وقتی به این دما رسید، حرارت موجب تبخیر آهن مذاب میگردد و عملاً به یک میلیون درجه نمیرسد.

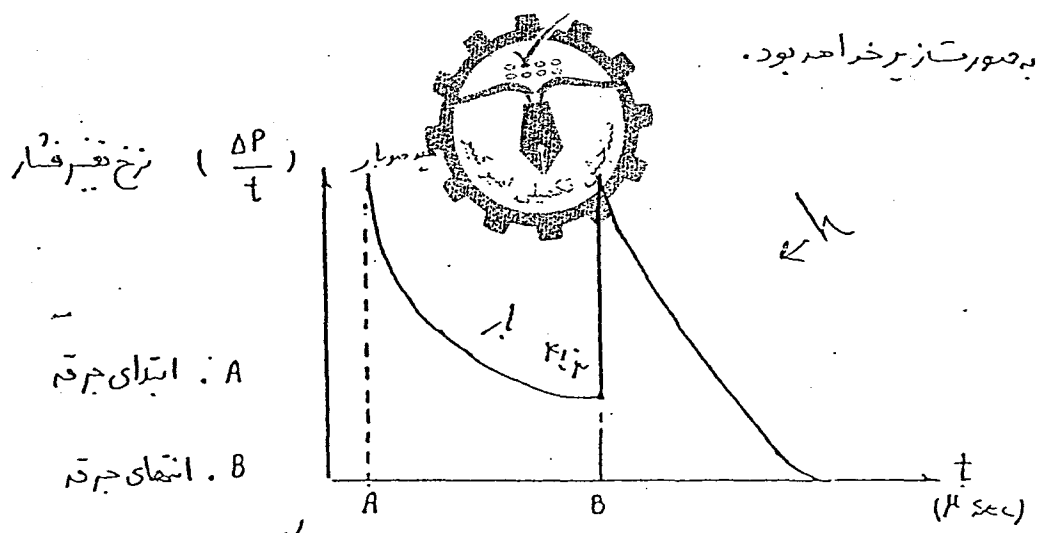
(پس به علت افزایش درجه حرارت ($10^{10}\ ^{\circ}C/Sec$) تنها تا نقطه جوش است و بعد دما ثابت است)

در این هنگام قطعه گرمای نهان ذوب خود را گرفته تا ذوب شود و سپس تبخیر انجام گیرد دینی در $0.3\mu sec$ دمای آهن به $3000^{\circ}C$ میرسد و عمل براده برداری انجام میگیرد.

حال این سؤال مطرح میشود که چرا از دی الکتریک استفاده کرده و آن را با این مشکلات توسعه میکنیم تا جواب آنست که | اگر از الکترولیت استفاده کنیم هرقدر تا آخر ایجاد میشود ولی سریع گسترش میآید و تمرکز انرژی نخواهیم داشت ولی در دی الکتریک میتوانیم تمرکز انرژی داشته باشیم و مقطع کانال پلازما را همچنان کوچک نگه داریم چون اگر انرژی پخش شود قدرت براده برداری نخواهد داشت | رفتار فشار کانال پلازما. در شروع فشاری حدود چند صد کیلوبار خواهد داشت ولی با کم شدن

بسیار بالایی در ابتدای جرقه افت کرده و به ۷ - ۸ ... بار خواهد رسید. منحنی تغییرات فشار

به صورت زیر خواهد بود.



شاملی که باعث این تغییرات شدید و ناگهانی میشود گسترش ناگهانی مقطع پلازما است. انتقال حرارت از کانال پلازما به قطعه کار باعث گشادتر شدن مقطع کانال شده و فشار کاهش یافته و دانسیته نیز کاهش می‌یابد)

$q = K \cdot A \frac{dT}{dx}$ ← نرخ انتقال حرارت

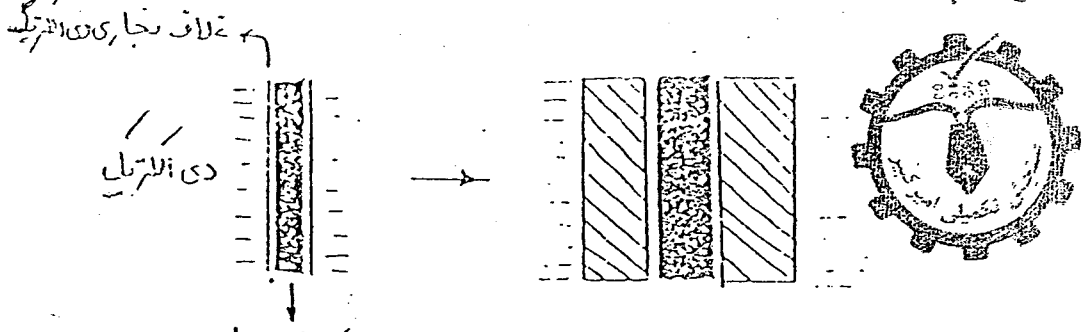
↓ مسافت انتقال حرارت

اطراف ستون پلازما از بخار دی الکتریک

گرفتن و کاهش فشار ستون پلازما به دلیل آنست که غلاف بخار دی الکتریک مقداری از مولکولها را به داخل خود می‌کشد و از کانال پلازما انرژی گرفته و آنها را پرس می‌کند و در نتیجه حجم کانال افزوده و فشار افت میکند و با افزایش حجم کانال، انتقال حرارت نیز بیشتر میشود. پس توجه کنید که کانال پلازما تنها در لحظات اولیه داغ است و هرچه زمان میگذرد سردتر و گشادتر میگردد

(و بهمین دلیل که جریان باید تا وقتی کانال خیلی گشاد و سرد شد، جریان قطع گردد) باعثی که میکنیم تا محل از پرس اسپرن خارج گردد چرا که دوباره در همان محل جرقه ایجاد شده و همان کانال پلازمای سرد و گشاد قبلی (تقریباً) ایجاد میشود پس زمان T_o لازم و ضروری است تا جرقه در محل دیگری زده شود و تغییرات فشار به دلیل قطع و التار در انتها

(بازخ شدیدی نیست به نرخ اول) به صفر میرسد



وقتی فشار ستون پلازما افت کند، درجهٔ حرارت آن که درجهٔ حرارت جوشش قطعه در فشار پلازما است نیز افت میکند و دما کاهش می‌یابد و به همین دلیل قطعات اول دمای کانال خیلی بیشتر است، در ضمن همانطور که گفته شد، کانال گسترده‌تر و دانسیته انرژی نیز کاهش یافته است. پلازما بطور همزمان با دی الکتریک، قطعه و ابزار در تماس است، پس بخارات از بخار مرسنه، موجب دخواهد بود. چون کانال پلازما یکسرش روی قطعه و سر دیگرش روی ابزار است پس از ابزار (که معمولاً مسی است) هم کنده خواهد شد و فرسایش ابزار تقریباً زیاد است و با آخرین تدابیر فرسایشی حدود 0.01٪ بدست آمده است که این حداقل مقدار فرسایش بدست آمده است و این خود یکی از ضعفهای بزرگ EDM میباشد. سرعت برش ابزار به همین دلیل درجهٔ حرارت کانال پلازما در ستون آن متغیر است و سری که روی ابزار مسی است، سردتر از سری است که روی قطعهٔ فولادی قرار دارد یعنی سری که روی قطعهٔ مسی است، درجه حرارت جوشش مس در فشار کانال پلازما و سری که روی قطعه است، درجه حرارتش، درجه حرارت جوشش قطعه در فشار کانال پلازما است. خاصیت دی الکتریک مواد باهم متفاوت است (بطور خیلی تقریبی میتوان گفت هر چه ماده غلیظ‌تر dense تر باشد، خاصیت دی الکتریکی آن بیشتر است) به همین دلیل خاصیت دی الکتریک نفت از هوا بیشتر است. البته جامدات دی الکتریکی معمولاً برحسب مقدار مقاومت ماده در واحد طول می سنجند. مثلاً با واحد کیلو اهم بر سانتیمتر که

مواد‌های با قدرت دی الکتریکی $200 \frac{MV}{cm}$ در دمای شکست (break down) به مقداری زیاد هم برسانیم میرسد که این ارزش قدرت دی الکتریک است. حال پس از جرقه‌های پی در پی بین ابزار و قطعه کار، شکل مکمل (complimentaly) ابزار روی قطعه کار می‌افتد چون برجستگی ابزار به قطعه کار نزدیکتر است پس اول جای آنها در قطعه کار ایجاد میشود و از همین منوال کل شکل ابزار ولی چون سطوح برجسته بیشتر از بقیه قسمتها در طول عمل براده برداری با قطعه در تماس‌اند، آنجاها بیشتر خورده میشوند و به همین دلیل در EDM در ابزار در نظر میگیرند یکی ابزار خشن کاری (Roughing) و دیگری ابزار پرداخت (finishing) تا قبل از آنکه عمل کامل برسد، ابزار را عوض میکنیم و شرایط پرداخت را ایجاد میکنیم تا تراش‌های لازم و مطلوب ما حاصل آید)

« تاریخچه ماشینهای EDM »

در سال ۱۷۶۸ جوزف پریستلی[1] مشغول مطالعه طب برق بود با استفاده از تخلیه خازن بود و مشاهده کرد که جرقه‌هایی که بوجود آمده، آثاری بجای گذاشته است که با دست پاک نمیشود و آثاری شبیه به آثار ذوب بود. این مسئله را در نامه‌ای که به یکی از دوستانش نوشت ذکر کرد و این نامه در کتابخانه روسیه باقیماند. در سال ۱۹۴۳ برادران لازارنکو[2] این موضوع را می‌بینند. زمان پریستلی الکتریسیته‌های جاری هنوز اختراع نشده بود ولی اکنون موجود بود. این دو برادر با مشاهده این نامه تصمیم گرفتند با استفاده از الکتریسیته جاری از سطح الکترود فلزی را جدا کنند و آثاری را بوجود آورند، با تلاشهای آنها در سال ۱۹۴۳ اولین ماشین

---

(1) Joeseph Priestly (2) B.L. Lazarenko
N.L. Lazarenko

EDM توسط مدار R.C تولید میشود. آن موقع زمان جنگ جهانی دوم وهمزمان با ساخت -
دستگاه موتور جت ومشکلهای دیگر و... بود و چون در زمان جنگ نیروی ماشینکاری
قطعات سوپرآلیاژ و سرامیک ها مشهود بود این ماشین کار پردازی پیدا کرد البته آن زمان
مباحثی مانند نیمه کانداکتورز (Semiconductor) هنوز ایجاد نشده بود. این ماشین با -
استفاده از امکانات ابتدایی مانند لامپ مقاومت وسلفها و دیودهای خلاء ساخته شدند و
عمر و پاسخ فرکانسی کمی داشتند. ولی با پیشرفت علوم Electronic ،
Electrotechnique ، این ماشین بهبود و گسترش یافت و طبعاً توانائی های آن هم افزایش
پیدا کرد. برای مثال Semiconductor ها در ترانزیستورها در اواخر دهه ۶۰ و IC ها
(integrated Circuit) و مایکروپروسسورها در اواخر دهه ۷۰ ساخته شدند که به عنوان مثال
هم اکنون در ماشینهای EDM و بخصوص در CNC ما خیلی از کارهایشان توسط کامپیوتر
هدایت و کنترل می شود و با سیستم ایجاد پالسهای منقطع به این شکل هست که با یک
اسیلاتور (oscillator) تولید میشود بلکه از همان کریستال کوارتزی که clock time
های کامپیوتر را می سازند و sequence های کامپیوتر را تنظیم میکنند، برای تولید
این پالسها استفاده میشود.

« قابلیت ٤ »

این روش بدلیل آنکه روش باربرداری با تخلیه الکتریکی و تنها پدیده آن ذوب و تبخیر است، اخواص
ترمودینامیکی و فیزیکی مانند، نقطه جوش، گرمای نهان تبخیر، گرمای ویژه در حالت ذوب
جامد، ضریب انتقال حرارت و ارتباط است در صورتیکه در پروسه های سنتی برای ماده آن

و Yield stress و مدول الاستیسیته (E) ، سختی و کلاً خواص مکانیکی متم

بودند اما در اینجا چون از پدیده ماوینگ و های مکانیکی استفاده نمیشود پس خواص

مکانیکی هم برای ما مهم نیستند. بنابراین :

۱) امکان ماشینکاری مواد بسیار سخت با هر UTS و Y.P و ... را داریم.

قالب سازی ابتدا قطعه را توسط روشهایی مانند آنیل کردن، نرم می کنند سپس با روش های

سنتی (فرز - تراش - دریل و ...) قالب را ایجاد کرده و بدلیل آنکه قالب باید خواص مکانیکی

بالایی داشته باشد آنرا دوباره سخت میکنند (توسط عملیات حرارتی) که طبعاً در

دماهای بالا که عملیات حرارتی قطعه سرخ در خدا قل به دلیل وزن خودش دچار اعوجاج و

deformation و تغییر ابعاد و تلرانس میشود ولی اگر قطعه را ابتدا عملیات حرارتی

در روزی بای صنعت

کنیم و بعد با EDM قالب را ایجاد کنیم در مشکل های دقیق را نخواهیم داشت . با این-

روش غیر از Tungstan carbide و Tool steel ها را هم میتوان قراشکاری و سایز

نمود.

۲) تولید هر شکل با هر پیچیدگی و هر زاویه شروعی دلخواه به سطح قطعه کار و

هر مسیری در داخل قطعه کار.

مثلاً در روش سنتی در عملیات سوراخکاری میتوان تنها اشکال با مقاطع گرد را تولید کرد ولی

در اینجا این محدودیت نیست بلکه میتوان هر مقطعی مانند مثلث و حتی غیر منظم و

غیر هندسی را تولید کرد. در روش سنتی اگر مته با تیغه کار زاویه داشته باشد، مته سر خواهد

خورد و ممکن حتی مته بشکند ولی در این روش این مسئله وجود نداشته و مته تحت هر زاویه ای

امکان سوراخکاری هست . در ضمن سوراخ میتواند داخل قطعه در مسیرهای پیچیده و مشکل

حرکت کرده و شکل دلخواه را ایجاد نماید.

۱۳) برای ایجاد یک فرم روی قطعه میتوان از ابزارهای PreForm یا ابزار ساده استفاده کرد.

مثلاً برای ایجاد فرم های پیچیده و تودرتو می توان از ابزار ساده که میتواند یک میلنگ باشد. توسط سیستم کنترل کامپیوتری (CNC) حرکات و شکل دلخواه ایجاد شود. و یا حتی میتوان مثلاً برای ایجاد سوراخ در قطعات مارپیچ، قطعه را هم با سیستم کنترل هدایت کرد تا صرفاً ابزار (مثلاً پیم) به داخل قطعه Feed میشود، قطعه هم حرکت کند و حرکت توأم این دو باعث ایجاد فرم دلخواه گردد. همچنین این امکان وجود دارد که قالبهای PreForm را اول توسط EDM با ابزار ساده تولید و سپس از خود قالب برای تولید قطعات دیگر بهره جست.

۱۴) انجام تراشکاری روی قطعات ظریف.

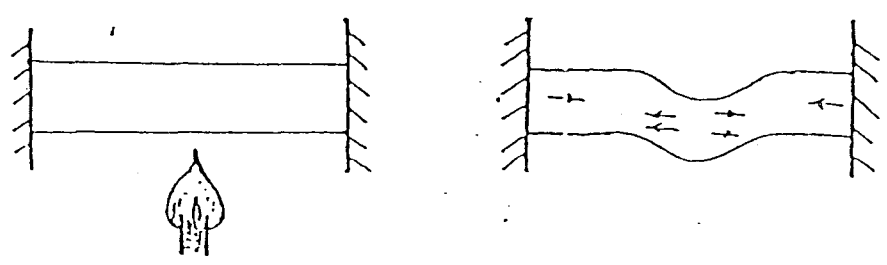
در روشهای سنتی یکی از مشکلات تولید، تولید قطعات ظریف است چرا که قطعه باید ابتدا توسط نگهدارنده ها (clamp) گرفته شود که باعث خراب شدن و کاستن از ضخامت قطعه میشود ولی در اینجا نیروی خیلی کمی برای نگهداشتن قطعه کار لازم میباشد در گاهی موارد اصلاً احتیاجی به نگهدارنده نیست. مثلاً در بسیاری موارد میتوان توسط نگهدارنده های ساده ای همچون، چسب قطره ای و یا از clamp های ساده جهت نگهداشتن قطعه کار استفاده کرد.

وقتی با سنباده کاری یا EDM انجام میشود به دلیل ذوب شدن ناچیزی از قطعه و بعد سریع سرد شدن آن یک ساختمان بازپخت حاصل میشود. چون در این حالت ضخامت ایجاد شده در حدود ۷٪ آن بخار شده و تقریباً ۹۳٪ آن بصورت Recast layer یا Resdidfied layer باقی میماند. سپس باز هم میتوان روی EDM کار کرد و این ۹۳٪ را کاهش داد.

این تست مذاب باقیمانده به دلیل وجود دی الکتریک ماشرنج سرد شده و مارتنزیت میکرو سختی سطحی ایجاد میشود که تقریباً در تمامی موارد موضوع به نفع ماست. از طرف دیگر چون معمولاً دی الکتریک ها پایه کربنی دارند که در حین عملیات کربن آزاد شده و در سطح نفوذ میکند و باز هم سختی سطحی ایجاد میکردد. البته اگر درصد کربن آنقدر افزایش پیدا کند که حتی از محدوده چدن هم گذرد باعث نرمی میشود ولی در EDM تقریباً هرگز این اتفاق نمی افتد مگر آنکه جرقه آرک ایجاد شود پس قطعات تولیدی با EDM به دلیل آنکه سختی سطحی پیدا میکنند، دیگر احتیاجی به عملیات حرارتی ندارند و این عمل برای مواردی نه دو قطعه روی هم حرکت و لغزش دارند در تماس هستند نقطه ای ست است چرا که حرکت مواد در روی هم در حالت سرد و یا گرم باعث بالا رفتن مقاومت در مقابل سایش (wear) میگردد.

۵) سختی سطحی و تنش پس ماند کششی در سطح در کارهائی که با فشار توأم میباشد حسن بسیار بزرگی در افزایش عمر قالب است.

