Introduction to Electrochemical Machining (ECM)

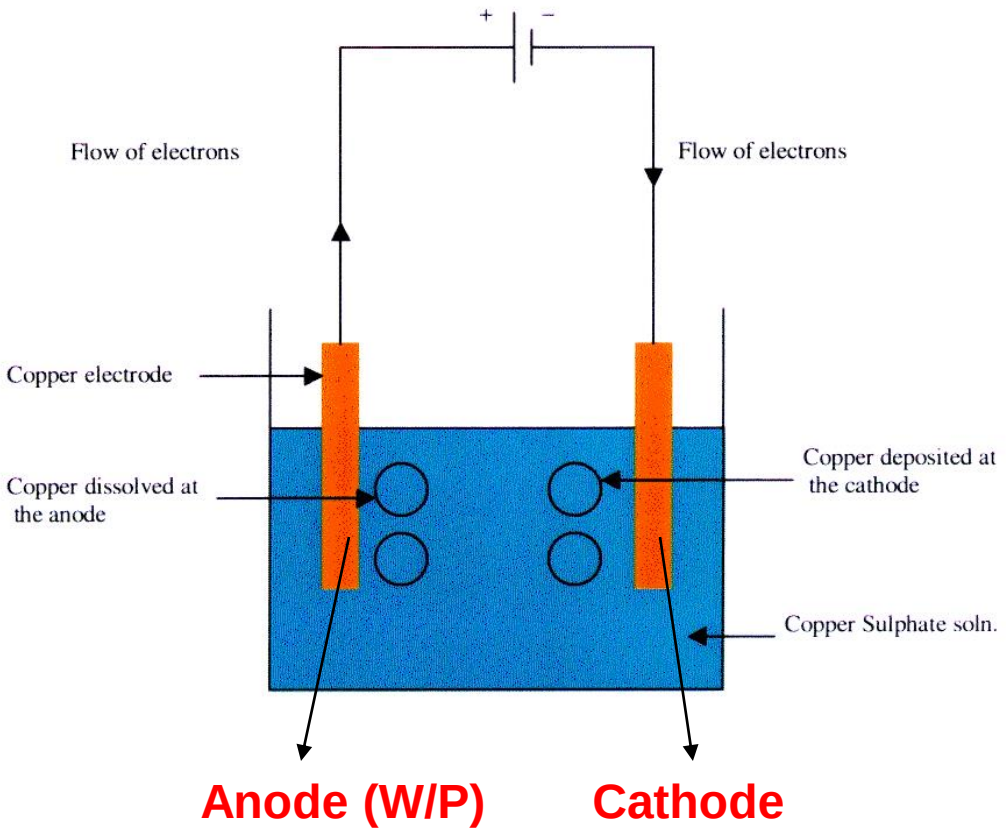
Peiman Mosaddegh, Ph.D.

Isfahan University of Technology

Fall 2020

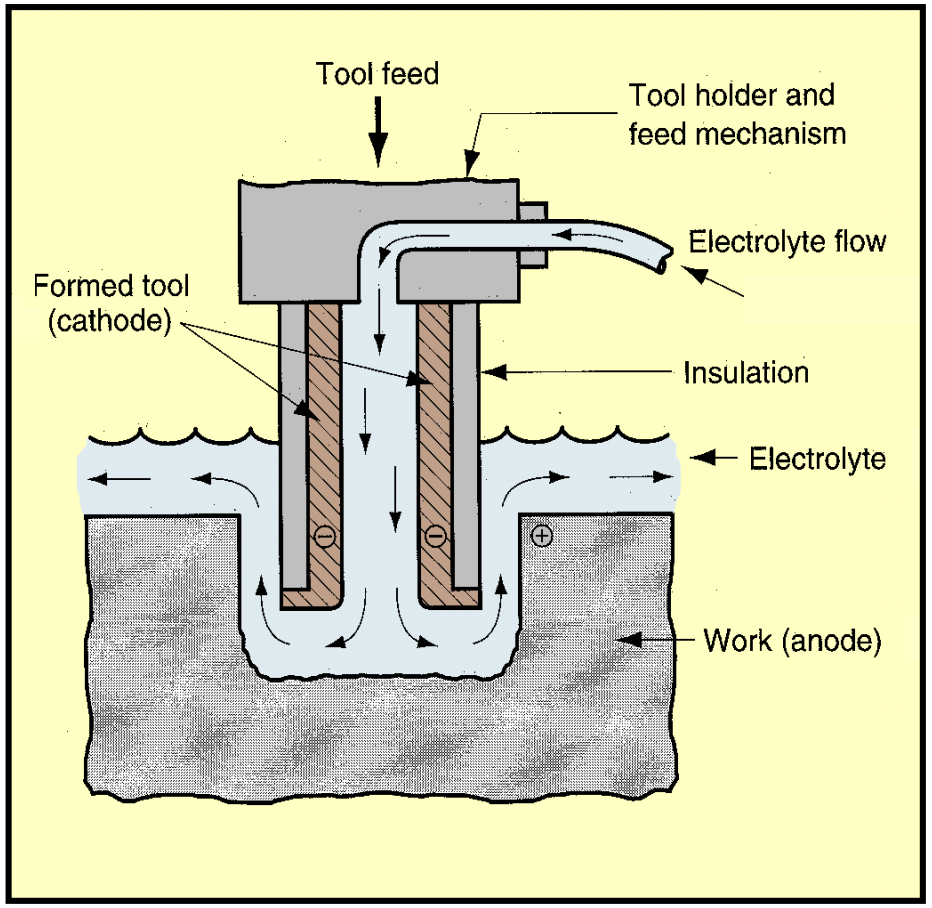
Electro-Chemical Machining (ECM)