چنانچه به عنوان مثال وسط یک میله را که بین دو دیوار محبوس شده است، حرارت دهیم در آن موضع ماده سیلان پیدا کرده به دیوارها تنش فشاری اعمال میکند (شکل a- ۲-۴) حال اگر منبع حرارت را برداشته و میله را یکباره سرد کنیم ماده سیلان پیدا کرده فرصت برگشت را پیدا نمیکند و چون میل دارد افزایش طول خود را از دست بدهد (انقباض) و جا و زمان کافی در اختیار ندارد، این کاهش طول به صورت تنش کششی حرارتی ظاهر میگردد. (شکل b-۲-۴)



(a) (b)

شکل (۲-۴)

و نیز چون فلز در اثر حرارت به فاز (γ) رفته و به یکباره سرد شده است تبدیل به مارتنزیت (M) می گردد و همانطور که میدانیم فاز مارتنزیت بسیار سخت میباشد و به دلیل دو عامل ذکر شده در فوق (سختی و تنش کششی حرارتی) ترکهای میکرونی (Micro cracks) بوجود میآید. همین مطلب نیز در حوضچه مذاب اتفاق می افتد که به تنش بوجود آمده، تنش پس ماند حرارتی- کششی میگویند. هرگاه قطعه را تحت تنشهای دینامیکی قرار دهیم (کویل کششی و فشاری)، دو حالت ممکن است پیش آید:

الف) چنانچه تنش کششی به ترک وارد شود، ترک را باز کرده و در آن تمرکز تنش بوجود آورد

یعنی اگر تنش در نقاط دیگر قطعه کار 6 باشد در نقطهٔ ترک : 26 و یا حتی 36 خواهد برد دست یابیم

شکل ترک ، زوایا و حتی قطعهٔ کار خواهد بود. حال اگر بر اعمال این نیروی دنیا یکی اضافه کنیم

تمرکز تنش هم که هست ، باعث کار سختی و آنهم باعث تر شدن قطعهٔ کار میشود و در نهایت

ترک گسترش پیدا کرده و قطعه خواهد شکست . (شکل ۹- ۲-۱-۴) .

ب) چنانچه تنش فشاری به ترک وارد گردد ، یعنی در جهتی که لایه‌های بالای تر تحت فشار و

لایه های پایین آن تحت کشش باشند ، ترک تحت یک تنش فشار قرار خواهد گرفت یعنی کوپل

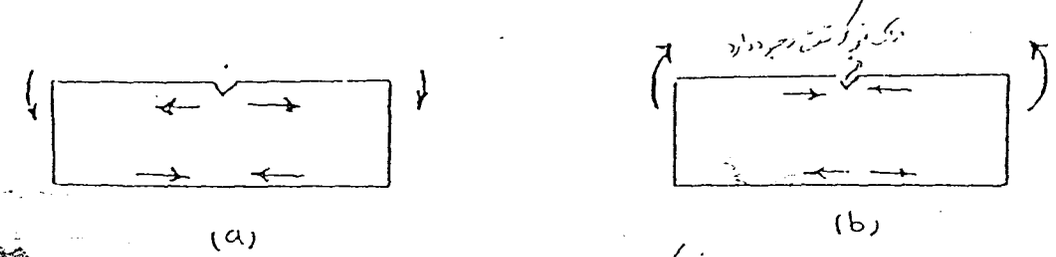
در جهت بسته شدن ترک است (شکل ۵ - ۲-۱-۴) .

حالت الف یک حالت مضر برای قطعه کار ما میباشد (تحت تأثیر نیروی کششی) امتداد (ب) یک

حالت مفید برای ماست . پس در قالب‌هایی که معمولاً تحت فشار هستند (مانند پرسکاری

اکستروژن ، فورجینگ) نیروی فشاری باعث میشود که میکرو ترکها بسته شوند و در حد ماکرو

ترکها در این حالت نمی‌تواند عامل ضعیف کننده باشد.



شکل (۲-۱-۴)

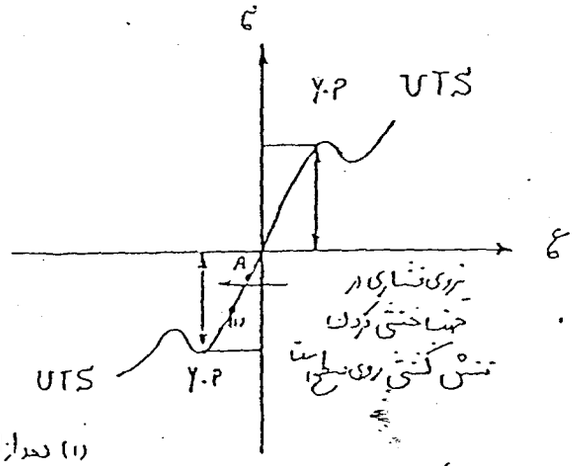
حال چنانچه قطعه‌ای تحت فشار قرار گیرد : این فشار در جهت خنثی کردن آن نیروی

کششی سطح است. حتی آن نیروی فشاری ممکن است در حدی نباشد که بتواند این

تنش کششی پس مانده را کاملاً خنثی کند ، چه رسد به اینکه به منطقهٔ فشاری دیاگرام

۴-۶ وارد شود و یا حتی اگر نیروی فشاری آنقدر زیاد باشد فقط تا یک مقداری

در محدوده نشاری دیاگرام ع - ε وارد میشود ولی به نقطه ۰.۲P نمیرسد و قطعه کار سیلان نخواهد داشت. دیاگرام ع - ε برای یک قطعه فولادی بصورت زیر خواهد بود.



(۱) بعد از اعمال فشار قطعه کار در این وضعیت قرار خواهد داشت.

شکل (۲-۵)

پس این امر هنگامی است که تنش کششی روی سطح باشد، چرا که در حالت نشاری قطعه کار به نقطه ۰.۲P نخواهد رسید. در حالیکه اگر این تنش پس مانده نبود (مثلاً قالب توسط دستگاه فرز ساخته شده بود) آنموقع وقتی در دیاگرام فوق مثلاً در نقطه A قرار داشت، تحت فشار قرار میگرفت، نیروی فشاری باعث می شد که قطعه به ۰.۲P رسیده و سیلان پیدا کند. لذا به همین دلیل ست که قالبی که با ماشین اسپارک ساخته شده عمر آن خیلی بیشتر از قالبهایی است که با ماشین فرز ساخته میشود. (به علت تنش های پس مانده کششی که در آن ایجاد می شود) و مشکل سیلی

۶) امکان دریافت اطلاع از فرآیند به شاکلی یا به شیوه های مختلف.

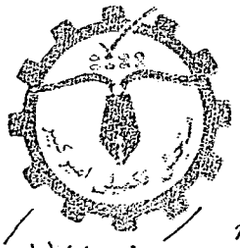
بدلیل طبیعت الکتروترمال پروسه (electro thermal) امکان اطلاع رسانی در طول حتی یک میکروثانیه نیز وجود دارد.

الف) بوسیله تجزیه و تحلیل صدای جرقه آن. توسط یک میکروفن صدای آن را

دریافت و توسط یک تجزیه کننده نوع جرقه و اینکه جرقهٔ ARC اتفاق می افتد یا SPARK را تشخیص داد. ب) به وسیلهٔ امواج الکترومغناطیس که در حرا تولید میشود.

حتی به وسیلهٔ یک رادیو در محدوده فرکانس باند SW که آن و در حدود 100 MHz - 100 KHz میتوان پرتوهٔ EDM را مونیتور کرد!

ج) وقتی که امواج الکترومغناطیس تولید شده با فرکانس 1MHz هستند و انقطاع در آنها وجود ندارد معلوم است که: پرتوه درست میرکرده و جرقهٔ SPARK اتفاق می افتد و نیز مدار باز و اتصال کوتاه اتفاق نمی افتد. درحالیکه اگر پالسهای زیر 1MHz تولید بشوند معلوم میگردد که: پرتوه درست میرنمی کند و پرتوهٔ ARC ای داریم و ماشین طوری هست که خودش مانند یک بی سیم عمل می کند و شما می توانید با یک رادیویی که همراه دارید حتی در فاصله زیاد هم این پارازیتها را گرفته و از وضعیت کارکرد ماشین اطلاع حاصل کنید.



ج) با استفاده از جریانهای الکتریکی.

یک اسیلوسکوپ بین الکترود و قطعه کار وصل کرده و پالسها را نگاه می کنیم و آنها را به یک analyzor داده و یا حتی میتوان این پالسها را ضبط نمود و با استفاده از یک سیستم analog to digital گذارید تا در طول زمان جرقه از پالس ولتاژ Sample گیری کند، سپس این ها را روی Hard disk کامپیوتر ضبط کرده و بعداً میتوان به یک analyzor بدهیم. پس دیده میشود که این پروسه را خیلی راحت میتوان کنترل و در جهتی که مطلوب ماست، آن را سوق داد. درحالیکه در

- روشهای دستی بدین سادگی نمیتوان اطلاعات لازم را دریافت نمود (بطور مثال درجه حرارت
- براده و نیز نتیجه ابزار در حین عملیات) .
-

« کاربردها »

عمدهٔ کاربرد EDM در ابزارسازی و قالبسازی است اما این بدان معنی نیست که از EDM
نتوان در تولید انبوه استفاده کرد .

« ساختمان ماشین »

ماشین EDM علی الاصول از چهار قسمت تشکیل شده است البته بعضی از انواع EDM لوازم
اضافی هم دارند . مثلاً ماشین وایرکات سیستم تغذیه سیم دارد . اما بطور مشخص
هر ماشین EDM از چهار قسمت بصورت ذیل تشکیل شده است .

1) Power supply system سیستم تأمین کننده قدرت

2) Tool feed system (Gap control system) سیستم تغذیه ابزار

3) Dielectric system سیستم دی الکتریک

4) Machine Mechanical comPonets اجزاء مکانیک ماشین

(۱) سیستم مولد قدرت ماشین (Power supply system)

سیستمهای مولد قدرت دستگاههای EDM بسیار متعدد بوده و شاید در حدود ۱۶ یا
۱۷ سیستم باشند ولکن ما در اینجا فقط سه سیستم را بصورت ذیل بررسی میکنیم .

الف) ژنراتور قدرت R.C

ب) ژنراتور قدرت ایزوفرکانس Iso frequency

ج) ژنراتور قدرت ایزوپالس Iso pulse

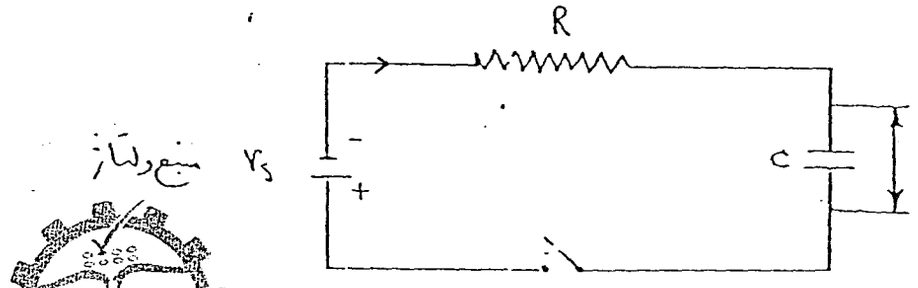
الف) سیستم ژنراتور قدرت R.C Power supply sys.

ماشین EDM در این سیستم مجهز بوده است ولی به دلیل پرداخت دقیق و عالی fine Finish هنوز کاربرد دارد. روی برخی از این ماشینها نام پالس ثانویه و روی برخی دیگر پالس ژنراتور نام نهاده اند. قبل از شروع بحث لازم است دو اصطلاح توضیح داده شود.

منبع جریان . منبعی است که هر چقدر از آن (ولتاژ) بگیرید جریان آن ثابت باقی میماند.

منبع ولتاژ . منبعی است که هر چقدر از آن جریان بگیرید ولتاژ در آن تغییری نمی کند.

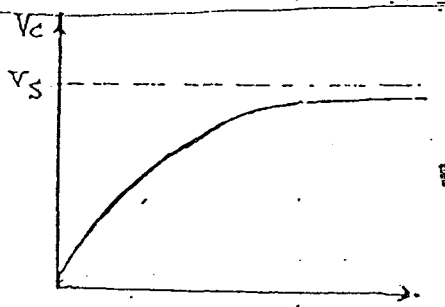
سیستم R.C از یک مقاومت و یک خازن و یک سوئیچ تشکیل شده است (شکل ۲-۶)



شکل (۲-۶)

* زمانی که سوئیچ SW قطع است ولتاژ دو plate خازن صفر است. وقتی که سوئیچ SW را می بندید الکترونها از قطب منفی منبع شروع به حرکت کرده و در روی plate بالایی خازن ذخیره میشوند این بارهای منفی، بارهای همنام خودشان را از plate پایینی خازن دفع کرده و طرفی هم که متصل به قطب مثبت است بارهای دفع شده را جذب میکند. در نتیجه plate بالایی منفی و plate پایینی مثبت میشود. بخش بارهای منفی روی plate بالایی دقیقا بارهای منفی در plate پایینی باعث ایجاد یک اختلاف پتانسیل بین دو plate خازن میشود از همان لحظه ای که سوئیچ را میزنید الکترونها شروع به حرکت میکنند

ودرروی Plate بالایی بجمع میکند. هرچقدر مقاومت این بجمع بیشتر باشد به همان میزان ولتاژ دوسر خازن V_C بالا خواهد رفت. اگر سوئیچ را به مدت طولانی، تا زمان بی نهایت بسته نگاه دارد ولتاژ دوسر خازن در یک لحظه ای ثابت مانده و دیگر افزایش پیدا نمیکند که در اینحالت ولتاژ دوسر خازن برابر ولتاژ منبع V_S خواهد شد. اما چون منبع V_S، منبع ولتاژ است با هر چقدر جریان از آن گرفته شود از آن، ولتاژ V_S تغییری نخواهد کرد. (شکل ۲-۷)



شکل (۲-۷)

معادله این منحنی از قانون اهم بدست میآید.

قانون اهم: مجموع اختلاف پتانسیلها در یک مدار بسته صفر است.

$$V_S - V_R - V_C = 0 \quad \text{یا} \quad V_S = V_R + V_C$$

$$\begin{cases} V_R = R \cdot I \\ V_C = \dfrac{Q}{C} \\ Q = \int I\,dt \\ V_S = V_R + V_C \end{cases} \Rightarrow V_S = RI + \frac{\int I\,dt}{C} \Rightarrow 0 = R\frac{dI}{dt} + \frac{I}{C}$$

$$\Rightarrow \frac{dI}{I} = -\frac{dt}{RC}$$

با توجه به شرایط اولیه: $\begin{cases} t=0 \rightarrow V_C = 0 \\ t=\infty \rightarrow V_C = V_S \end{cases}$

$$\Rightarrow \int_{I_0}^{I} \frac{dI}{I} = -\int_0^t \frac{dt}{RC} \Rightarrow \ln\frac{I}{I_0} = \frac{-t}{RC}$$

$$\Rightarrow \boxed{I = I_0 e^{\frac{-t}{RC}}}$$

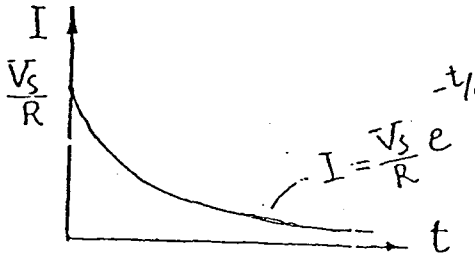
از طرف دیگر $V_C = \dfrac{\int_0^t I\,dt}{C} \Rightarrow V_C = \dfrac{\int_0^t I_0 e^{\frac{-t}{RC}}\,dt}{C}$

$$\Rightarrow \frac{I_0}{C}\left[-RC\,e^{\frac{-t}{RC}}\right]_0^t \Rightarrow V_C = RI_0\left[1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right], \; V_C = RI_0$$

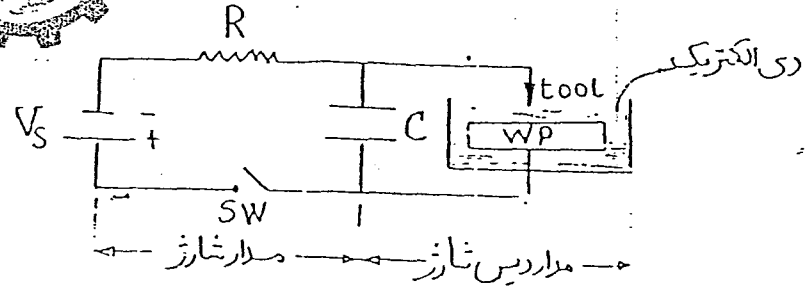
$t \to \infty$

$I_0 = \dfrac{V_S}{R}$ دقت I_0 و V_C را در فرمایید هم دارم: $\boxed{I = \frac{V_S}{R} e^{-t/RC}}$, $\boxed{V_C = V_S\left(1 - e^{-t/RC}\right)}$

همانطوریکه پیش تر اثبات کردیم داریم: $I = \frac{V_S}{R} e^{-t/RC}$ از اینرو در لحظه‌ی $t=0$ داریم که $I = \frac{V_S}{R}$ یعنی اینکه خازن مثل (یک سیم) اتصال کوتاه عمل نموده است و اگر $t \longrightarrow \infty$ آنگاه $I = 0$ که در این حالت خازن نقش مدار باز (open - Circuit) را ایفا می نماید. حال با این اطلاعات منحنی جریان (I) را نسبت به زمان (t) رسم میکنیم)

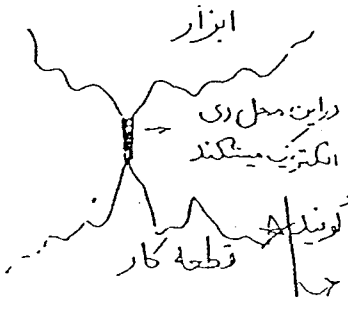


مدار تخلیه‌ی بار (discharge)



شکل (۲-۸)

(اگر در مدار دیس شارژ فاصله‌ی بین قطعه کار و ابزار در داخل تانک دی الکتریک به اندازه‌ی کافی دور از هم باشند در این حالت خازن شارژ شده و ولتاژ دو سر آن به سمت V_S میل میکند. اما اگر فاصله‌ی بین قطعه کار و ابزار کم باشد هرچند دی الکتریک در بین آنها موجود است اما بعلت نازکی گپ، میدان الکتریکی قوی ترشده و به هرحال دی الکتریک در میدانی در نزدیکترین فاصله بین ابزار و قطعه کار می شکند. این شکستن در ولتاژی کمتر از ولتاژ V_S میشکند که این ولتاژ را ولتاژ بریک دارن (brake down) گویند)



- اثر شکستن دی الکتریک، دی الکتریک یونیزه میشود و در این لحظه پلازما تشکیل می‌-
- گردد و با تشکیل پلاسما تمام باری که روی خازن جمع شده است به یکباره تخلیه می‌گردد.

- ضمن ولتاژ دو سر خازن به صفر می‌رسد و انرژی آن تخلیه میشود. (انرژی خازن برابر

است با $W = \frac{1}{2} C V_b^2$)

- نحوه‌ی بدست آوردن این فرمول به صورت زیر است:

$$dW = V_c \cdot I \cdot dt \quad *$$

$$Q = C \cdot V_c = \int I dt \xrightarrow[\text{میگیریم}]{\text{از طرفین مشتق}} C \cdot dV_c = I \cdot dt$$

$$\Rightarrow I = \frac{C \cdot dV_c}{dt}$$

- مقدار بدست آمده برای I را در فرمول * قرار میدهیم، از اینرو خواهیم داشت:

$$dW = V_c \cdot \frac{C \cdot dV_c}{dt} \cdot dt \Rightarrow \int_0^W dW = \int_0^{V_b} C \cdot V_c \cdot dV_c$$

$$W = \frac{1}{2} C \cdot V_b^2$$

- که: W: انرژی ذخیره شده در خازن، C ظرفیت خازن و V_b ولتاژ شکست

دی الکتریک میباشد.

- پدیده هایی که در هر عمل ماشینکاری با آنها سروکار داریم عبارتند از:

۱- سرعت براده برداری (در خشن کاری سرعت براده برداری زیاد و در پرداخت کاری کم است)

۲- صافی سطح.

۳- فرسایش ابزار

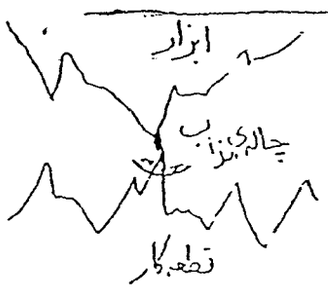
۴- تلرانس. مجاز در ماشینکاری به روش EDM گشادی کناری نیز مطرح است.

این دو (تلرانس و گشادی کناری) مفاهیمی هستند که مستقل از هم بوده اما خیلی بشبیه به همند .

صافی سطح

جرقه ایجاد شده در ماشین EDM دارای کار مایه‌ای (انرژی) برابر با $W = \frac{1}{2}CV_b^2$ میباشد که همه‌ی این انرژی در یک کانال کوچک جرقه تخلیه میگردد . تمرکز انرژی در این کانال باعث ذوب و سپس تبخیر قسمتی از سطح قطعه کار می‌شود که هر قدر این انرژی بیشتر باشد به همان نسبت چاله‌ی مذاب ایجاد شده بزرگتر شده و در نتیجه زبری سطح را می افزاید .

پس نتیجه میگیریم که زبری ماشین کاری با مدار RC تابع انرژی جرقه بوده و خود این انرژی



بپرد دو عده رمیباشد الف - ظرفیت خازن

ب - ولتاژ برنیک داون (ولتاژ شکست دی الکتریک) break down

پس اگر بخواهیم زبری ماشین کاری را کنترل نمائیم

این کار تنها با در عامل یاد شده در بالا عملی است . از اینجا نتیجه می شود که تغییر در مقاومت R یا ولتاژ منبع و سایر عوامل هیچگونه تأثیری در زبری سطح ماشینکاری شده نخواهد داشت مگر دو عامل فوق . نتیجه‌ی دوم اینکه هرچه ظرفیت خازن بیشتر باشد سطح ماشینکاری شده زبرتر خواهد بود .

ولتاژ شکست گپ (V_b) تابع عوامل بسیاری است از جمله:

الف - جنس دی الکتریک : اگر جنس دی الکتریک جنس ضعیفی باشد در V_b پایینی جرقه ایجاد می شود و سطح صافتر است . برای مثال نفت سفید (نفت بدون بو) اگر

به جای روغن ترانس استفاده شود چون رقیق تر است و غلظتی کمتر دارد سطح ماشین‌کاری شده صافتر است. معمولاً هرمایعی که رقیق تر است دی الکتریکی ضعیفتر خواهد بود. از اینرو در پرداخت کاری از دی الکتریک ضعیفتر و در خشن کاری از دی الکتریک قوی تر بهره برداری می شود.

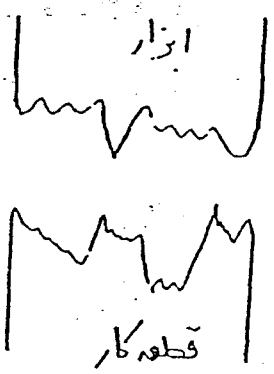
در ماشین وایرکات آب دی یونیزه پرداخت بهتری میدهد و این پرداخت بهتر است از پرداخت توسط دی الکتریک نفت سفید در ماشین اسپارک معمولی. زیرا آب دی یونیزه نسبت به نفت سفید دی الکتریکی ضعیفتر میباشد. حتی اگر گپ ماشین وایرکات با گپ ماشین اسپارک برابر باشد باز هم می بینیم که در ماشین وایرکات پرداخت بهتری خواهیم داشت. $h_{\text{متوسط}}$

ب - فاصله ابزار و قطعه کار:

هرچه فاصله ی بین ابزار و قطعه کار (گپ) را زیاد کنیم سطح نهایی خشن تری شود. پس اگر خواسته باشیم با مدار RC پرداخت کاری انجام دهیم باید در گپ کوچک این کار را انجام دهیم. (زیرا V_b کاهش می یابد و در نتیجه سطح صافتر میگردد). با توجه به این توضیحات درمی یابیم که صافی سطح تابع اندازه ی گپ میباشد، به همین دلیل است که مدار RC را مدار $h_{\text{وابسته}}$ به گپ میگویند. (Gap dependent system)

علاوه بر صافی سطح پدیده های دیگری به اندازه ی گپ وابسته اند که در آینده بدانها اشاره خواهد شد.

پ - زبری و هندسه ی سطح قطعه کار و ابزار (شکل ۲-۹)



شکل (۲-۹)

ب- جنس ابزار و قطعه کار

ث - مقدار متوسط آلودگی در دی الکتریک گپ ماشینکاری و توزیع آلودگی

دی الکتریک حین ماشینکاری در اثر عمل جرقه های قبلی به موادی از قبیل ذرات قطعه و غیره آلوده می شود. دی الکتریک به مواد مختلفی مثل کربن، هیدروژن و هیدروکربورهای سبکتر مثل متان، اتان، پروپان، اتیلین، استیلین و تمام گازهای ایجاد شده دیگر تجزیه می شود. بعلاوه خودی الکتریک در درجه ی حرارت ایجاد شده توسط جرقه بخار می شود. همچنین ممکن است به مایعات سبکتر تبدیل گردد مثل تبدیل شدن نفت به بنزین (C_8H_{18}) و نیز گاهی و تنها پدیده ی آلترا سیون (پلی مری زیشن) — Poly Meration — اتفاق می افتد یعنی اینکه هیدروکربورهای سنگین تر از نفت بدست می آیند.

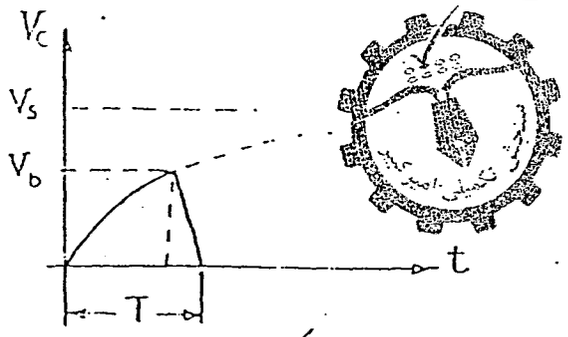
ج - درجه ی حرارت متوسط دی الکتریک گپ ماشینکاری و توزیع درجه ی حرارت

چ - فشار دی الکتریک در گپ ماشینکاری

سرعت بارگذاری

می دانیم هنگام ایجاد جرقه، انرژی خازن ($W = \frac{1}{2} C V_b^2$) تخلیه می شود که زمان این تخلیه بسیار کوتاه است که چیزی حدود 0.3 تا 0.4 میکروثانیه یا شاید اندکی کمتر از این مقادیر میباشد. این زمان در مقایسه با زمان شارژ خیلی کم و در حدود 0.01 مدت شارژ است.

بنابراین می‌توان در مقابل زمان شارژ از زمان دیس‌شارژ چشم پوشاند.



شکل (۱۰۰۲)

زمان دیس‌شارژ + زمان شارژ = T

می‌توان از رابطه‌ی $V_c = V_s(1 - e^{-t/RC})$ به دست آورد. زمانی که خازن شارژ می‌شود و می‌خواهد عمل تخلیه را آغاز نماید $V_c = V_b$ می‌باشد پس

$$V_b = V_s(1 - e^{-T/RC}) \Longrightarrow T = R.C.\,Ln\,\frac{V_s}{V_s - V_b}$$

زمان شارژ

فرض میکنیم $K = Ln\,\frac{V_s}{V_s - V_b}$ است که k یک عدد ثابت است در نتیجه: $T = KRC$

(T پریود یک شارژ و دیس شارژ است)

برگردیم به مبحث اصلی یعنی سرعت بارگیری. واضح است که اگر مقدار قدرت الکتریکی زیاد شود مسلماً بار بیشتری برداشته می‌شود. در شرایط ویژه بین توان مصرفی و سرعت بارگیری یک رابطه‌ی خطی وجود دارد. توان برابر است با مقدار کار انجام شده در واحد زمان و سرعت بارگیری برابر است با مقدار حجمی از براده که در واحد زمان برداشته میشود.

رابطه بدین صورت است: $\dot{V} = K' \cdot P$ که $\dot{V}$ مقدار حجم براده به واحد زمان و K' در شرایط خاص مقدار ثابتی است.

داریم که $P = \frac{dW}{dt} = \frac{\Delta W}{\Delta t}$. فرض میکنیم V_b در طول ماشینکاری در تمام جرقه‌ها با هم یکی است (البته در عمل چنین نیست زیرا هر جرقه که اتفاق می‌افتد روی جرقه‌ی بعدی تأثیر میگذارد از این نظر که دی الکتریک، ابزار و قطعه کار را آلوده میکند). اگر W را بر T تقسیم نماییم مقدار توان به دست میآید:

$$P = \frac{W}{T} = \frac{\frac{1}{2} C V_b^2}{K.RC} = \frac{V_b^2}{2K.R}$$

$P = \frac{V_s^2 (1-e^{-K})^2}{2KR}$: پس $V_b = V_s(1-e^{-K})$ از طرفی داریم

- از این رابطه نتیجه میگیریم که توان با مجذور ولتاژ منبع نسبت مستقیم دارد.

معمولاً ولتاژ منبع مدارهای RC ساخته شده ثابت در نظر گرفته می‌شود که ممکن است یکی از دلایل این کار بالا بردن سرعت باربرداری به ازای ولتاژ بالا باشد. البته در مدارهای RC نسبت به سایر مدارهایی که مطرح خواهند شد سرعت باربرداری کمتر است. علت این است که زمان حرفه در عدد زدگی صدم زمان مرده (تلف شده) میباشد، لذا سرعت پایین است.

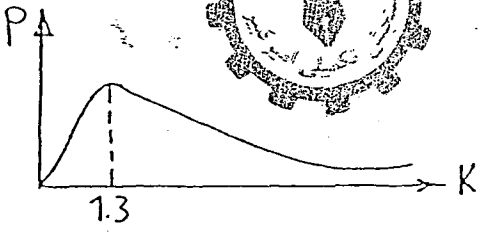
- پارامتر دیگر مقاومت R میباشد که با کاهش R سرعت باربرداری افزایش می‌یابد.

- با زیاد شدن سرعت باربرداری تأخیر در مقدار K نیز در مقدار توان موثر است. برای بحث روی این پارامتر می‌بایست منحنی توان را برحسب K ترسیم نمود. برای اینکار ابتدا نقاط اکسترمم (Extrem points) را بدست می‌آوریم.

$$\frac{dP}{dK} = 0 \Longrightarrow K = 1.3$$

$$\left.\begin{array}{l} K = 1.3 \\ \frac{d^2P}{dK^2} < 0 \end{array}\right\} \Longrightarrow$$ نقطه‌ی ماکزیمم منحنی است. $K = 1.3$

$$\begin{cases} K = 0 \Longrightarrow P = 0 \\ K \longrightarrow \infty \Longrightarrow P \longrightarrow 0 \end{cases}$$



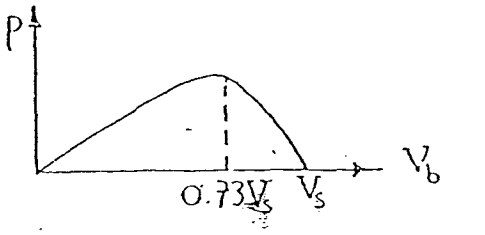
اما داریم که $K = Ln \frac{V_s}{V_s - V_b}$، از اینرو بحث راجع به منحنی فوق کمی سخت است.

پس منحنی P را برحسب V_b ترسیم می‌کنیم.

$K = 0 \Longrightarrow V_b = 0$

$K \longrightarrow \infty \Longrightarrow V_b = V_s$

$K = 1.3 \Longrightarrow V_b = 0.73\, V_s$



زمانی که $V_b = 0$ میباشد، ابزار با قطعه کار فاصله‌ای نداشته و به هم چسبیده‌اند

در این حالت باربرداری وجود ندارد و توانی که در گپ ماشینکاری صرف می‌شود صفر است.

حال اگر فاصله‌ی ابزار و قطعه کار را زیاد کنیم به همان نسبت V_b افزون خواهد شد و در نتیجه

توان هم بیشتر خواهد شد. در نتیجه‌ی افزایش توان سرعت باربرداری بالا می‌رود.

سرانجام به جایی می‌رسیم که $V_b = 0.73\ V_s$ می‌شود که در این نقطه سرعت باربرداری

بیشینه است یعنی بیشینه‌ی توان را این گپ اعمال می‌شود. از این به بعد هرچه گپ

را افزایش دهیم، توان و سرعت باربرداری کاهش می‌یابد تا جایی که V_b برابر با V_s گردد.

در اینجا است که دوباره توان به صفر می‌گراید و عملاً باربرداری صورت نمی‌گیرد.

فرسایش ابزار

مشکلی که همیشه در EDM مطرح میباشد فرسایش ابزار است البته می‌توان آن را کاهش

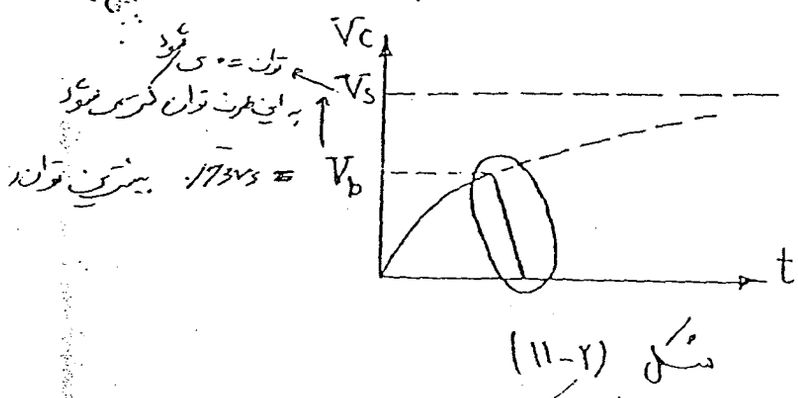
داد و به صفر نزدیک نمود اما هرگز صفر نمی‌شود. این مسئله امری طبیعی است زیرا کانال

پلاسمای ایجاد شده از یک سر به قطعه و از سر دیگر به ابزار متصل بوده که همواره مقداری را

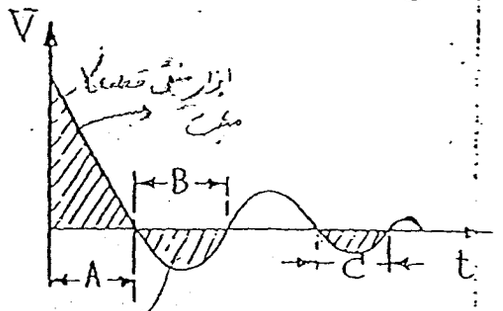
از هردو (ابزار و قطعه کار) ذوب و تبخیر خواهد نمود.

اگر تسمت مشخص شده در نمودار $V_c - t$ را با بزرگنمایی بالاتری رسم کنیم نمودار زیر

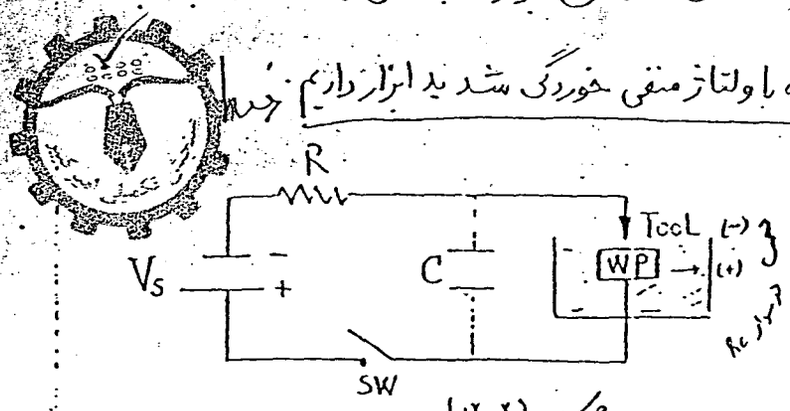
حاصل می‌شود.



شکل (۲-۱۱)



قسمت هاشور خورده با ولتاژ مثبت بخشی که در آن ابزار قطب منفی و قطعه کار قطب مثبت میباشد و در دو قسمت هاشور خورده با ولتاژ منفی خوردگی شدید ابزار داریم خ



✓ در مدار RC ابزار به قطب منفی و قطعه کار به قطب مثبت متصلند.