- Works on the principle of electrolysis – accelerated chemical machining by help of electrons
- Die is progressively lowered into workpiece as workpiece is dissociated into ions by electrolysis
- Electrolytic fluid flows around workpiece to remove ions and maintain electrical current path
- Low DC voltage (0- 30 V), very High current (1000-5000 amps)

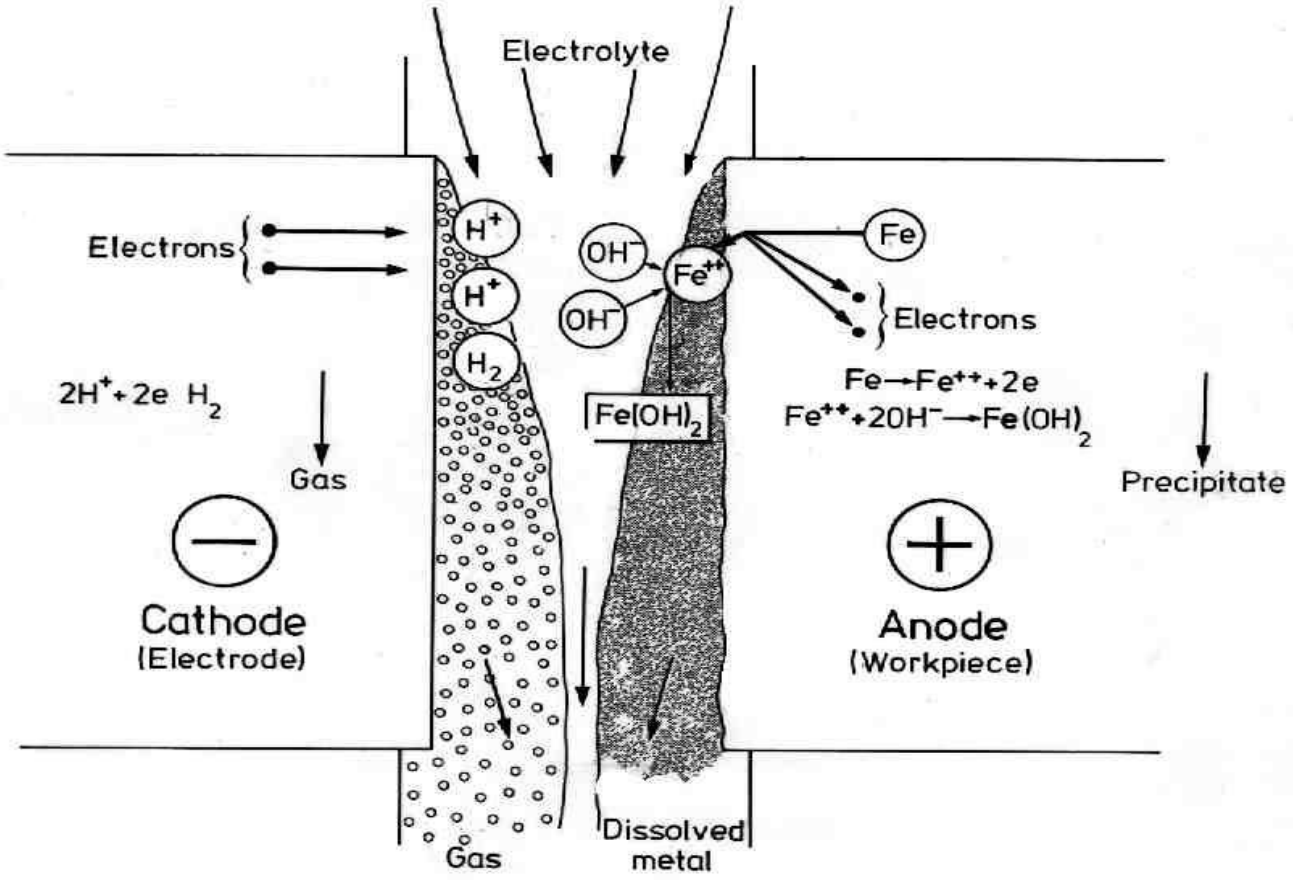


Electrochemical Processes - Electrochemical Machining

- Anodic dissolution of part using moving electrode & rapidly flowing electrolyte
- Opposite of electroplating
- Work part must be electrically conductive
- Electrode typically brass, copper or stainless steel
- Electrolyte typically NaCl or $NaNO_3$ in water



Dissolution Reactions of Iron



قانون اول فارادی در الکترولیز

• وقتی که جریان الکتریکی از محلولهایی مثل اسید سولفوریک رقیق می‌گذرد، آب به اجزایش یعنی هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌شود. آنها در اطراف صفحات متصل به قطبهای منفی و مثبت باتری آزاد می‌شوند. محلولهایی از این نوع که با گذشتن جریان از آنها بطور شیمیائی تجزیه می‌شوند، الکترولیت نامیده می‌شوند و فرایند تجزیه ماده بر اثر جریان الکتریکی به الکترولیز معروف است و رساناهایی را که در الکترولیت فرو می‌برند و جریان را به آن می‌رسانند، الکترود نام نهاده‌اند. الکترود مثبت به آند و الکترود منفی به کاتد معروف است.