شکل (۲-۱۲)

طرز و اما چگونگی فرمایش ابزار :

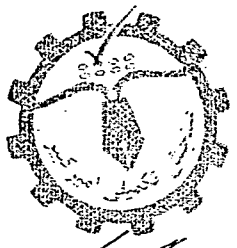
(میدانیم بدین دلیل که الکترون در حدود ۱۸۳۷ مرتبه سبکتر از پروتون میباشد و هر یون شامل تعدادی الکترون و پروتون میباشد که تعادل بین تعداد الکترونها و پروتونهای آن به هم خورده، از اینرو الکترونها از یونها پرتحرکترند. حال وقتی که بین ابزار و قطعه کار جرقه ایجاد می شود الکترونها از طرف قطب منفی به سوی قطب مثبت حرکت میکنند. در برخورد با سطح قطب مثبت (قطعه کار) با یک چالشی مذاب مواجه می شوند (همچون پرتاب سنگ به درون ظرف آب) و در اثر برخورد از روی قطعه کار باربری دارند.

برمی گردیم به نمودار صفحه‌ی پیش. در بخش A، ابزار قطب منفی و قطعه کار قطب مثبت میباشد لذا برادە از روی قطعه کار کنده می شود. در قسمت های B، پیش از اینکه جرقه از بین رود، پلاریته معکوس گشته و این بار بار از روی ابزار برداشته می شود (چون در این حالت قطعه قطب منفی و ابزار قطب مثبت است). در هنگام تعویض پلاریته، در مدت است که ولتاژ به صفر میرسد اما تا از بین رفتن جرقه مدت زمانی لازم است که در این فاصله‌ی زمانی خوردگی شدید ابزار وجود خواهد داشت) برای جلوگیری از خوردگی شدید ابزار باید موجب عدم تغییر پلاریته شد. وجود تغییر پلاریته به دلیل خاصیت خود القایی (Self Induction)

سیمهای رابط میباشد.[1] البته این سیمها راست بوده و میدان حاصله در اطراف آنها ضعیف است اما نرخ (Rate) تغییر میدان خیلی بالاست. اگر فرض کنیم خازن را در زمان شارژ T با جریان متوسط پنج آمپر شارژ نمایم و در یکصدم این زمان، خازن تخلیه (دیس-شارژ) شود خواهیم داشت:

$$5 \times T = I_{discharg} \times 0.01T$$

$$\hookrightarrow \Rightarrow I_{discharge} = 500\ A$$



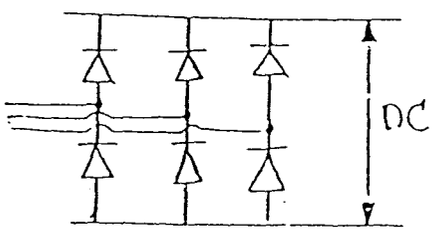
---

(۱) اگر از یک سیم جریانی (DC و یا AC) بگذرد در اطرافش یک میدان مغناطیسی تشکیل می شود. اگر این میدان ثابت باشد بر روی جریان گذرنده از سیم اثری نخواهد داشت اما اگر بنا به دلایلی این میدان دگرگون شود در داخل سیم جریانی القا می شود. این دگرگونی میتواند با تغییر جریان یا با نزدیک کردن آهنربا به سیم پدید آید. (میدان ایجاد شده از رابطه $E = -K \frac{d\Phi}{dt}$ بدست میآید که در آن $d\Phi$ میزان تغییر فلوی مغناطیسی را نشان میدهد). اگر سیم مستقیم باشد تأثیر جریان القایی در جریان اصلی کم است. همین سیم را اگر پیچانده و به صورت مارپیچ درآوریم تأثیر خیلی بیشتر می شود زیرا میدان حلقه ها با هم جمع شده و طبق قانون لنز با عامل پدیدآرنده ی خود مخالفت می نماید. $Z = \sqrt{R^2 + (LW)^2}$ که Z مقاومت ظاهری، L ضریب خود القایی سیم میباشد که با تعداد حلقه های سیم متناسب است. برای مثال اگر سیمی مستقیم به طول 20m را از طریق دوسرش به پریز برق بزنیم یا کنتور خواهد پرید و یا سیم خواهد سوخت اما اگر همین سیم را پیچانده حلقه حلقه نماییم تغییر حالت قبل رخ نمی دهد.

یعنی شدت جریان عمل تخلیه در زمان 0.01 به اندازه‌ی پانصد آمپر میباشد.
اگر به فرض زمان T برابر با 5c/μsec باشد آنگاه زمان تخلیه‌ی 0.01T = 0.5/μsec
خواهد گشت. طبق رابطه‌ی $e = -L \frac{dI}{dt}$ که در مورد خودالقایی داریم، چون جریان
I بالا و زمان t کم است لذا میزان میدان القایی (e) بسیار زیاد است به همین
دلیل مشاهده می‌شود که عمل پلاریته امری غیرقابل اجتناب است. برای کم کردن
آن می‌توان طول سیم‌های رابط را کوتاه نمود، بدین روش که تانک دی الکتریک را به
خازن نزدیک گردانیم. (همانطوری که در ماشین‌های بامدار RC، این موضوع دیده می‌شود).
همانطور که گفته شد کم کردن پلاریته نقش عمده‌ای در کاهش فرسایش ابزار دارد که این موضوع
با کاهش دادن طول سیم‌های رابط انجام شد. کار دیگری که می‌توانیم انجام دهیم استفاده از
دیود* (یکسو کننده) میباشد که فقط اجازه‌ی گذر را از یک سو به جریان می‌دهد.

---

* دیودهایی که تا به حال جهت کامل سد کردن جریان ساخته شده‌اند فقط قادرند
در ولتاژ و جریان‌های پایین (حداکثر تا 1mA) را از خود عبور دهند که به آنها
سیگنال دیود میگویند. کاربرد این دیودها بیشتر در کامپیوترها میباشد.
اما دیودهایی که قابلیت عبور جریان بالا را دارایند معمولاً نشتی دارند و بطور کامل
جریان را یکسو نمیکنند. معمولاً از این نوع در یکسو سازی جریان برق سه فاز AC
استفاده می‌شود. مدار بستن این نوع

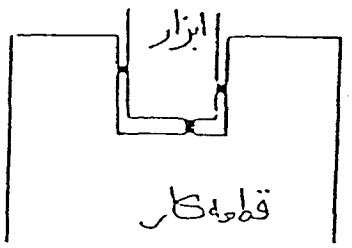


به صورت روبرو است:

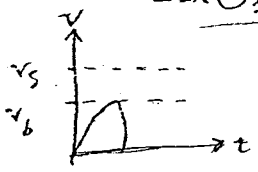
اگر از این گونه دیودها (دیودهای با قابلیت عبور جریان بالا) بهره برده و طول سیمها را نیز یکاهیم تا حدودی توانسته ایم جلوی فرسایش ابزار را بگیریم.

گشادی کناری و تلرانس:

در ماشین هایی که از مدار RC بهره برده می شود، ابزار ماشین همانطور که پیشانیش با سطح مادگی مشابه، در روی قطعه، به وسیله جرقه مرتبط است از کناره ها نیز ایجاد جرقه می نماید که وجود احتمالی این جرقه ها باعث باربرداری کناری می شود.



باید توجه داشت که اگر پیشانی ابزار را از سطح قطعه دورکنیم نزدیکترین نقاط برای جرقه زدن، کناره ها میباشند. در این حالت همچنین V_b بالا رفته و به خوردگی کناری کمک میکند.



البته مسأله ی گشادی کناری عمدتاً در خشن کاری پیش می آید زیرا برای افزایش سرعت باربرداری گپ را افزایش داده، نتیجتاً V_b را زیاد کرده ایم پس در کناره ها این پدیده رخ میدهد.

علت دوم ایجاد گشادی کناری ممکن است این موضوع باشد که:

ذراتی که از روی پیشانی قطعه برداشته می شوند بالاخره باید از جایی خارج شوند که در موقع خروج ممکن است فاصله ی موثر بین ابزار و قطعه کار را کاهش دهند (خواه این ذرات رسانا باشند یا نارسانا که اکثراً رسانا میشد). چرا

در خشن کاری هرچه میزان حجم باربرداری بیشتر باشد گشادی کناری به همان نسبت بیشتر خواهد بود. لذا ضروری است در روش EDM با بهره گیری از مدارهای RC

حتماً از دو نوع ابزار استفاده شود یکی ابزار خشن کاری و دیگری ابزار پرداخت کاری.

در این مواقع ابزار خشن کاری میبایست کوچکتر از سایز نهایی در نظر گرفته شود و سپس به کمک ابزار پرداخت سایز مورد نیاز را ایجاد کنیم.

با افزایش گشتاری کناری خود به خود تلرانس بهم خواهد خورد و خراب خواهد شد.

برای فهم بهتر مطلب مثالی می آوریم. فرض کنیم سکه ای را می خواهیم برای هدف معینی که در فاصله ی مشخصی مثلاً (مثلاً ۲ متری) قرار دارد پرتاب کنیم احتمالاً سکه تاکیک یا دو وجب دورتر از هدف نخواهد افتاد، اما اگر همان هدف را در فاصله ای مثلاً بیست متری قرار دهیم و سکه را به طرفش بیندازیم احتمالاً در فاصله ی یک تا دو متری هدف بیافتد.

(به همین ترتیب نیز میتوان گفت که هرچه گشتاری کناری کمتر باشد کنترل بر تلرانس بیش و هرچه گشتاری کناری بیش کنترل بر تلرانس کمتر است.)

درجلسهٔ گذشته مبحث EDM با تعریف و تاریخچهٔ اولین سیستم مولد جرقه که در واقع ابتدائی ترین سیستم بود، تمام مدار RC که شامل یک مقاومت و یک خازن و قطعهٔ مدار میباشد شروع شد و پارامترهای مؤثر در نتایج فرآیند بیان گردید. گفته شد که ماشینهای EDM از چهار قسمت تشکیل شده اند.

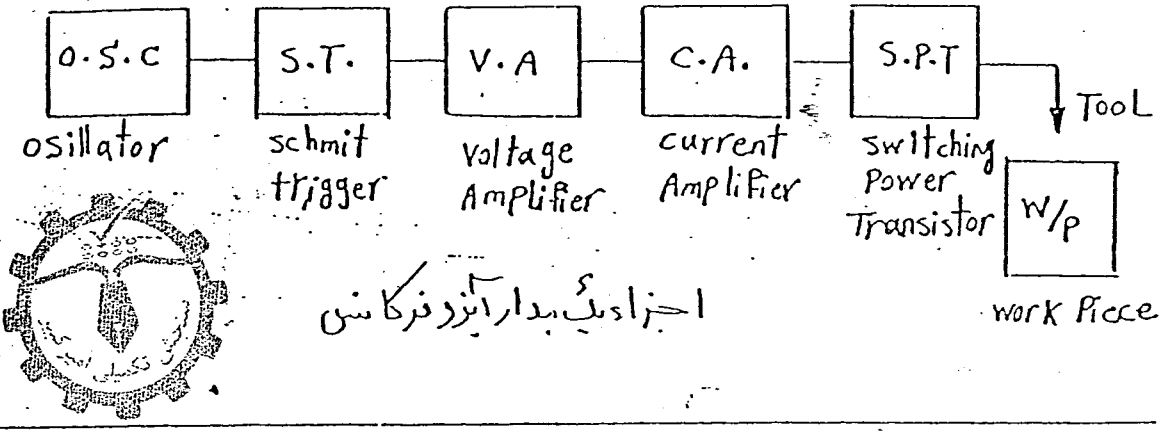
1. Power supply sys. سیستم مولد قدرت
2. Gap Control sys. سیستم کنترل دائمهٔ ابزار تا قطعه کار
3. Dielectric sys. سیستم دی الکتریک
4. Mechanical Components اجزای مکانیکی سیستم

همانطور یکه بیان گردید، ماشینهای EDM فقط مختص به ماشین اسپارک معمولی که در ایران شناخته شده است، نمیباشد بلکه ماشینهای Wire Cutting، Drilling، Grinding و غیره نیز جزو ماشینهای EDM هستند و همگی بر یک اساس کلی تخلیهٔ الکتریکی، ذوب و تبخیر ماده است استوارند و در واقع بر اساس پدیدهٔ الکترو ترمال کار میکنند. طبعاً چهار سیستم فوق می بایستی در همهٔ ی اینها وجود داشته باشند، در بعضی از آنها سیستم های اضافه تری وجود دارند. مثلاً در ماشین Wire cutting سیستم تغذیهٔ دینامیکی که در بحث های بعدی به آنها اشاره خواهد شد. قسمت Power supply به شکلها و مدارهای مختلف ساخته شده است. ساده ترین مداری که ما می شناسیم مدار RC بوده که در جلسهٔ قبل مفصلاً توضیح داده شد.

در این جلسه مدار آیزوفرکانس (Iso Frequency) که در بین مدارهای مورد استفاده در سیستم قدرت میباشد شروحاً بیان خواهد شد.

مدار آیزو فرکانس بطور کلی شامل قسمت‌های زیر است که هر قسمت به صورت یک box درست شده و شامل مدارهای پیچیده الکترونیکی میباشد که پرداختن به عمق و ریزه کاریهای هر یک از این مدارها در حوصله این کتاب نیست.

(۱) اسیلاتور (oscillator) که دیده میشود نوسان‌ساز یا المانی مربعی میباشد که این پالس دارای شدت جریان و ولتاژ کم است. مشخصه‌ی اسیلاتور جریان کم و ولتاژ کم است. وقتی از جریان کم صحبت میشود منظور جریان در حد میلی آمپر میباشد.

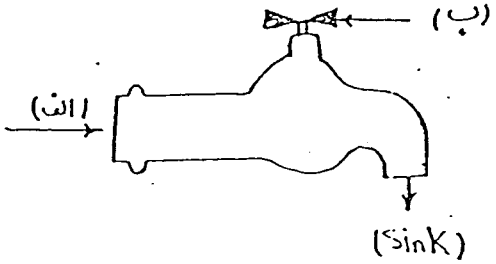


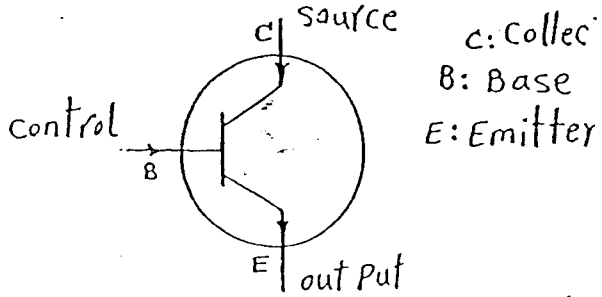
اجزاء یک مدار آیزو فرکانس

(۱) قبل از شروع بحث لازمست توضیحی در رابطه با ترانزیستورها داده شود.

ترانزیستور یک المان الکترونیکی است که به صورت مختلف ساخته میشود. بهترین مثالی که بدان دسته میتوان کار ترانزیستور را شرح داد شیر آب است. یک شیر آب سه قسمت دارای است:

الف - قسمتی که به مخزن آب متصل است ب - شیر باز و بسته کردن ج - مجرای خروجی (sink)





یک ترانزیستور هم دارای ساختمانی مشابه میباشد الف - قسمتی که به مخزن متصل است (source)

و نیز هنگام سخن گفتن از ولتاژ کم، منظور ولتاژ از (+5V تا -5V) میباشد. گاهی اوقات

بعضی از سیلاتورها هستند که میتوانند تا +15V ولتاژ تولید کنند. این جریان کم و

ولتاژ کم قادر نیست سیستم های قوی را به حرکت وادارد. منظور از پائین مربی یا این صورت

ب- بخش کنترل (control) و ج- قسمت خروجی (out Put). بخشهای مشخص

شده در شکل و ترانزیستور متناظر هم بوده و عملی مشابه انجام میدهند. اساس تمای

ترانزیستورها تقریباً برآنچه در شکل نشان داده شده است استوار میباشد.

شاید بتوان گفت ترانزیستورهای BiPolar (دوقطبی)، ابتدائی ترین نوع ترانزیستورهای ساخته-

شده، بودند. این ترانزیستورها با تحریک Base آنها توسط جریان، عمل باز و بسته شدن را

انجام میدهند. یعنی ترانزیستور مثل یک سوئیچ یا یک گذرگاه می که میتوان این گذرگاه را برای گذر

جریان برق، باز یا بسته و یا کم زیاد کرد، عمل می نماید. بعد از ترانزیستورهای BiPolar،

ترانزیستورهای دیگری ساختند از قبیل Field effect transistor. این ترانزیستورها نه به

واسطهٔ جریان بلکه به واسطهٔ ولتاژ تحریک میشوند، در این ترانزیستور به قسمت تحریک شونده

Base گفته نمیشود بلکه آنرا گیت (Gate) مینامند که البته همان کار Base را انجام-

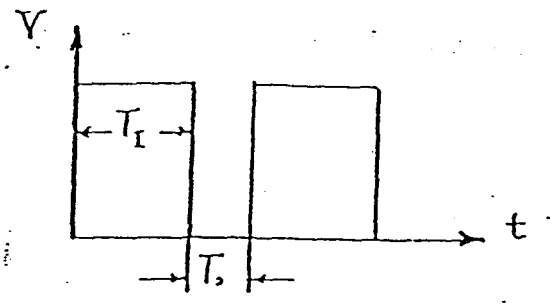
میدهد. قسمتی که به منبع وصل است (drain) و قسمت خروجی را source مینامند.

(بنابراین اسمها فقط عوض میشود و نحوه‌ی عمل همان است که قبلاً بیان شد.)

در اینجا Gate ترانزیستور بواسطه‌ی میدان الکتریکی عمل میکند. یعنی نیازی نیست برای

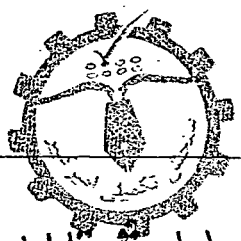
باز کردن ترانزیستور جریان داده شود بلکه فقط کافی است ولتاژ مناسبی به همراه یک جریان

نشان داده شده زیراست. میتوان مقدار T_I یا T_0 را توسط اسیلاتور تغییر داد (کم و یا زیاد نمود) که پس از تغییر سیستم همان پالس با T_I ، T_0 اعمال شده تولید خواهد شود.