• محصولات تجزیه الکترولیت مثل اکسیژن و هیدروژن تا وقتی که جریان عبور می‌کند، بر الکترودها می‌نشینند. جرم ماده ای را که در الکترود آزاد می‌شود، می‌توان اندازه گرفت. اگر محلول چنان انتخاب شود که ماده آزاد شده بر الکترود رسوب کند، این جرم را می‌توان به‌آسانی اندازه گرفت. مثلا اگر از محلول سولفات مس جریان بگذرد، مس بر کاتد رسوب می‌کند. این پدیده را در صورتیکه مثلا کاتد از کربن ساخته شده باشد، می‌توان به‌آسانی مشاهده کرد. لایه نازک مس بر سطح سیاه کربن بوضوح مشاهده می‌شود. با وزن کردن کاتد قبل و بعد از آزمایش می‌توان جرم فلز رسوب کرده را دقیقا معین کرد.

• اندازه‌گیری نشان می‌دهد که جرم ماده آزاد شده در هر الکترود ، به جریان الکتریکی و مدت الکترولیز بستگی دارد. با بستن مدار برای فواصل زمانی متفاوت می‌توان اطمینان یافت که جرم ماده آزاد شده با مدت زمان عبور جریان متناسب است. بنابراین ، جرم آزاد شده در الکترولیز هم با جریان الکتریکی و هم با مدت زمان انجام آزمایش متناسب است. پس به حاصلضرب آنها نیز وابستگی دارد. اما این حاصلضرب مساوی باری است که از الکترولیت گذشته است. در نتیجه جرم ماده آزاد شده در الکترود متناسب است با بار یا مقدار الکتریسته ای که از الکترولیت گذشته است. این قانون مهم را اولین بار ، "**فارادی**" وضع کرد و به **قانون اول فارادی در الکترولیتها** معروف است.

قانون اول فارادی در الکترولیز

•اگر m جرم ماده رسوب کرده ، I جریان الکتریکی ، t زمان الکترولیز و q بار کلی باشد که در مدت زمان t از الکترولیت گذشته است. قانون اول فارادی به شکل زیر نوشته می‌شود: **m=Kq=KIt** که در آن ، **K** ضریب تناسب است. با فرض اینکه (**q=1 C** با کل یک کولمب) باشد، در می‌یابیم که ضریب **K** مساوی جرم ماده آزاد شده توسط بار **1 C**، یا به عبارت دیگر جرم ماده آزاد شده توسط جریان **1 A** درمدت **1 S** زمان است.

•بررسی‌های **فارادی** نشان داد که هر ماده مقدار K معینی دارد که مشخصه آن ماده است. مثلا در الکترولیز نیترات نقره ، بار 1 C مقدار 1.1180 mg نقره را آزاد می‌کند. همین مقدار نقره توسط 1 C در الکترولیز هر نمک نقره مثلا کلرور نقره ومانند آن آزاد می‌شود. جرم ماده آزاد شده در الکترولیز نمک هر فلز دیگری با این مقدار ، تفاوت خواهد داشت. کمیت **K**، **هم‌ارز الکتروشیمیایی ماده** نامیده می‌شود.

تعریف هم‌ارز الکتروشمیایی

هم‌ارز الکتروشیمیایی یک جسم ، عبارت است از جرم آزاد شده از این جسم در الکترولیز ، وقتی که یک کولمب الکتریسته از محلول بگذرد.

قانون دوم فارادی در الکترولیز

قانون دوم فارادی

با توجه به اینکه هم‌ارز الکتروشیمیایی مواد مختلف بسیار متفاوت است، چه خواصی از جسم هم‌ارز الکتروشیمیایی آنرا تعیین می‌کنند؟ پاسخ این سوال در قانون مهم دیگری که آن را نیز **فارادی** با آزمایش به‌اثبات رساند، نهفته است.

هم‌ارز الکتروشیمیایی اجسام مختلف با جرم مولی آنها متناسب است و با ظرفیت شیمیایی آنها نسبت عکس دارد. ظرفیت شیمیایی هر اتمی را با تعداد اتم‌های هیدروژن تعریف می‌کنند که می‌توانند با آن ، ترکیب یا جانشین آن شوند.

مثال عددی برای توضیح قانون دوم

جرم مولی نقره 0.1079 Kg/molو ظرفیت آن مساوی یک است. جرم مولی روی 0.0651 Kg/molو ظرفیت آن دو است. بنابراین ، مطابق قانون دوم فارادی ، نسبت هم‌ارز الکتروشیمیائی نقره **(0.1079/1)** و روی برابر است با: **(0.0654/2)**

بنابراین هم ارز الکتروشیمیایی هر جسم برابر است با جرم مولی تقسیم بر ظرفیت شیمیایی آن ماده

قانون دوم فارادی در الکترولیز

•اگر هم‌ارز الکتروشیمیایی یک جسم را با **K[Kg/C]**، جرم مولی آن را با **M[Kg/mol]**و ظرفیت آنرا با **(n (...,1,2,3** نمایش دهیم، می‌توان قانون دوم فارادی را به این شکل **K=(1/F)(M/n)**نوشت. در اینجا **F** ضریب تناسب و ثابب عمومی است، یعنی برای تمام اجسام مقدار یکسان دارد. کمیت **F**به **ثابت فارادی** معروف است. مقدار آن که با آزمایش معین شده برابر است با:

F=96484C/mol

• برخی عناصر در ترکیبات مختلف ، ظرفیتهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند، مانند مس که یک فلز دو ظرفیتی است. بنابراین مس ، دو هم‌ارز الکتروشیمیایی دارد. نسبت جرم مولی هر جسم به (ظرفیت شیمیایی آن ، هم‌ارز شیمیایی آن جسم نامیده می‌شود. این نسبت ، مبین جرم جسمی است که برای جایگزین یک مول هیدروژن در ترکیبات لازم است.

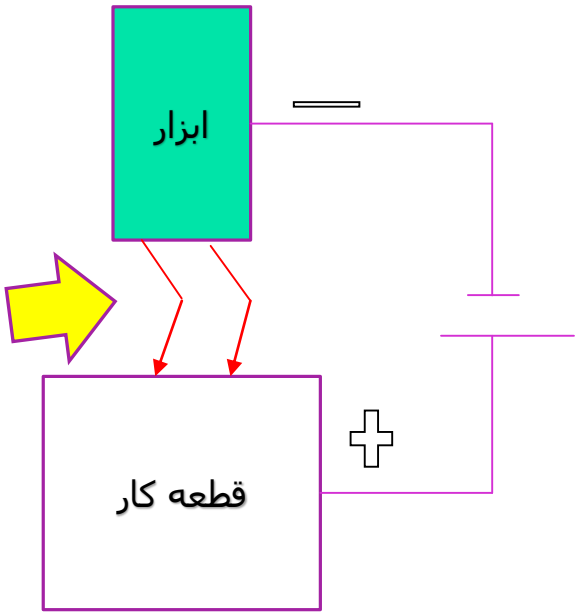
برای اجسام تک‌ظرفیتی هم‌ارز الکتروشیمیایی اجسام با هم‌ارز شیمیایی آنها متناسب است. بنابراین دو قانون فارادی را در هم ادغام می‌کنیم که در آن ، جرم ماده آزاد شده بر اثر عبور مقدار الکتریسته **q**از الکترولیت است. این فرمول **m=(1/F)(M/n) q**مفهوم فیزیکی ساده ای دارد. ثابت فارادی **F**، به عدد ، مساوی با باری ((qاست که باید از هر الکترولیتی بگذرد تا مقدار جسم آزاد شده در الکترودها با هم‌ارز شیمیایی آن جسم **((M/n**برابر باشد.

•بنابراین داریم:

m=(1/F)(M/n) It

Electro-Chemical Machining Concept

این روش عکس عمل آبکاری است و بر اساس قوانین فارادی عمل میکند در این روش همیشه قطعه کار + و ابزار – است و جریان همیشه DC است (0- 30 ولت)



$fe \longrightarrow fe(2+) + 2e(-)$

M(fe) = 56

n(fe) = 2

E = m / n = 28

F = 96500 coloumb

Faraday law:

برای کندن یک ایکیوالنت گرم از فلز آهن معادل 96500 کولمب جریان نیاز داریم.

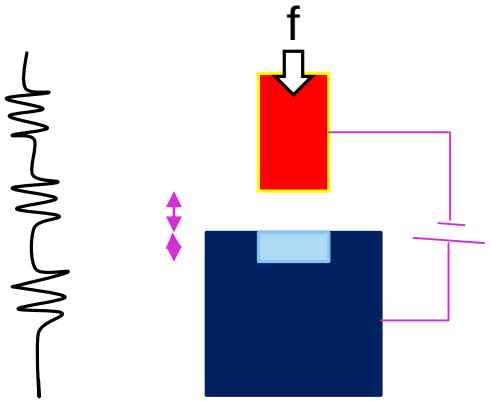
قوانین حاکم در ECM

$m = (I.t.E) / F$

$\dot{m} = I.E / F$ نرخ براده برداری

$E = A / Z$, $I = V / R$

Zعدد جرمی و Fعدد فارادی
kضریب هدایت پذیری(کاپا) conductivity



از مقاومت ابزار و قطعه کار به دلیل کوچک بودن نسبت به مقاومت الکترولیت صرف نظر میکنیم

$R = y / KA$ مقاومت الکترولیت

y فاصله گپ Δy مقدار نفوذ

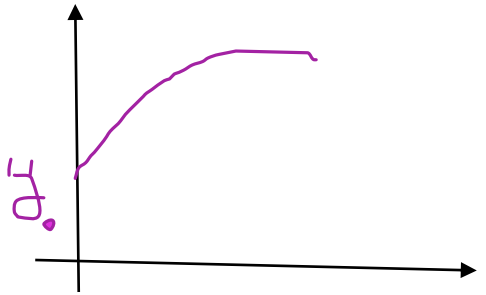
$I = (V.K.A) / y$ $m = (V.K.A.t.E) / y.F = p.V = p.A.\ \Delta y$

$\Delta y / \Delta t = (V.K.E) / (y.F.p) = C / y$ $dy / dt = C / y$

قوانین حاکم در ECM

قبل از اعمالf

$dy / dt = C/y \Longrightarrow y.dy = C.dt \Longrightarrow y = \sqrt{(y_0^2 + 2Ct)}$



بعد از اعمالf

$dy / dt = C/y - f$

برای حالت تعادل : $dy/dt=0$

$y' = f.y/C=1 \Longrightarrow C / f = y_{equi}$

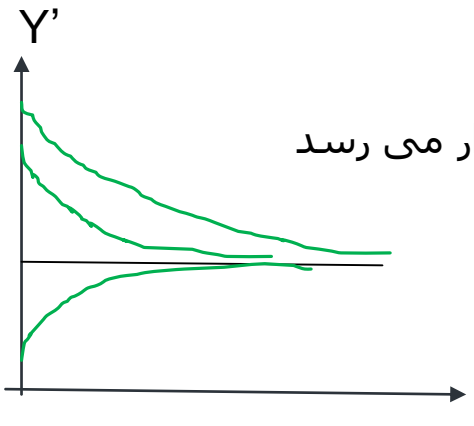
حالت تعادل وقتی است که سرعت خورده شدن قطعه کار با سرعت پایین امدن ابزار یکی باشد