T_I . زمان روشنی پالس μsec

T_0 . زمان خاموشی پالس μsec



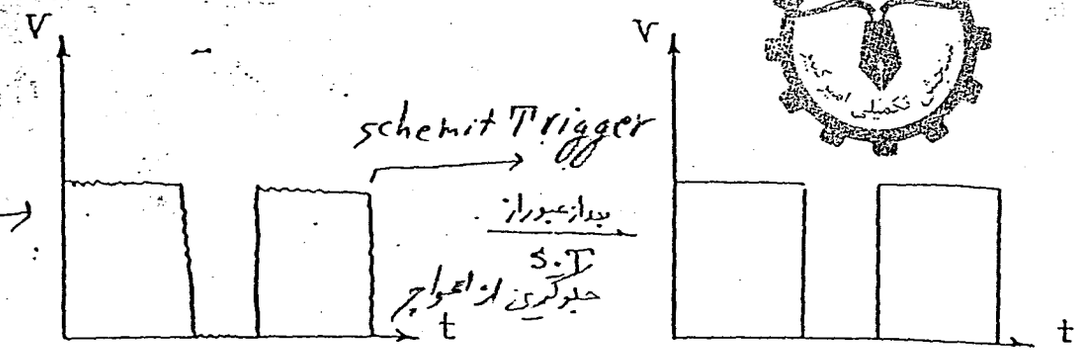
نیمه‌رسانا چیز دراسته اداده شود تا این دو تا از زنجیره گشته و خاصیت خازنی ایجاد گردد تا در Gate ، یک میدان الکتریکی حاصل شود. بدین وسیله ترانزیستور باز خواهد شد. علاوه بر اینها ترانزیستورهای دیگری نیز وجود دارند که مثلاً در آنها از اثر میدان مغناطیسی و یا نور، برای تحریک (بین Base) استفاده میشود و در اینجا از پرداختن به آنها پرهیز میکنیم. ترانزیستورهای BiPolar دو دسته هستند: الف - NPN ب - PNP

الف . NPN . این نوع ترانزیستورها از سه لایه نیمه هادی روی هم تشکیل شده‌اند. (semiconductor) به منزله همانند ساندویچ کالباس که نان‌های زیرین و رویی نیمه‌هادی N و لایه میانی نیمه‌هادی P میباشند) . در این نوع ، Collector به N ، Base به P متصل است .

ب - PNP . در این نوع نیمه‌هادی P لایه‌های زیرین و رویی و لایه وسطی نوع N را تشکیل داده‌اند. در این نوع ، Emitter به P ، Base به N متصل است . نوع N نیمه‌هادی‌ای است که با اتمی که دارای پنج الکترون در لایه آخر دارد (doping) شده است یعنی اتم را به صورت ناخالصی در آن نیمه‌هادی وارد کرده‌اند. این اتم میتواند ژرمانیم یا سیلیسیم باشد .

همانطور که گفتیم جریان زیادتر کم که مشخصه‌ی اسیلاتور بودند قادر به drive کردن (حرکت - واداشتن) سیستم نیستند مگر در صورتی که تقویت گردند. ابتدا از اسیلاتور schmit Trigger قرار دارد. این عضو عملی شبیه به دنده چرخ فلایویل در ماشین انجام میدهد. دنده فلایویل حرکت موتور را یکنواخت کرده و به چرخها منتقل میکند. پالسهایی که از اسیلاتور خارج میشود ممکن است مقداری دارای noise و اعوجاج باشند. این موضوع در شکل صفحه بعد نشان داده شده است. مثلا

مثال اگر از ژرمانیم و سیلیسیم و... را با اتمی که دارای سه الکترون در لایه‌ی آخر خود می‌باشد ترکیب کنیم - هادی نوع P (Positive) حاصل خواهد شد. دسته بندی دیگری وجود دارد که در مورد همه ترانزیستورها صادق است. تمامی ترانزیستورها به دو گونه‌ی Analogue و digital تقسیم بندی میشوند. ترانزیستورهای نوع Analogue به شیرهای کنترل (Control Valve) شبیه‌اند. شیرهای کنترل، شیرهایی هستند که با ایجاد تغییر در دریچه‌ی عبور آنها می‌توان مقدار دبی جریان را تغییر داد. در ترانزیستورهای Analogue هم میتوان با ایجاد تغییر در میزان جریان تحریک کننده Base میزان کل جریان عبوری از ترانزیستور را تغییر داد. (جریان Base در مقایسه با جریانی که از Collector میآید و از Emitor خارج میگردد بسیار کمتر بوده و نسبت بین آنها در بعضی از ترانزیستورها به $\frac{1}{500}$ یا $\frac{1}{1000}$ میرسد. بدین ترتیب با یک هزارم واحد جریان، جریانی معادل هزار برابر آن را میتوان کنترل نمود یعنی با یک جریان بسیار کوچک، جریانی بسیار بزرگتر را میتوان تنظیم و کنترل نمود. پس در ترانزیستورهای Analogue با تغییر جریان Base میتوان جریان عبور پس را کنترل نمود.



آنچنانکه ملاحظه میشود بعد از عبور از S.T پالسها به صورت شارپ (sharp) و یکنواخت در میآیند

پس یکی از کارهای S.T یکنواخت کردن پالسها میباشد (یعنی نویزهای پالس را میگیرد) و دیگر اگر

ترانزیستورهای دیجیتالی سرعت زیادی به شیرهای قطع کننده (check valves) دارند که یا کاملاً باز هستند و یا کاملاً بسته. شیرهای اطمینان هم که در روی تانک حادث نصب میشوند

همینطور هستند. پس ترانزیستورهای دیجیتال برای کنترل مدار جریان نیستند بلکه برای باز و

بسته کردن مسیر جریان هستند. ترانزیستورهای دیجیتال را switching Transistor

مینامند و در کامپیوترها کاربرد گسترده‌ای دارند. هم اکنون ترانزیستورهایی وجود دارند که

۱۰۰ میلیارد بار در ثانیه باز و بسته میشوند. در مدارهای ایزوفرکانس به دلیل اینکه تولید پالس داریم

از ترانزیستورهای دیجیتال استفاده میکنیم (این پالسها بصورت مربعی بوده و فقط حالات ON یا OFF

دارند). یک دسته بندی دیگر برای همه‌ی ترانزیستورها وجود دارد که بر پایه مقدار جریانی است که

اینها میتوانند از خود عبور دهند. این دسته بندی ها به دو صورت زیر هستند:

1) Power Transistor 2) signal Transistor

1) این ترانزیستورها جریان بالا (۱۰A ، ۲۰A و گاهی تا ۵۰A) از خود میگذارند.

2) این ترانزیستورها جریان پایین (10^{-3} mA ، 10^{-6} μA ، 10^{-9} nA) از خود عبور میدهند.

از طرف راست مدار به طرف S.T یک تا سامانی اتفاق افتاد نمیگذارد که براسیلاتور اثر نماید (اسیلاتور

بیار طرف میباشد که با جریان ورلتاژهای کم عمل میکند). بخشی از مدار که در طرف راست

S.T قرار دارد بخش قوی وقدرتمند مدار میباشد وممکن است در بسا اوقاتی که در آنجا اختلالاتی

پیش میآید این پدیده به سوی اسیلاتور حرکت نموده و آنرا بسوزاند. پدیده ای مشابه حرکت برق

در کامپیوتر ماینز مشاهده میگردد در کامپیوتر هارد تی میخواهند با بیرون، با یک چیزی آنها را

interface نمایند از Acto. coupller ها استفاده میکنند و از طریق جریان الکتریکی

مدار کامپیوتر را با بیرون مرتبط نمایند و در ناحیه مورد interface از سیستم های

نوری بنام Acto coupller استفاده میکنند. جریانی که کامپیوتر تولید میکند از یک

دیود میگذرد. این دیود ایجاد یک نور معمولاً قابل رؤیت نموده، (نور قرمز) که این نور وقتی به یک

ترانزیستور برخورد میکند باز میشود (یعنی Base متحرک ترانزیستور حال بر تو نور ایجاد -

شده میباشد) بنا براین اگر در قسمتهای دیگر مدار اتفاقی بیفتد همین که به حوزه عمل

نور برسد پایان می پذیرد و سوختگی به داخل کامپیوتر سرایت نمیکند. S.T هم

میتواند همچنین سیستمی داشته باشد (علت استفاده از سیستم های نوری در کاربردی

فرق اینست که سیستم های نوری در مقابل نویز پذیری بسیار مقاوم اند. ونیز به همین دلیل

است که برای اتصال سیستم های ارتباطی به هم، دیگر از جریان الکتریکی استفاده معمول نمیکنند

و فیبر های نوری نیاز معمول شده اند.

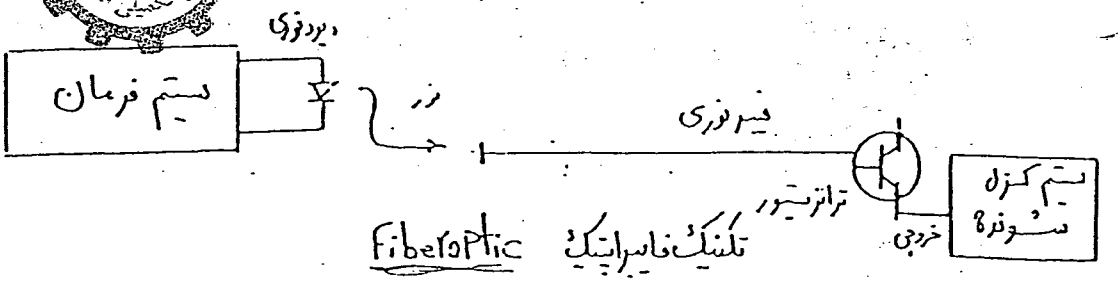
ترانزیستور های Power معمولاً دارای پاسخ فرکانسی پائینی هستند (مثلاً ترانزیستورهایی که تا درند

جریان تا حدود 20A را از خود عبور دهند بیش از 30 مگاهرتز پاسخ فرکانسی ندارند در حالیکه ترانزیستورهای Signal در

هر دو نوع Analogue (مدار تا دیجیتال) میتوانند تا 100 GHz پاسخ فرکانسی داشته باشند.

digital

شمای کلی از این کاربرد را میتوان بصورت زیر نشان داد



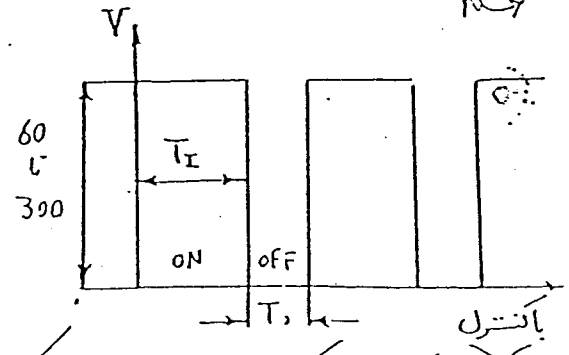
تکنیک فایبر اپتیک Fiberoptic

معمولاً دیودهای بکار رفته از نوع ریجتال سیا باشند. ملاحظه میشود که بجای اتصال سیستم ها بهم بکمک جریان برق از یک خط نوری بهره گرفته شده است. استهلاک نور در این فیبرها بسیار کم بوده و میتوان گفت که همان نور خروجی از دیود به ترانزیستور منتقل میشود و تنها با استفاده از یک خط فرمان میتوان با فرکانس های مختلف صادر کرد و چندین دستگاه را بطور همزمان کنترل کرد.

تمت : V.A "Voltage Amplifier" اضافه کننده ولتاژ

این عضو کارش اینست که ولتاژ اسیلاتور را (همانطور که گفته شد این ولتاژ در حدود 5+ تا 5- ولت و یا 15+ ولت میباشد) گرفته و به ولتاژ بین 60 تا 300 ولت تبدیل مینماید.

پالسهای ایجاد شده از نظر Timing همان Timing اسیلاتور را دارند یعنی T_I و T_0 پالس همان T_I و T_0 قبلی است. ولی سطحشان از نظر ولتاژ بالا رفته است.



بدینصورت :

T_I زمان روشنی on-time (T_{ON})

T_0 زمان خاموشی off-time (T_{OFF})

در تنظیم این ولتاژ (60 تا 300 ولت) ولتاژ مبنی که V.A را تغذیه میکند مختار بوده و میتوانیم آن را تعیین نمائیم. با تغییر این ولتاژ (V_{source}) که V.A را تغذیه

میکند میتوانیم مقدار ولتاژ انتخابی خودرا که در اینجا ولتاژ مداربازی نامیم - یعنی ولتاژی که در نهایت تحویل ابزار و قطعه کار میشود - (هنگامی که ابزار و قطعه کار از هم فاصله دارند این ولتاژ بین آنها ظاهر میشود) ملاحظه نمائیم ولتاژ مدارباز (۷۰pc) برروی Source (منبع تغذیه ولتاژ) تنظیم میشود یعنی ولتاژ Source کم و زیاد میشود. ولتاژی که توسط V.A از نظر ولتاژ تقویت شده، هنوز از نظر جریان، جریان قابل توجهی ندارد.

و حداکثر جریانی را که میتواند بدهد در حدود 0.5 آمپر میباشد (البته S.T از نظر جریان، اندکی هم جریان اسیلاتور را تقویت میکند یعنی اگر بفرض اسیلاتور جریانی حدود 5 میلی آمپر تولید میکند، S.T آنرا به ۵۰۰ میلی آمپر میرساند یعنی S.T در عین حالی که ولتاژ را صاف میکند و گوشه های پالس را تیز کرده و نویزها (noise) را میگیرد، مقداری هم جریان را تقویت میکند.

* قسمت : C.A "Current Amplifier"

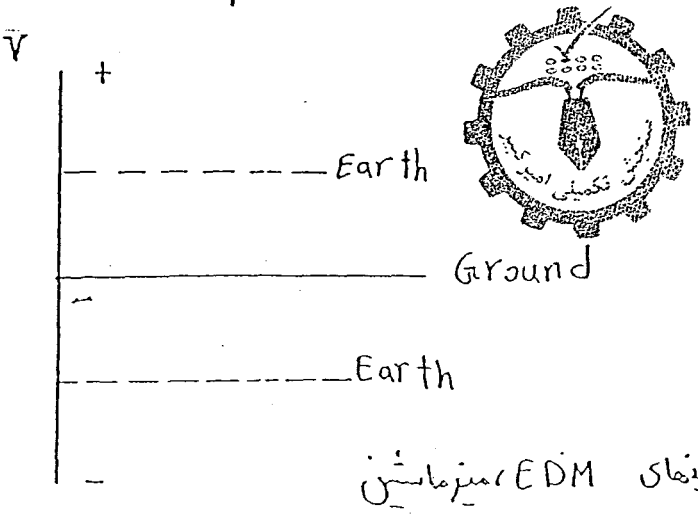
جریانی که در حدود سی آمپر و با ولتاژ 60 تا 300 ولت بود در اینجا جریانی در حد 20A تا 30A خواهد داشت یعنی درخروجی C.A، جریان همان سطح ولتاژ قبلی را دارد که، V.A تولید کرده بود اما از نظر جریان، جریانی نسبتاً قوی تری خواهد داشت.

بنابراین پالسهای مربعی دارای ولتاژ قابل تنظیم در حدود 60 تا 300 ولت و جریانی در حد 20 تا 30 آمپر خواهند بود این ولتاژ سپس به واحد بعدی یعنی S.P.T تحویل میگردد.

* قسمت S.P.T "Swiching Power Transistor"

همانطور که از شکل (۳-۲) پیداست، ولتاژ سه فاز ورودی ۴۱۵ V (در ایران 380V)

به Trans former داده میشود (کار Trans former، تغییر ولتاژ میباشد) خروجی ترانسفورمر به شش دیود داده میشود. کار این دیودها یکسو کردن جریان و تبدیل آن به جریان DC میباشد. در سمت چپ سیستم ورودی ولتاژ مثبت و در سمت راست ولتاژ Ground را داریم ولتاژهایی که داریم ولتاژ مثبت: یعنی Plate یا سیمی که ولتاژ مثبت دارد اگر الکترون به آن دهیم الکترون را جذب خواهد کرد یعنی دارای حفره‌های خالی برای جذب الکترون است. (قطب مثبت = Positive Pole +) Plate دیگر دارای بار منفی است یعنی دارای الکترون اضافی است. بدین ترتیب که اگر الکترون به آن نزدیک کردیم آن را دفع میکنند (قطب منفی Negative Pole =) ولتاژ دیگری که داریم نوع Ground میباشد و به ترتیب زیر Ground را مبداء ولتاژ میگیریم و ولتاژ دیگری داریم بنام Earth (زمین) که در نمودار داده شده (شکل ۳-۱) به صورت خط چین نشان داده شده است این ولتاژ در هر جای نمودار به موازات Ground میتواند باشد. بنابراین ولتاژ نوع Ground با ولتاژ نوع Earth یکی نیست. اما در کارخانجات روی ماشینها معمولاً سیم مربوط به Ground را به Earth متصل میکنند.



نمودار (۳-۱)

باید در نظر داشت که در ماشینهای EDM، میز ماشین را از بدنه ایزوله کرده اند و بدنه ماشین به Earth متصل است و میز ماشین به Ground.

گاهی از اوقات در بعضی از ماشینها Ground را به Earth متصل کرده اند ولیکن اکثر اوقات

اینها از هم جدا میباشند. جریان مثبت (+) به داخل Power Transistor ها

میرود. این ترانزیستورها با شماره های 1, 2, ... مشخص شده اند که بصورت موازی

(Parallel) به هم بسته شده اند. این ترانزیستورها می توانند به هر تعدادی باشند.

همه ی این ترانزیستورها به خط خروجی Current Amplifier متصل شده اند

یعنی همه ی Base ها به طور همزمان توسط پالسهای مربعی روشن و خاموش میشوند.

در زمان روشنی پالس (On) همه ی این ترانزیستورها باز و هنگام خاموشی پالس (Off)

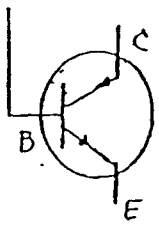
همگی بسته میشوند. اینکه Power transistor یکسان باشند مسئله بسیار مهمی است!

یعنی اگر بدین صورت باشد که یکی زودتر باز شود و دیگری دیرتر این پدیده مشکل آفرین میشود.

(باید دقت داشت که ترانزیستورهای مختلف پاسخ فرکانسی متفاوت دارند حتی اگر همه ترانزیستورها

نوع ترانزیستور و قدرت برده اما پاسخ فرکانسی مختلف داشته باشند

باز هم مشکل پیش خواهد آمد).



همه ی ترانزیستورها از طرف C، توسط کلیدهایی (سوئیچ هایی)

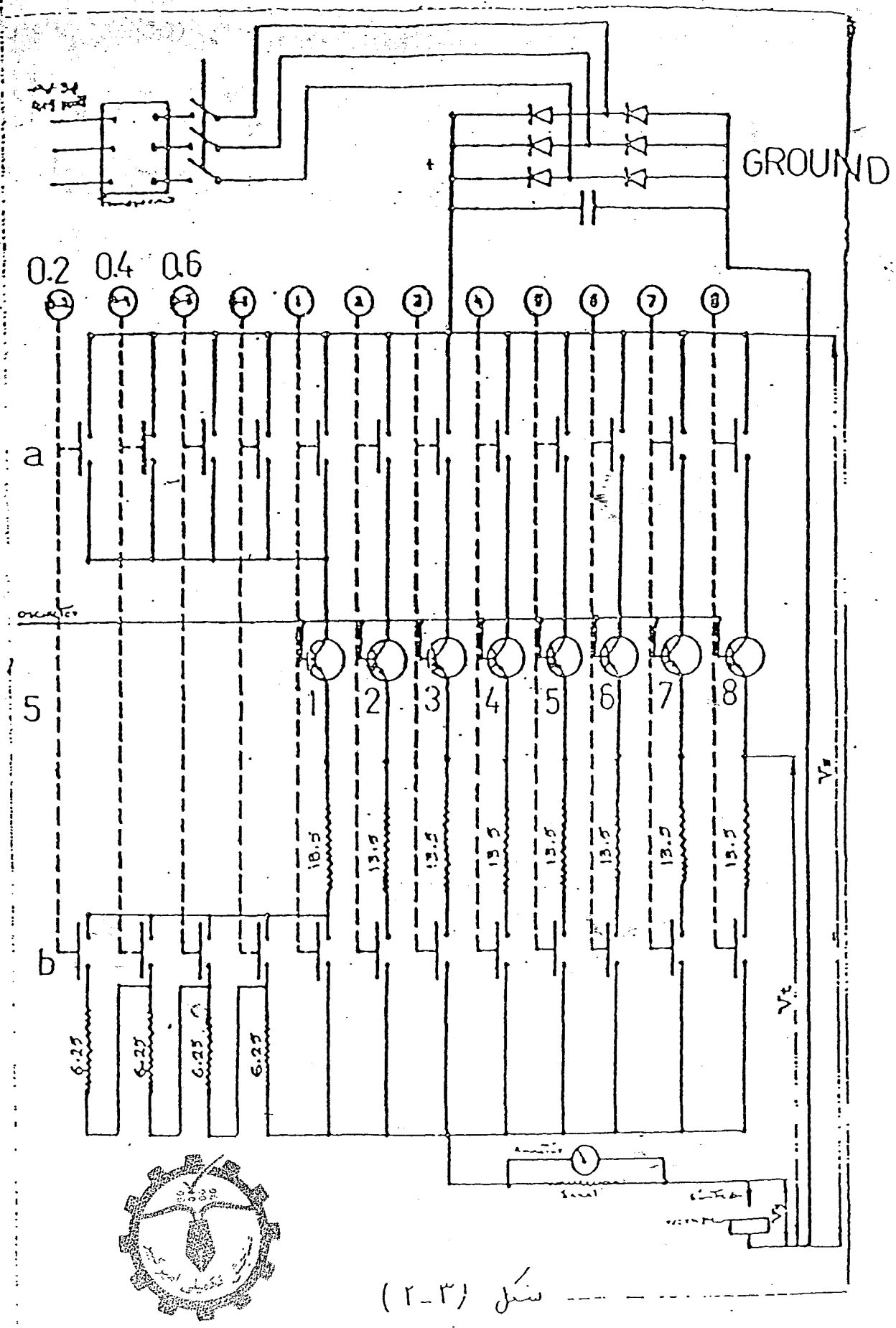
به Source (منبع) متصلند. از طرف Emitor، آنها به مقاومتهایی که مقاومت های

کنترل جریان نامیده میشوند، متصلند. بعد از مقاومت های کنترل جریان با زسوئیچ هایی

زده میشود. میبینیم که با بستن سوئیچ های $d_{0.2}$ ، $d_{0.4}$ ، $d_{0.6}$ ، $d_{0.8}$ ، d_1

[که بصورت موازی (Parallel) قرار گرفته اند] جریان از منبع به ترانزیستور (1) وارد میشود.

حالتی را در نظر میگیریم که تنها سوئیچ $d_{0.2}$ و $b_{0.2}$ نیز بسته خواهد شد، جریان منبع


GROUND
0.2
0.4
0.6
a
b
5
1
2
3
4
5
6
7
8
6.25
6.25
6.25
6.25
13.5
13.5
13.5
13.5
13.5
13.5
13.5
13.5

شکل (۲-۳)

از کلید $a_{0.2}$ گذشته و به ترانزیستور اول وارد میشود و پس از خروج از ترانزیستور به مقاومت 18.5Ω وارد میشود. سپس جریان به سوئیچ دسته‌ی $b_{0.2}$ وارد شده و پی در پی از چهار مقاومت 6.25 اهم میگذرد. پس از گذر از اینها، از شنت (shant که مقاومت ناچیزی دارد) گذشته و در نهایت به ابزار وارد میشود. قطعه کار به Ground وصل است. اختلاف ولتاژ بین قطعه و ابزار ایجاد جرقه می نماید. جرقه ای که بوجود میآید در اثر عبور جریان از مقاومت معادل 43.2Ω [18.5 + 4×6.25 = 43.5] میباشد. اگر ولتاژ مبنی که با Trans Former پیوند شده است 60 ولت باشد جریان بدست آمده طبق قانون اهم برابر خواهد بود با $I = \frac{60}{43.5} = 1.38\ A$

اگر بجای اسکلم سوئیچ $a_{0.2}$ را سیندیم، سوئیچ $a_{0.4}$ را وصل کنیم (متقابلا سوئیچ $b_{0.4}$ بسته خواهد شد) تمامی جریان از ترانزیستور ① خواهد گذشت اما در اینحالت یکی از مقاومت های 6.25 اهم از مدار خارج میگردد و جریان بدست آمده بصورت داده شده است:

$$I_1 = \frac{60}{43.5 - 6.25} = \frac{60}{37.25} = 1.61\ A$$

اگر بهمین ترتیب کلیدهای $a_{0.6}$ و $a_{0.8}$ را سوئیچ کنیم جریان بدست آمده بصورت روبرو خواهد بود: اتصال کلید

$$I_1 = \frac{60}{37.25 - 6.25} = \frac{60}{31} = 1.94\ A$$

با بسته شدن سوئیچ $a_{0.8}$

$$I_1 = \frac{60}{31 - 6.25} = \frac{60}{24.75} = 2.42\ A$$

حال اگر سوئیچ ① a را سیندیم تمامی مقاومت های 6.25Ω از مدار خارج گشته و تنها مقاومت باقیمانده در سر راه جریان، مقاومت 18.5 اهم خواهد بود از اینرو جریان بدست آمده به صورت روبرو است:

$$I_{11} = \frac{60}{18.5} = 3.24\ A$$

در تمامی حالت های فوق دیده میشود که فقط ترانزیستور اول فعال بوده و بقیه از مدار خارج اند اگر

سوئیچ 2.a را به همراه 2.b ببندیم ملاحظه میشود که تنها مقاومت در راه جریان عبوری از ترانزیستور دوم، مقاومت 13.5 Ω است و بنابراین جریان برابر است با: $I_2 = \frac{60}{13.5} = 4.44A$

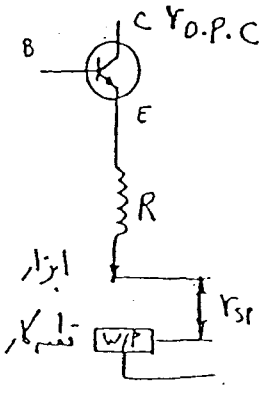
باتوجه به اینکه ترانزیستور اول در مدار است، اگر ترانزیستور دوم را به مدار ملحق نمایم (از طریق سوئیچ کلید 2.a) جریان خروجی به اندازه‌ی $I_1 + I_2$ خواهیم داشت؛ یعنی:

$I = 3.24 + 4.44 = 7.68A$

بدین ترتیب اگر سایر ترانزیستورها را به مدار بیفزاییم، با افزودن هر یک جریان به اندازه‌ی 4.44 A افزایش خواهد یافت. پس میتوان با تقسیر تعداد ترانزیستورهای قدرت موجود در مدار (که بصورت Parallel نسبت بهم قرار گرفته اند) شدت جریان جزئه (I_{sp}) را تقسیر داد.

نتیجه: (تا اینجا چنین نتیجه گرفته ایم که با ایجاد توقف در جریان زمان روشنی و خاموشی یا لامپ را تقسیر دار؛ با ولتاژ مدار باز منبع میتوان ولتاژ (open circuit) مدار باز را تقسیر داد و با تقسیر تعداد ترانزیستورهای قدرت موجود در مدار میتوان، شدت جریان جزئه را تقسیر داد)

منظور کردن شدت جریانهای محاسبه شده در مطالب پیشتر، شدت جریان های اتصال کوتاه (short circuit) بودند اما در بالا سخن از شدت جریان جزئه بمیان آمد. (اتصال کوتاه بدین معنی است که بین قطعه را ابزار هیچگونه فاصله‌ای موجود نباشد و آنها با هم بچسبند) پس I_{sp} یعنی چه؟ برای پاسخ به این پرسش یکی از ترانزیستورها را به صورت زیر رسم میکنیم زمانی که بین ابزار و قطعه کار جزئه رخ میدهد این جزئه دارای ولتاژی است که برابر V_{sp} میباشد. طبق قانون اهم مجموع ولتاژها در یک مدار بسته همواره صفر است. (یا مجموع ولتاژهای مصرف کننده های مدار برابر با ولتاژ منبع میباشد)



پس: $V_{o.p.c} = V_R + V_{sp}$, $V_R = RI$ $\xrightarrow{I=I_{sp}}$ $V_{o.p.c} = RI_{sp} + V_{sp}$

جریان I که از مقاومت R میگذرد همان I_{sp} است پس $I_{sp} = \frac{V_{o.p.c} - V_{sp}}{R}$

میدانیم $V_{o.p.c}$ ثابت است (مثلاً اگر آن را 120 V گرفته ایم در طول تراشیدن ولتاژ ثابت خواهد بود) ولتاژ جرقه (V_{sp}) تابع عوامل بسیاری است. مهمترین عوامل عبارتند از:

۱) جنس قطعه کار ۲) جنس ابزار ۳) جنس دی الکتریک ۴) نامساعدی ابزار و قطعه کار ۵) میزان آلودگی های دی الکتریک (وقتی از آلودگی های دی الکتریک سخن به میان میآید منظور آلودگی های جامد، مایع و گازی میباشد) ۶) درجه حرارت و فشار دی الکتریک.

ولتاژ جرقه عمدتاً تابع سه عامل اول است و تقسیم در رده دوم قرار دارند[1] به شکل (۳-۳) توجه میکنیم (زمانی که بین ابزار و قطعه کار فاصله زیاد است پالس های تولیدی، جرقه تولید نخواهند نمود (قسمت الف) ولتاژ مرجود، بیشتر بالاست که همان ولتاژ open circuit میباشد در اینحالت شدت جریان تقریباً صفر است. زمانی که بین ابزار و قطعه کار اتصال کوتاه برقرار آید (یعنی قطعه و ابزار بهم چسبانده شوند) ـ شکل ب در هر دو نمودار T-V و T-I پالس ایجاد خواهد شد و جریان بیشینه ممکن نیز بدست میآید اما ولتاژ Gap بین ابزار و قطعه کار وجود ندارد. وقتی پالس که منجر به جرقه میشود به وجود میآید (حالت ج در

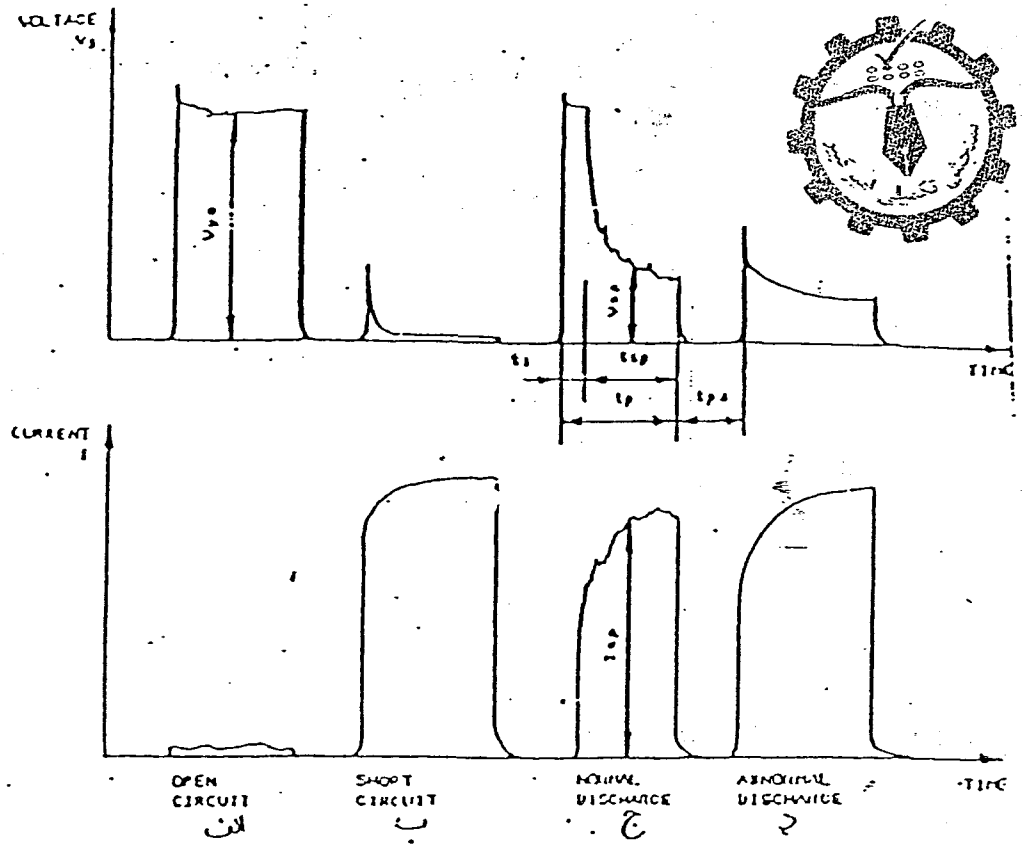
---

(1) برای ابزار مسی، قطعه کار فولادی روی الکتریک نفت ولتاژ جرقه بین 18 تا 30 ولت است.

برای ابزار مسی و قطعه کار تنگستن کاربید در داخل نفت ولتاژ جرقه 42 ولت است. برای ابزار مسی و قطعه کار سیلیکون کاربید در داخل نفت ولتاژ جرقه در حدود 57 ولت است. پس دیده میشود که ولتاژ جرقه عمدتاً تابع سه عامل اول میباشد

حردو نمودار T-٤ و T-٧) جریان بین ابزار و قطعه کار ایجاد میگردد . در لحظهٔ برقرار شدن ولتاژ

(طبق تعریف بیان شده در EDM ابزار در فاصله ی تردیک و کنترل شده ازهم قرار گرفته اند)



(شکل ۳-۳)

درهمان لحظه جرقه ایجاد نمی گردد بلکه زمانی طول میکشد تا محیط بین ابزار و قطعه کار (در نزدیکترین نقطه یا نقاط) یونیزه میشود تا جرقه ایجاد گردد (زمان بین برقراری ولتاژ تا برقراری جریان زمان تأخیر جرقه نامیده میشود (در این فاصله اندازه‌ی ولتاژ همان ولتاژ O.P.C میباشد) بعد از مساعد شدن محیط (یعنی یونیزه شدن دی الکتریک) برای جرقه ولتاژ از ولتاژ O.P.C به ولتاژ جرقه می ایستد . ملاحظه میشود که افتادن به ولتاژ جرقه بصورت تدریجی صورت گرفته (این ولتاژ Level بخصوصی ندارد و تدریجاً کاهش پیدا می‌کند)(۱)

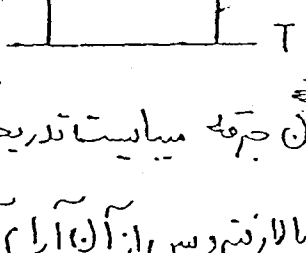
---

(۱) پیش از این گفته شد که برای ابزارهای فولادی بادی الکتریک نفت ولتاژ جرقه بین 18 تا 30 ولت است این بدان دقیقاً در شکل (۳-۲) قابل ملاحظه است دیده میشود که ولتاژ تدریجاً از 30 به 18 می ایستد

در مورد تنگستن کار باید افت ولتاژ به سرعت و بدون تدریج صورت میگیرد (شکل ۳-۴) و همچنین برای سیلیکون کار باید در نمودار I-T آنچنانکه دیده میشود.