$t' = f^2 t / C$

$dy' / dt' = (1-y') / y'$

$t' = y'_0 - y' + \ln[(y'_0 - 1) / (y' - 1)]$

قوانین حاکم در ECM



حالت خود تنظیمی

با هر شرایط اولیه (y_0) شروع کنیم سیستم به صورت خودکار به حالت پایدار می رسد

Vکه در روابط بالا جایگذاری می کنیم V ست شده در دستگاه نیست بلکه V-ΔV

ΔV افت ناشی از :

-مقاومت قطعه کار
-مقاومت ابزار
-مقاومت دی الکتریک
-پتانسیل اشباع گاز های ایجاد شده (H_2) ناشی از یونیزاسیون دی الکتریک که بیشتر در سطح قطعه کار

Electro-Chemical Machining مزایا و معایب

مزیت ECM نسبت به روش های دیگر این است که:
-فرسایش ابزار وجود ندارد
-گرمای تولیدی بسیار کم می باشد
-اعمال بار مکانیکی نداریم
-عدم وجود تنش های پسماند
-سرعت بالاتر نسبت به EDM
-امکان پلیسه زنی و سنگ زنی

معایب ECM نسبت به روشهای دیگر:
- جریان به کار گرفته شده در این حالت می تواند بین 0 - 100 000 A باشد اما جریان معمول استفاده شده بین 1000 – 5000 A می باشد.
- الکترولیت ECM معمولا NaCl و $NaNO_3$ می باشد و دفع این محلول هزینه بر است.

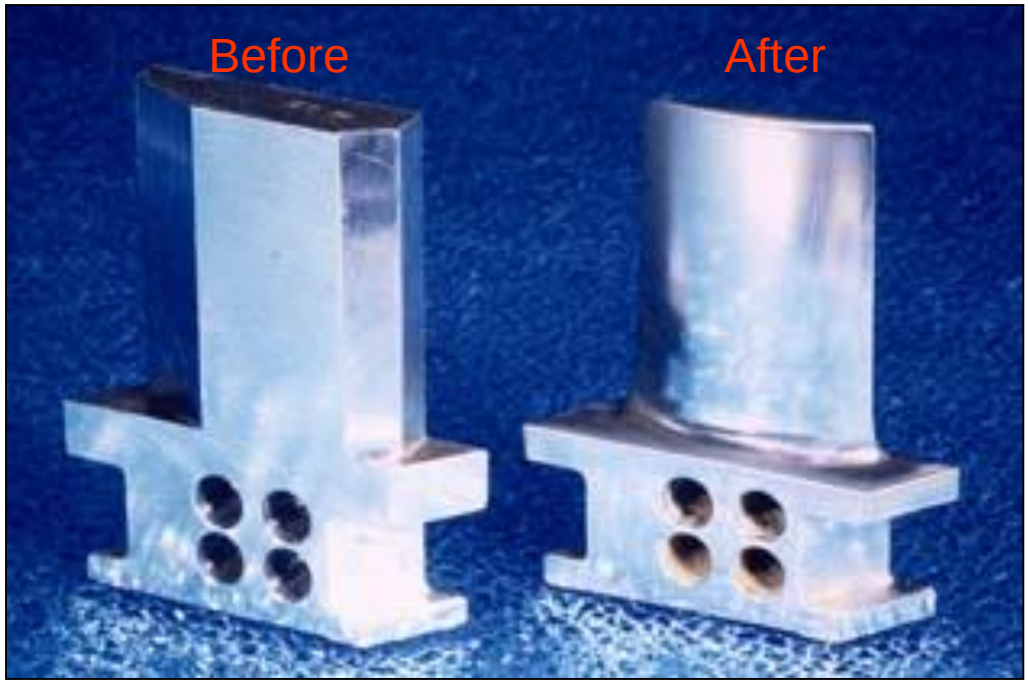
نکات:
مکمل شکل ابزار در قطعه کار ایجاد می شود
مقدار فاصله گپ در سرعت ماشین کاری و صافی سطح و دقت ابعادی (تلرانس) دخیل است

Electrochemical Machining Applications

- Used for hard work materials, difficult geometry (non-round holes)
- Can drill multiple holes simultaneously w/ ECM

- Advantages -
  - low surface damage
  - low tool wear
  - relatively high MRR

- Disadvantages
  - disposal of sludge
  - large amounts of energy required



Airfoil machined using 3-D ECM

مشخصات ابزار ECM

- -ابزار ECM باید از جنس هادی باشد و رسانایی الکتریکی خوبی داشته باشد.
- 2-رسانای گرمای خوبی باشد.
- 3-ابزار باید stiffness کافی داشته باشد تا در مقابل نیرو ها تغییر شکل ندهد.
- 4-باید قابلیت ماشینکاری داشته باشد تا به راحتی به شکل های مختلف در آید.
- 5-نسبت به الکترولیت های موجود مقاوم در برابر خوردگی باشد.
- 6-ارزان و در دسترس باشد.

در ECM یک ابزار هم برای خشن کاری و هم برای پرداخت استفاده می شود.