در زمان برقراری جرقه جریان در ترانزیستور بدینصورت است که:

طبق رابطه $I_{sp} = \frac{V_{OPC} - V_{SP}}{R}$ چون V_{OPC} مقدار ثابتی است و ولتاژ جرقه تدریجاً



شکل (۳-۴)

کاهش میابد پس شدت جریان جرقه میبایست تدریجاً افزایش یابد. دیده میشود که جریان در ابتدا سریعاً تا یک مقدار بالا رفته و پس از آن آرام آرام افزایش می‌یابد. در زمان تأخیر جرقه هیچ جریانی موجود نیست و نیز در زمان خاموشی پالس جریانی نداریم یعنی در واقع این دو زمان (زمان تأخیر جرقه و خاموشی پالس) زمان تلف شده‌اند. در حالت O.P.C هیچ برداشت براده‌ای صورت نمیگیرد. یعنی در این مرحله حین پروسه هرچه اتفاق افتد زمان مرده است. در حالت Short Circuit نیز هرچه اتفاق افتد زمان مرده است. بدلیل اینکه هیچ جرقه‌ای ایجاد نمیگردد. تنها جایی که زمان زنده برده را آن استفاده بعمل میاید، زمان روشنی جرقه میباشد، نه زمان روشنی پالس (زمان روشنی جرقه مساوی است با زمان روشنی پالس منهای زمان تأخیر جرقه). پس میتوان گفت که:

T_{sp} = زمان مؤثر $\quad T_{sp} = T_I - T_d$ زمان مؤثر (روشنی جرقه)

T_d = زمان تأخیر جرقه

زمان روشنی پالس

لذا، زمانهای O.P.C و S.C؛ زمان تأخیر جرقه و زمان خاموشی پالس زمانهای تلف شده برده و باعث طولانی شدن زمان ماشینکاری میگردند. بنابراین در انتخاب پارامترها

باید نهایت دقت مبذول گشته تا از O.P.C و S.C پرهیز شده و نیز تا آنجائیکه ممکن است زمان خاموشی (T_d) بین دو پالس و زمان تأخیر جرقه (T_d) را به حداقل ممکن برسانیم یعنی اگر توانستیم این سه رابطه را به وجود آوریم، توانسته‌ایم تولید را با حداکثر سرعت انجام دهیم (همانطور یکه در بحث‌های پیش گفته شد از پارامترهای تولید سرعت میباشد که سرعت تولید نیز مستقیماً روی قیمت تولید مؤثر است). ممکن است سؤال شود که آیا ممکن است T_d را صفر گرفت تا مقداری از زمان تلف شده، زنده گردد؟ پاسخ منفی است چرا که

میدانیم جرقه بین ابزار و قطعه کار در نزدیکترین نقطه یا نقاط اتفاقی ای است و از وجود یونهای دی الکتریک است که کانال جرقه را محدود کرده و مانع از گسترش آن میگردد تا متمرکز انرژی در حدی باشد که بتواند قطعه کار را ذوب و متخلخل نماید. اگر کاری کنیم که این تمرکز انرژی از دست برود آیا باید انتظار داشته باشیم که باربرداری صورت گیرد؟ مسلماً خیر. اگر بیائیم زمان T_d را از بین ببریم و بین ابزار و قطعه کار یک جریان DC برقرار نمائیم در همان لحظه‌ی ایجاد، جرقه تداوم پیدا کرده و بعد بتدریج کانال پلاسما گسترش یافته، قطعه ذوب شده و تمرکز انرژی از بین میرود و عمل باربرداری متوقف میشود. یعنی در لحظه‌ی برقراری این جریان DC جرقه‌های اولیه یک باربرداری مختصر انجام داده و پس از آن باربرداری صورت نمی‌گیرد حتی اگر مدتهای طولانی این جریان برقرار گردد. لذا ناگزیریم که عمل برقراری جریان جرقه و دنباله انقطاع داشته باشیم. زیرا هرگاه که جرقه به وجود میآید این جرقه تا یک زمان ویژه، معینی است و بعد از آن میایستد قطع گردد چون دیگر باربرداری صورت نمیگیرد. پس باید مدت زمانی صبر نمود تا محیط بین ابزار و قطعه کار از حالت یونیزه خارج شده تا جرقه‌های بعدی حتی در

ه ی قبلی صورت نگیرند و در جای دیگر رخ دهند . اگر مدت زمان مورد نظر را بررسی کنیم و جریان را
ار کنیم جرقه در همان جای قبلی پدید آمده و کانال یا اسما با فاصله پیش می‌شود و هیچگونه بار برداری
ورت نمیگیرد چون دی الکتریک هنوز به صورت یونیزه میباشد . با توجه به توضیحات بالا
تیجه میگیریم که قطعاً لازم است که T_{off} وجود داشته باشد اما باید سعی نمود که به حداقل مقدار
یکن برسد . یعنی نه زیاد باشد که زمان بیهوده تلف شود و نه آنقدر کم باشد که جرقه بار برداری
نماید (در جای قبلی اتفاق افتد) ! مثلاً اگر $10\mu sec$ کافی است تا آثار جرقه از بین برود و
جرقه منتفی گردد تا پالس بعدی در جای پالس قبلی اتفاق نیفتد چرا بیاییم و T_{off} را $100\mu sec$ بگیریم؟
البته ممکن است چنین بنظر آید که این اختلاف زمانی ($100-10 = 90\mu sec$) زمان قابل
ملاحظه ای نباشد ولی برای ایجاد یک خلوء در داخل قطعه ممکن است به صدها میلیارد جرقه نیاز باشد
و اینرو زمان تلف شده کل برابر تعداد جرقه ها ضربدر زمان تلف شده برای هر پالس خواهد شد که
ممکن است چندین ساعت و یا حتی چندین روز بشود . لذا باید حتی برای یک میکرو ثانیه هم دقت
بخرج داد . اگر T_{off} به اندازه کافی انتخاب نشده باشد و جرقه ی بعدی در محل جرقه قبلی رخ دهد
حالت < در شکل (3 - 3) پیش خواهد آمد . البته جرقه به وجود خواهد آمد اما
arc (آرک) میباشد . در این حالت زمان تأخیر جرقه نداریم ؛ چون دی الکتریک بصورت
نیمه هادی میباشد . دیده میشود که جهت اینکه این حالت پیش نیاید میباستی زمان T_{off} حداقل ممکن
باشد ، و تنها وقتی که T_{off} به این صورت (حداقل T_{off} ممکن) انتخاب شد خود بخود بررسی
زمان تأخیر جرقه (T_d) اثر میگذارد . (زمان T_d خوب است اما مقدار کم آن ـ البته
مقدار صفر آن ـ خوب نیست) . وقتی T_{off} به اندازه کافی بزرگ باشد زمان تأخیر جرقه را

باندازه‌ی مطلوب هم خواهیم داشت. اگر T. کم باشد زمان تأخیر جرقه نداریم. اگر T. خیلی بزرگ باشد زمان t_d هم بسیار بزرگ خواهد شد. پس زمان تأخیر تابع زمان خاموشی بین دو پالس است) نه فقط پدیده‌ی یونیزاسیون متأثر از T. میباشد بلکه وقتی T. زیاد باشد محیطی که در آن جرقه اتفاق افتاده بود حرارت خود را به محیط منتقل میکند یعنی دیونیزاسیون اتفاق می‌افتد، حرارت قطع میشود و نیز، آلودگی هایی که در اثر جرقه پیش آمده اند در تمام محیط پخش میشوند. در پخش این آلودگی ها برای جرقه‌ی بعدی فایده‌ای نیز بالا بردن زمان تأخیر جرقه را نیز ندارد.

(بنابراین نتیجه می‌گیریم هرگاه T. زیاد گرفته شود، نه فقط باعث پدیدار شدن پدیده‌های محون دیونیزاسیون، سرد شدن محیط و پخش آلودگی میشود بلکه خود T. باعث اتلاف وقت گشته و متعاقب آن باعث بالا رفتن زمان تأخیر جرقه‌های بعدی هم میگردد)

پس T. در کنترل پروسه نقش عمده‌ای را عهده دار است (البته باید یادآور شد که زمان t_d نه فقط از T. متأثر است بلکه عمدتاً متأثر از جنس ابزار و قطعه کار، جنس دی الکتریک، ناصافی‌ی بین ابزار و قطعه کار و میزان آلودگی‌های دی الکتریک میباشد (البته میتوان گفت که T. تا مقداری بر آلودگی تأثیر دارد ابادی الکتریک بصورت یک پارامتر جداگانه بررسی شده است)

بعضی از دی الکتریک ها زودتر دیونیزه میشوند مثل آب دی یونیزه که نسبت به نفت زودتر دیونیزه میشود. بنابراین زمان تأخیر جرقه با آب دی یونیزه کوتاه‌تر از زمان جرقه با نفت میباشد. و همینطور نفت نسبت به روغن تراشن زودتر دیونیزه می‌گردد در نتیجه زمان تأخیر جرقه با نفت کمتر از زمان تأخیر جرقه با دی الکتریک روغن تراشن میباشد در نتیجه جنس دی الکتریک

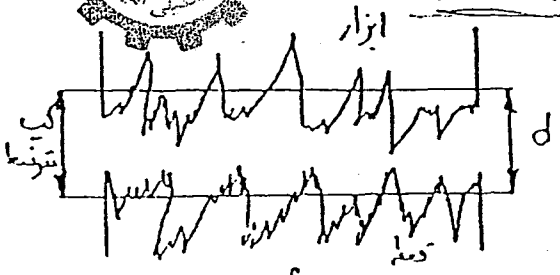
هرچه جنس ابزار رسانا باشد زمان تأخیر جرقه کمتر است
هرچه دی الکتریک رقیق‌تر باشد زمان تأخیر جرقه کمتر است

را بروی T_d به روشنی مشاهده میکنیم. همچنین اگر هم شرایط یکسان باشد زمان تأخیر جرقه برای ابزار مسی کوتاهتر از زمان تأخیر جرقه برای ابزار فولادی است.

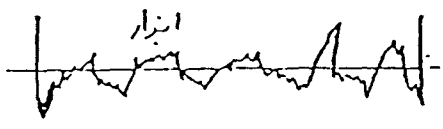
۷ اندازهٔ گپ (فاصله قطعه و ابزار) میکروسکوپی متأثر از دو عامل است:

الف) گپ متوسط (در مقیاس میکروسکوپی)

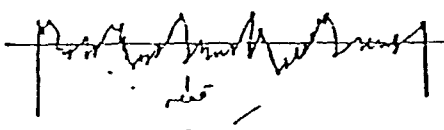
ب) زبری سطح قطعه کار و ابزار.



گپ متوسط ممکن است مقدار مشخصی باشد ولی



بدتی قطعه کار و ابزار زبر تر میشوند گپ کوچکی بین



یکهای مخالف بوجود میآید به هم نزدیکتر شده وقتی

بری ابزار و قطعهٔ کار کمتر است دو یک مخالف

زهم دور میشوند. دیده میشود که در یک گپ متوسط مشخص بین ابزار و قطعهٔ کار، آن ابزار و قطعه کاری که خشن تر است زمان تأخیر جرقه ای کوتاهتر دارد. پس با توجه به گفتار فوق میتوان گفت که زمان تأخیر جرقه متأثر از گپ متوسط و زبری سطح ابزار و قطعهٔ کار میباشد. با نزدیکتر نمودن گپ متوسط بین ابزار و قطعه کار با کم کردن زمان تأخیر جرقه کم میشود. همچنین با نرمتر سطوح زبرتر انتخاب شود این زمان (T_d) کمتر خواهد شد. پس پارامتر دیگری را که میتوان روی آن حساب نمود (بغیر از T_o) اندازه‌ی گپ ماشینکاری میباشد. از اینرو دو پارامتر T_o و گپ ما را در کنترل پروسه و سپردادن آن به طرف "اسپارک" در حین ماشینکاری یاری مینماید.

شستشو " flushing " همانطور که گفته شد آلودگی دی الکتریک بر زمان تأخیر می‌توان به این وسیله T_o را کمتر در نظر گرفت

...سترهای جنبی فرآیند بهره برد | بقیه پارامترها قبل از فرآیند تنظیم میشوند.

پارامترها عبارتند از: زمان روشنی پالس (T_I)، ولتاژ مدار باز ($V_{op.c}$) و

...دت جریان جرقه (I_{sp}). در جداول (۳-۵ و ۳-۶) پارامترهای EDM

...بندی شده اند. پارامترهای موجود کلاً به دو دسته تقسیم میشوند.

...امترهای ورودی (IN PUT PARAMETERS) و پارامترهای خروجی (OUT PUT PARAMETERS)

...دول (۳-۵) شامل پارامترهای ورودی است که خود به دو دسته تقسیم بندی میشود:

پارامترهای خارج از پروسه - قبل یا بعد از پروسه (off-line control Parameters)

پارامترهای حین پروسه (on-line control Parameters)

...دول (۳-۶) شامل پارامترهای خروجی است که خود به دو دسته تقسیم میشود:

پارامترهای حین فرآیند ① { (sensing Parameters) یا (on-line out Put Parameters)

پارامترهای خروجی نتیجه بعد از فرآیند ② { Process Yesult (off-line out Put Parameters)

...پارامتر خاصی هستند که به عنوان فرآیند هستند اما آنها را در حین پروسه میتوان تنظیم

...و بعد از پایان فرآیند آثاری از آنها باقی نخواهد ماند.

...ولاً پارامترهای نوع اول (پارامترهای خروجی حین فرآیند) را گیریم تا از چگونگی

...رکات فرآیند آگاه شویم تا بتوانیم فرآیند را کنترل کنیم. گردش اطلاعات بدو دلیل

...ت. الف- داشتن و داشتن اطلاعات بدون انجام هیچ عملی روی سیستم

...- برای کنترل سیستم - پارامترهای Sensing-Par... بدین منظورند که آنها را در فرآیند

INPUT PARAMETERS		
	off-line control parameters پارامترهای قبل از ایجاد برنامه	on-line control parameters پارامترهای حین ماشینکاری
GENERATOR	-discharge current -pulse duration -open-circuit voltage -polarity (+/-)	-pulse interval time زمان غیرفعال بین دو پالس
SERVO		-reference voltage ولتاژ مرجع -feed-back gain
TOOLING	-material -fabrication	
DIELECTRIC AND FLUSHING	-type -flushing method	-flow rate -pressure for vacuual -filtering -pulsation -up time -down time -vibration -frequency -amplitude -tool and workpiece relative movement (e.g. rotation)
OTHER	-time delay for machine shut-off	-sensitivity for security actions

شکل (۳-۵)

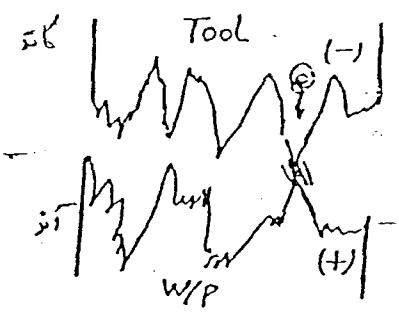
اعمال کنیم تا درجهت دلخواه پیش روند و بعد از انجام عملیات نتیجه ای باقی خواهد ماند

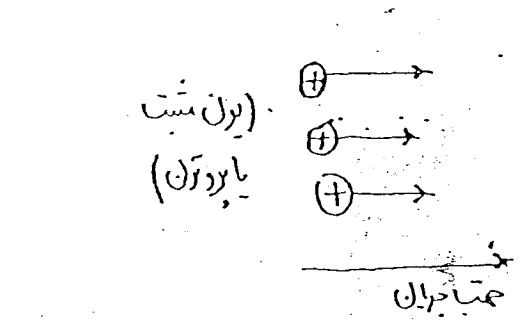
این نتیجه یقیناً متأثر از اعمالی است که قبل از شروع فرآیند انجام میدهیم (همینطور

از اعمالی که درحین فرآیند انجام میدهیم) مثلاً

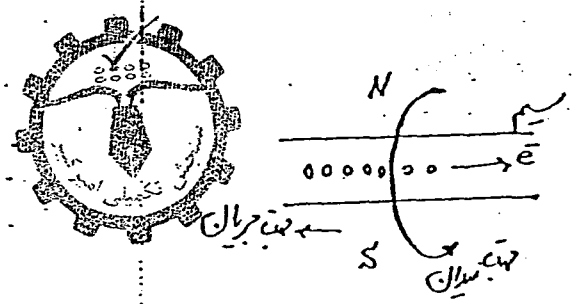
dis charge current	I_{sp}	شدت جریان تخلیه	IN PUT PARAMETERS پارامترهای ورودی
Pulse duration	T_I	مدت زمان روشنی پالس	
open circuit Voltage	$V_{op.c}$	ولتاژ مدار باز	
Polarity (+/-)		پلاریته	

قبلاً در مورد سه پارامتر اول سخن بمیان آمد و اکنون پارامتر چهارم تا حدی شرح داده میشود. پلاریتهی ← پلاریتهی ابزار و قطعه کار میتواند مثبت و یا منفی باشد. در بحثهای قبل که مورد فرسایش ابزار با مدار RC سخن بمیان آمد یادآوری شد که در ابتدای جرقه الکترونها از قطب منفی به طرف قطب مثبت در تونل پلاسمایی قطع برش پرواز کرده و در اثر این پرواز ایجاد میدان مغناطیسی می نمایند. میدانیم هر بار الکتریکی متحرک چه مثبت و چه منفی در اطراف خود ایجاد یک میدان مغناطیسی می نماید. طبق قراردادی که در الکتریسیته است جهت جریان مثبت جهت حرکت بارهای مثبت در نظر گرفته میشود پس جهت حرکت الکترونها خلاف جهت قراردادی است پس جهت این جریان الکترونی منفی است.





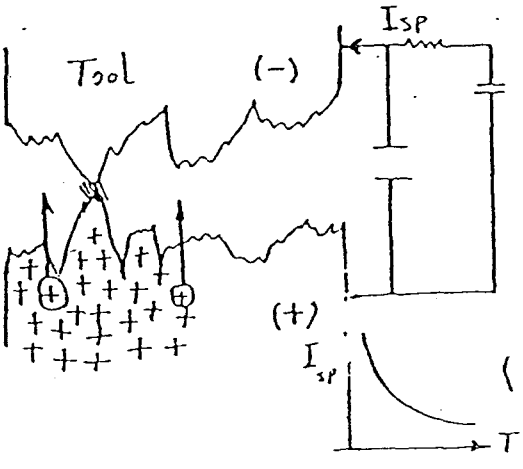
طبق قانون اورستد میدانیم اگر در داخل سیمی باری حرکت کند و انگشت دست را در سوی جریان قرار دهیم تعیین. انگشتان جهت میدان مغناطیسی را نشان میدهند. این مسأله در شکل روبرو نشان داده شده است که بدین ترتیب قطب



S و N میدان بصورت نشان داده شده ایجاد میگردد. حال اگر یک عقربه مغناطیسی را در این حوزه قرار دهیم می بینیم که S و N عقربه مقداری منحرف میشود. و قتیکه جریان (یا داخل سیم و یا داخل خلاء و یا داخل جیوا) برقرار میشود میدان نسبی میدان نشان داده شده در شکل بوجود می آید اگر این جریان مقداری ثابت و مشخص باشد میدان نیز ثابت باقی خواهد ماند و این میدان ثابت روی سیم ایجاد تغییر جریان نخواهد نمود. اما اگر جریان عبوری جریانی متغیر باشد اینجا یک حوزه مغناطیسی متغیر میکند که این حوزه ی مغناطیسی متغیر، ایجاد جریان خود القائی میکند (self-induction current): این عوامل تغییرات در دو مورد زیر خلاصه میشوند.