ابزار های استفاده شده: مس،برنج،گرافیت،stainless steel،آلومینیوم،آلیاژ های مس مثل مس منگنز.
مس تنگستن برای استحکام های بیشتر می باشد.
رولز رویس فولاد های کرم دار را برای تولید پره های توربین استفاده می کند.
اندازه ابزار 0.02 تا 0.8 میلی متر کوچک ترمیباشد با توجه به گشادی کناری(over cut)

مشخصات نگهدارنده ابزار ECM

جنس نگهدارنده ابزار می تواند از جنس های مختلف که دارای خواص:

1-مقاومت در برابر حرارت و خوردگی

2-عدم جذب رطوبت

مانند: PVC –Perspex -stainless steel –fiberglass

مشخصات الکترولیت

الکترولیت چندین وظیفه دارد:

1-عامل انتقال دهنده یون ها و نهایتا سبب تجزیه شیمیایی قطعه کار

2-مواد جدا شده از قطعه را به بیرون و خارج از فضای بین قطعه و ابزار هدایت می کند.اگر این کار نشود ذرات بعد از مدتی به صورت پلی عمل کرده و اتصال کوتاه می شود و یا احتمال اینکه به خاطر وجود گرما به سطح قطعه یا ابزار بچسبند وجود دارد.

همینطور گازهای تولیدی را نیز که میتواند در افت ولتاژ موثر باشند جا به جا میکند. در حین عملیات عمدتا در قطب منفی(ابزار) گاز هیدروژن تولید می شود که تابعی از سرعت فعل و انفعالات است.

3-زدودن گرما و کاهش آن

خواص سیستم الکترولیت:

1-نوع الکترولیت که عمدتا بایستی با توجه به جنس قطعه کار تعیین شود.

خواص کلی آن باید رسانایی خوبی داشته باشد.

2-ظرفیت گرمایی بالا داشته باشد،دمایش دیرتر بالا میرود.

3-نقطه جوش بالایی داشته باشد.

4- لزجت پایین داشته باشد تا هم جریان توربولانت بهتری حاصل شود و هم به علت لزجت کمتر سیالیت بیشتری جهت رسیدن به همه نقاط داشته باشد.

5-الکترولیت باید حداقل خوردگی را در حالت عادی روی اجزا ماشین و ابزار و...داشته باشد.

6-مواد حاصل از ماشینکاری نباید خود خورنده باشند و یا مواد سمی (مثل گازها) نباید تولید شود.

7-ارزان و در دسترس باشد و خطرناک نباشد.

دقت شود مسیر جریان باید به گونه ای طراحی شود که:

1-الکترولیت به همه نقاط به اندازه کافی برسد.

2-محل شست و شو به خوبی انجام شود و به صورت یکنواخت انجام شود.

3-خروج الکترولیت از روی سطح قطعه باید یکنواخت انجام شود.

پارامترهای ماشینکاری

نوع،غلظت،درجه حرارت و سرعت و نحوه جریان الکترولیت روی خواص نهایی قطعه کار مهم است.

این عوامل روی صافی سطح،سرعت براده براری،تلرانس(گشادی ها) تاثیر دارند.

مثلا درجه حرارت زیاد سبب کاهش مقاومت ← افزایش جریان ← افزایش بار برداری ← تغییر در گشادی کناری و صافی سطح ← تغییر در تکرار پذیری قطعه ی شود.

سرعت الکترولیت اگر زیاد شود ← فشار افت میکند و اگر این فشار از فشار نقطه جوش کمتر شود پدیده جوشش حجمی رخ میدهد.بنابراین با ایجاد حباب گاز در محیط (کاویتاسیون) مقاومت زیاد شده و سطوح فرق میکند.

همچنین شکسته شدن این حبابها باعث اعمال نیرو به ابزار و خوردگی آن میشود.

سرعت بین 15-60 متر بر ثانیه است.

درجه حرارت بین 20-60 درجه سانتی گراد است.

فشار بین 70kpa -3 Mpa تغییر میکند.

بعضی از الکترولیت ها در ترکیب به صورت لجن عمل میکنند مثل $cuso_4$ و بعضی نه مثل کلرید سدیم و خیلی دیگر از نمک ها که در بحث تصفیه خیلی راحت تر هستند.

کلرید سدیم:ارزان است-کاربرد فراوان دارد-کمی خورنده است-برای تنگستن کاربید خوب است.

$NaNo_3$ و KNo_3 گرانتر هستند ولی صافی سطح بهتری میدهند.

یکی از راه های جدا کردن ذرات جامد از الکترولیت سانتریفیوژ است.

طراحی ماشین ECM

پارامترهایی که در طراحی ماشین ECM باید در نظر گرفت:

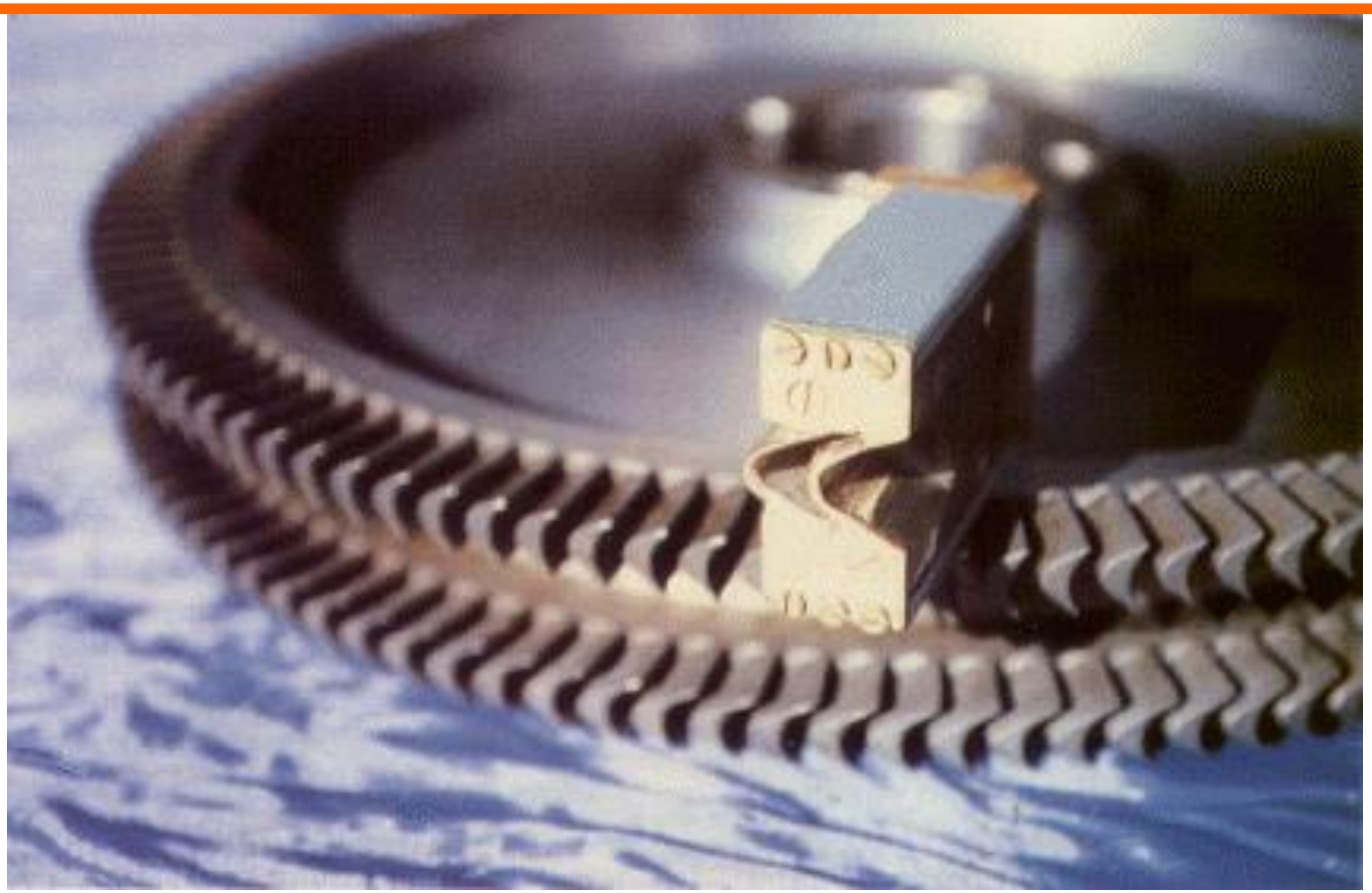
1-خوردگی(محیط هم حتی خورنده است)

که بایستی قسمت ها از پوشش های مناسب مانند PVC یا هر عایق دیگر استفاده شود(گاه بعضی از قسمت ها درون جعبه هایی قرار میگیرد.)

2-سیستم تهویه باید به خوبی کار کند تا گازهای سمی و همینطور وجود رطوبت را به بیرون بفرستد.

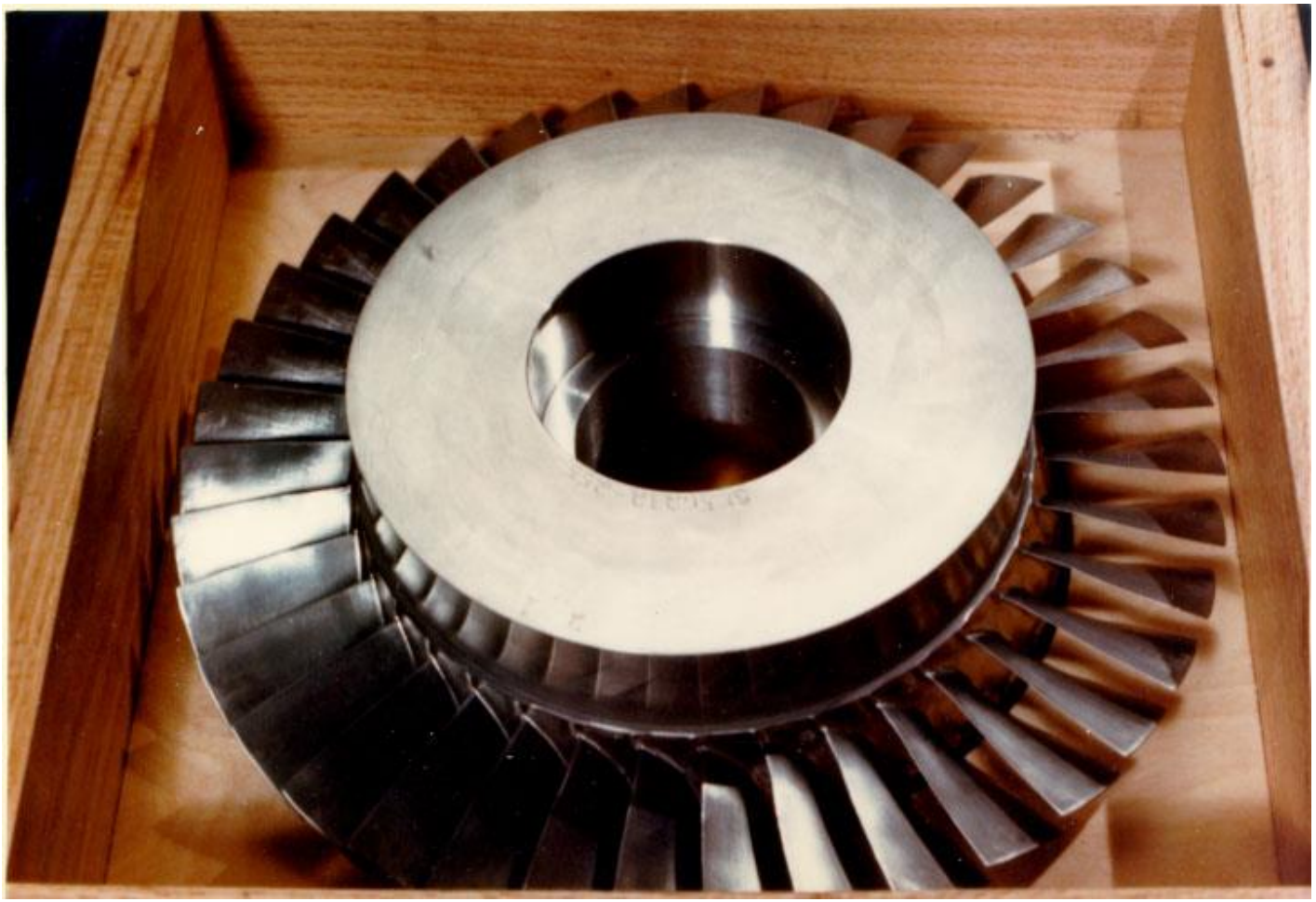
3-بین ابزار و قطعه کار نیروی زیادی می تواند وجود داشته باشد لذا بدنه باید از ساختار مناسبی برخوردار باشد.