تغییر ولتاژ القایی $e = -L\frac{dI}{dt}$ یا $e = -K\frac{d\phi}{dt}$

(در واقع $\frac{dI}{dt}$ از $\frac{d\phi}{dt}$ بدست آمده است). $\frac{d\phi}{dt}$ به معنای تغییر نیروی مغناطیسی است که ممکن است در اثر این باشد که: بوسیله ی یک عنصر خارجی میدان تغییر یافته باشد و یا جریان عبوری تغییر یافته باشد و لذا می بینیم که حرکت پارچا - چه در داخل یک سیلم و چه در یک فضا، ایجاد میدان نموده و اگر این جریان متغیر باشد ایجاد جریان خود القائی می کند. جریان خود القائی طبق قانون لنز با جریان بوجود آورنده اش مخالفت می کند



انتهای موجود در روی قطعه همه دارای بار مثبت گشته اند. (قطعه کار قطب مثبت وصل است) و تحت جریان الکتریکی در دقیقترین نقطه پدیدی آید و الکترونها از ابزار به قطعه پرش می کنند

در مدار RC (همانطور که نشان داده شده در مقاله قبل)، وقتی خازن شروع به تخلیه شدن می کند این عمل ادامه می یابد تا بار روی آن به صفر میرسد یعنی جریانی که در ابتدا زیاد بود شروع به کاهش می نماید.

(در همان لحظه اول (وقتی تخلیه روی میدهد) جریان خیلی بالاست همینکه خازن به طرف ولتاژ صفر میرود شدت جریان نیز افت میکند. در همین راستا میدان نیز کاهش می یابد پس باید اتفاقی بیفتد تا با پدیده ی کم شدن جریان و تضعیف میدان مخالفت نماید. این پدیده جدا شدن بارهای مثبت از قطعه و حرکت به سوی ابزار است. به همین دلیل است که از سطوح قطعه کار اتم جدا میشود)

« تکرار مطالب به بیان ساده تر »

(الکترونی که از ابزار به سوی قطعه حرکت میکند در ابتدای جرقه (که خازن جریان بالایی بوجود آورد، و سپس شروع به تخلیه شدن می نماید) که جریان بالاست و پس از آن کاهش میآید به پیروی از جریان مقدار کانال پلاسمایی که در ابتدا موجود بود کاهش میآید، وقتی مقدار جریان کانال پلاسما کاهش یافت مسلماً میدان اطرافش نیز کاهش می یابد. از اینرو طبق قانون لنز باید پدیده ای رُخ دهد تا جلوی کاهش میدان را بگیرد. این پدیده چیزی جز جدا شدن بارهای مثبت از روی قطعه نیست. همچنین در اثر پدیده الکترومغناطیسی ذرات (اتم های با بار مثبت) از روی قطعه کنده میشوند و میتوان گفت که این پدیده نیز یکی از عوامل کندن ذرات میباشد. پیشتر گفته شد که مقداری حرارت نیز بوجود میآید (درجه حرارت با نرخ $10^{10}\,^{\circ}C$ افزایش میآید) حرارت ایجاد شده باعث نرم شدن یا نرم شدن سطح قطعه کار و در نتیجه ذوب شدن سطح میگردد و در نتیجه قطعه برای مهاجرت بارهای مثبت بیشتر آماده میشود و راحت تر بارهای مثبت جدا میشوند (لذا عامل اصلی جدا شدن یونهای مثبت نیروی الکترومغناطیس بوده و حرارت تنها به عنوان عامل کمکی است) (حرارت عنصر تانتالیم)

این رخدادها در ابتدای جرقه اتفاق می‌افتند. دقت شود که مسأله اصلی مسأله‌ی جرقه‌ی کوتاه مدت است (جرقه‌ای که در حد 0.3μsec اتفاق می‌افتد) جریان درهمان لحظه‌ی اول خیلی شدید می‌افتد به همین دلیل درهمان لحظه، $\frac{d\Phi}{dt}$ زیاد است. یعنی بجز از اینکه جریان مقداری از نظر افت خطی (کند) شود پدیده‌ی جدا شدن پرتوها هم کند خواهد شد و شاید به صفر برسد لذا باید توجه داشت از الکترودی که به قوس مثبت وصل است درهمان ابتدای جرقه ماده کنده میشود در ادامه‌ی جریان به دلیل افت جریان کنده شدن بارهای مثبت از قطب مثبت کند میشود و شاید به صفر برسد. اگر پالس موجود زمانی کوتاه داشته باشد (مثلا 0.3 میکروثانیه) بهتر است که قطب کار و ابزار را کدام قطب گرفت؟ طبیعی است که قطب کار قطب مثبت و ابزار قطب منفی گرفته میشود. بدلیل اینکه پدیده کنده شدن و مکنده شدن بارهای مثبت درهمان لحظات اول اتفاق می‌افتد (اما اگر زمان جرقه افزایش یابد (مثلاً 100Hs) درهمان لحظه‌ی اول (کمتر از 0.3 میکروثانیه) عملیات کنده شدن بارهای مثبت از قطب انجام گرفته و کنده شده پس از آن زمان روند کاهش می‌یابد و سپس عملیات کنده شدن از قطب منفی آغاز میگردد.

زیرا کانال پلاسمای بوجود آمده نقطه ابتدای جرقه تمرکز دارد همین که جرقه تداوم یافت کانال پلاسما هم بزرگ میشود، بارهای مثبت موجود در داخل کانال فرصتی برای تمرکز بیشتر میابند. زیرا در حالت ترکیب بودن کانال پلاسما بارهای داخل کانال، بصورت dense رفتار میکردند، اما همینکه این فضا گسترش یافت بارهای مثبت بدون برخورد زیادی توانستند آزادانه حرکت کنند.

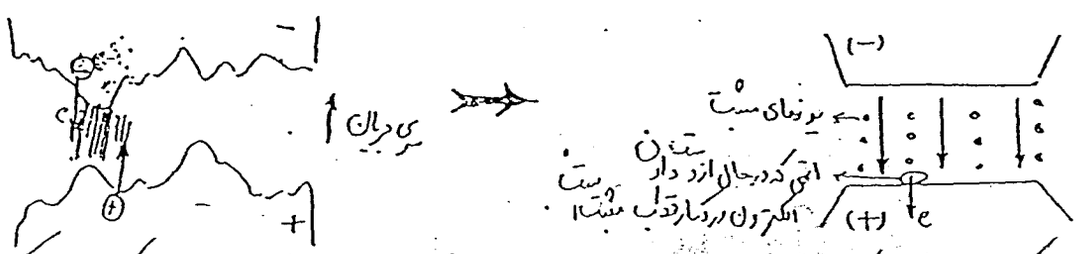
برای درک بهتر مطلب میتوان مثال زیر را عنوان کرد:

جمعیت فشرده‌ای را در نظر بگیرید و چند تا بچه هم در بین آنها باشد، بچه‌ها چون کوچکترند میتوانند از لابلای جمعیت بگذرند ولی بزرگترها بعلت فشردگی جمعیت امکان گذر ندارند.

اما اگر جهت بصورت باز تر و آینده نگر شوند امکان عبور بزرگتر ها نیز از این جهت خواهد بود. در اینجا برای جرقه نیز چنین است. در این لحظه چون کانال فشرده و متمرکز است تنها الکترونها هستند که میتوانند در داخل این کانال جابجا شوند و بصورت فعال باشند. به مرور زمان که کانال گسترش یافت بارهای مثبت نیز امکان جابجایی می یابند و در نتیجه از روی قطب مثبت کنده شده و به قطب منفی برمیخورند و نتیجتاً آن قطب را میخورند. پس بصورت یک نتیجه میتوان گفت که: در ابتدای جرقه بعلت dense بودن کانال برداشت ذرات و توسط الکترونها از قطب مثبت (قطع کار) انجام می گیرد و در ادامه جرقه بدلیل بزرگ شدن کانال پلاسما از یک طرف بارهای مثبت راحت تر میتوانند حرکت نمایند از طرف دیگر تعداد بارهای مثبت نیز رو به فزونی میرود چون هرچقدر کانال پلاسما بیشتر توام یابد یونیزاسیون بیشتر انجام میگیرد و لذا می بینیم که جهت به قطب منفی اندکی بعد از شروع جرقه آغاز میگردد و همینطور که زمان جرقه پیش میرود از جریان الکترونها کم شده و به جریان بارهای مثبت افزوده میگردد. بعد از مدتی دیده میشود که در لگ نقط بارهای مثبت زیاد که عبور و مرور می نمایند و بارهای منفی تقریباً وجود ندارند.

ممکن است سؤال شود که جریان بار مثبت و جریان بار منفی به چه معنی است؟

الکترون ها عامل ایجاد کننده کانال پلاسما



در حقی که بین قطبین کانال پلاسما برقرار است در ابتدای کانال به واسطه ی وجود الکترونها حرکت آنها که عامل بر جود آورنده ی پلاسما هستند، کانال ایجاد میگردد. الکترونها هستند که در داخل دی الکتریک مایع ایجاد حبابهای بخار میکنند (در اثر برخورد با مولکولهای مایع و ایجاد حرارت)

پارامتر بعدی (بعد از پلاریته) در جدول (۳-۵) درست (Off - Line control ...)

✓ جنس ابزار (Tool material) و نحوه ساخت آن میباشد که عموماً متاثر از جنس قطعه کار است

(مثلاً اگر بخواهیم فولاد را خشن کاری کنیم بهتر است از گرافیت استفاده کنیم، از انتخاب

ابزار قبل از آغاز فرآیند باید انجام گیرد) و نیز باید نحوه ی ساخت ابزار را هم مشخص کرد

✓ زیرا فرسایش ابزار هم به جنس و هم به نحوه ی ساخت ابزار بستگی دارد. میدانیم که در روش

ساخت که روی ابزار انجام میشود حرارتی روی سطح ابزار ایجاد تأثیرات حرارتی - مکانیکی

(thermo - mechanical) میباید (وقتی پایه ی فرز سطح ابزار را برای تراشیم

اثر عملیات مکانیکی

عمل cutting هم ایجاد حرارت و هم ایجاد یک سری تغییرات متالورژیکی سطح می نماید

که روی فازها، روی نابجائی ها (dislocation) و مرز دانه ها اثر میگذارد. بدین صورت که

مرز دانه ها را تغییر میدهد، باعث میشود نابجائیها در داخل دانه ها حرکت نمایند و به مرز دانه ها برسند

و پدیده ی کارسختی (work hardening) به وجود آید، یک سری تنشهای پس ماند حرارتی در

سطح بوجود آید. حرارت ایجاد شده در اثر عمل cutting ایجاد تنش های پس ماند

حرارتی میکند (اگر سرعت عملیات بالا باشد) برای بدست آوردن سطح قطعه ی کار بسیار از روشهای

انجام شده تأثیر پذیرفته است. و بعد این تأثیر روی ابزار در هنگام عملیات SPARK

خود را نشان خواهد داد. اگر در روی سطح ابزار انرژی پس ماند موجود باشد یعنی از نظر سطح

انرژی سطح ابزار در سطح (level) بالای انرژی باشد (مثلاً در روی ابزار تنش های

Mechanical و یا Thermal موجود باشد) این ابزار فرسایش زود رس تری

خواهد داشت پس ابزاری که سطحش عاری از این تنشهاست.

۷- جریان دیگر : الکترونی که از نیتروژن منفی وارد میشود توسط یون مثبت گرفته میشود و این یون (بعد از این که کانال یا اتم شود)

مجادت اتم یون الکترونش را به سیستم مثبت میدهد بدینصورت است که جریان الکترونی خالص

که در ابتدای جرقه موجود بود تبدیل به جریان بارهای مثبت میشود. و زمانی میرسد که دیگر

جریان الکترونی موجود نخواهد بود. این بارهای مثبت به قطب منفی برخورد کرده و از سطح

آن میخورند. لذا در ابتدای جرقه از قطب مثبت کنده شده و در ادامه فرآیند از کنده شدن

قطب مثبت کم شده و به کنده شدن قطب منفی اختصاص میگردد لذا اگر طول جرقه کوتاه باشد

(در حد 0.3 μsec) ابزار را اجباراً قطب منفی و قطعه کار را به سمت قطب مثبت برنت در

نتیجه اینصورت ابزار سیاست قطب مثبت و قطعه کار قطب منفی برنته میشود.

در حالت دوم در ابتدا الکترون ها به ابزار حمله کرده و از آن جدا میکنند ولی در ادامه جرقه کنده شدن از

ابزار مثبت متوقف و کندن از قطب منفی آغاز میگردد. با توضیحات بیان شده، میتوان

گفت که توسایش ابزار در EDM پدیده ناپذیر است و در هر حالتی وجود دارد اما میتوان

توسایش را با تدابیری مثل، انتخاب درست پلاریته کم نمود. پس انتخاب پلاریته به

اینجا بر میگردد که طول زمان جرقه چه مقدار باشد با توضیح است که در حین

کاری چون زمان جرقه زیاد است ابزار باید مثبت و قطعه کار منفی برنته شود، اما در جایی که

(70 μsec)

پرداخت کاری مورد نیاز است نیاز است پلاریته ابزار و قطعه کار برعکس آید. اگر طول زمان جرقه

کمتر از 2 μsec (در مورد من و فولاد) باشد باید ابزار را منفی و قطعه کار را مثبت اختیار نمود.

(البته این زمان با توجه به شرایط ویژه مثل جنس دی الکتریک، ابزار و... بین 0.3 - 3 μsec

میباشد) :

$0.3 < T_i < 3\mu sec$

در این شرایط ابزار منفی و قطعه کار مثبت است

پارامتر بعدی (بعد از پلاریته) در جدول (۳-۵) درست (off-line control....) جنس ابزار (Tool material) و نحوه ساخت آن میباشد که عمدتاً متاثر از جنس قطعه کار است (مثلاً اگر بخواهیم فولاد را خشن کاری کنیم بهتر است از گرافیت استفاده کنیم، از انتخاب ابزار قبل از آغاز نرم افزار باید انجام گیرد) و نیز باید نحوه ی ساخت ابزار را هم مشخص کرد زیرا فرسایش ابزار هم به جنس و هم به نحوه ی ساخت ابزار بستگی دارد. میدانیم که پروسه ساخت که روی ابزار انجام میشود حداقل روی سطح ابزار ایجاد تأثیرات حرارتی - مکانیکی (thermo-mechanical) مینماید (وقتی بافته ی فوز سطح ابزار را ی تراشیم عمل cutting هم ایجاد حرارت و هم ایجاد یک سری تغییرات متالورژیکی سطح می نماید که روی فازها، روی نابجائی ها (dislocation) و مرز دانه ها اثر میگذارد. بدین صورت که مرز دانه ها را تغییر میدهد، باعث میشود نابجائیها از داخل دانه ها حرکت نمایند و به مرز دانه ها بروند و پدیده ی کار سختی (work hardening) به وجود آید، یک سری تنشهای پس ماند حرارتی در سطح بوجود آید. حرارت ایجاد شده در اثر عمل cutting ایجاد تنش های پس ماند حرارتی میکند (اگر سرعت عملیات بالا باشد) لذا می بینیم سطح قطعه ی کار بیا را زپروسه انجام شده تأثیر پذیرفته است. و بعد این تأثیر روی ابزار در هنگام عملیات SPARK خود را نشان خواهد داد. اگر در روی سطح ابزار انرژی پس ماند موجود باشد یعنی از نظر سطح انرژی سطح ابزار در سطح (level) بالای انرژی باشد (مثلاً در روی ابزار تنش های Mechanical یا Thermal موجود باشد) این ابزار فرسایش زودرس تری خواهد داشت نسبت به ابزاری که سطحش عاری از این تنشهاست.

ابزاری که در اثر پدیده های متالورژیکی در آن تغییراتی ایجاد شده (یا بواسطه ی حرارت و یا عمل مکانیکی)
و دانه هاش تغییر شکل داده و یا کریستالهایش شکسته اند و تغییر شکل داده اند دقیقاً با
ابزاری که اینگونه اشکالات را ندارد بسیار از نظر رفتار و استقامت در مقابل فرسایش
در طول عمل ماشینکاری EDM متفاوت بوده و لذا این است که در ساخت ابزار برای با
تضمین نمود. بعضی مواقع هست که ابزار را برای خشن کاری میخواهیم و زیاد مهم نیست که این
ابزار مقداری فرسایش پیدا کند چون در عملیات دو نوع ابزار بکار میرود یکی برای
خشن کاری (Youghing) و دیگری برای پرداخت (finishing). اگر ابزاری
که برای خشن کاری استفاده میشود فرسوده شد باکی نداریم زیرا در مرحله finishing
قسمت هایی را که در اثر فرسایش ابزار درست درنیامده است با ابزار پرداخت اصلاح (Trim)
میکنیم. اما اگر بخواهیم ابزار پرداخت بسازیم در این مورد نحوه ی ساخت خیلی مهم است.
این نوع ابزار (Finishing) باید در حین فرآیند دچار فرسایش بیش از اندازه گردد چرا که اگر این
پدیده رخ داد دیگر شکل نهایی ایجاد شده توسط ابزار، شکل دلخواه نخواهد بود.
گاهی اوقات عمل پرداخت و خشن کاری را با یک ابزار انجام میدهند (به خاطر هزینه ی سنگین سا-
خت ابزار) از اینرو ابزار باید در حین عملیات دچار فرسایش گردد. لذا تصمیم در مورد جنس و نحوه ی
ساخت ابزار باید قبل از فرآیند تصمیم گیری شوند.

دی الکتریک و شستشو — Dielectric and Flushing

سیستم دی الکتریک: در مورد این سیستم بعداً به تفصیل سخن خواهد رفت اما فعلاً با اشاره ای
کوتاه، مطلب تا حدودی روشن می شود. نوع دی الکتریک بر فرآیند بسیار مؤثر است از جمله در تشکیل