Electrochemical Machining example

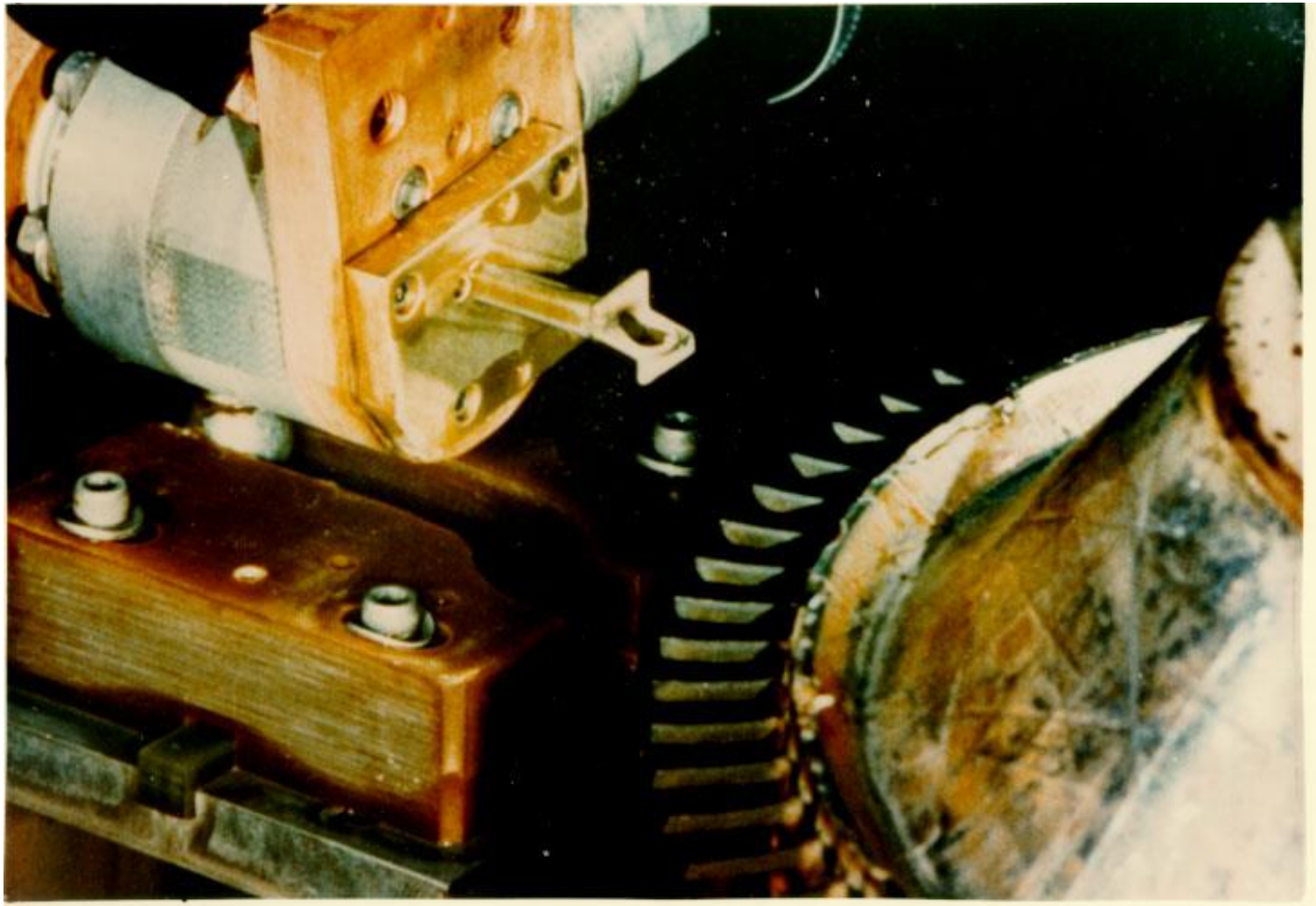


ابزار به همراه قطعه تولیدی

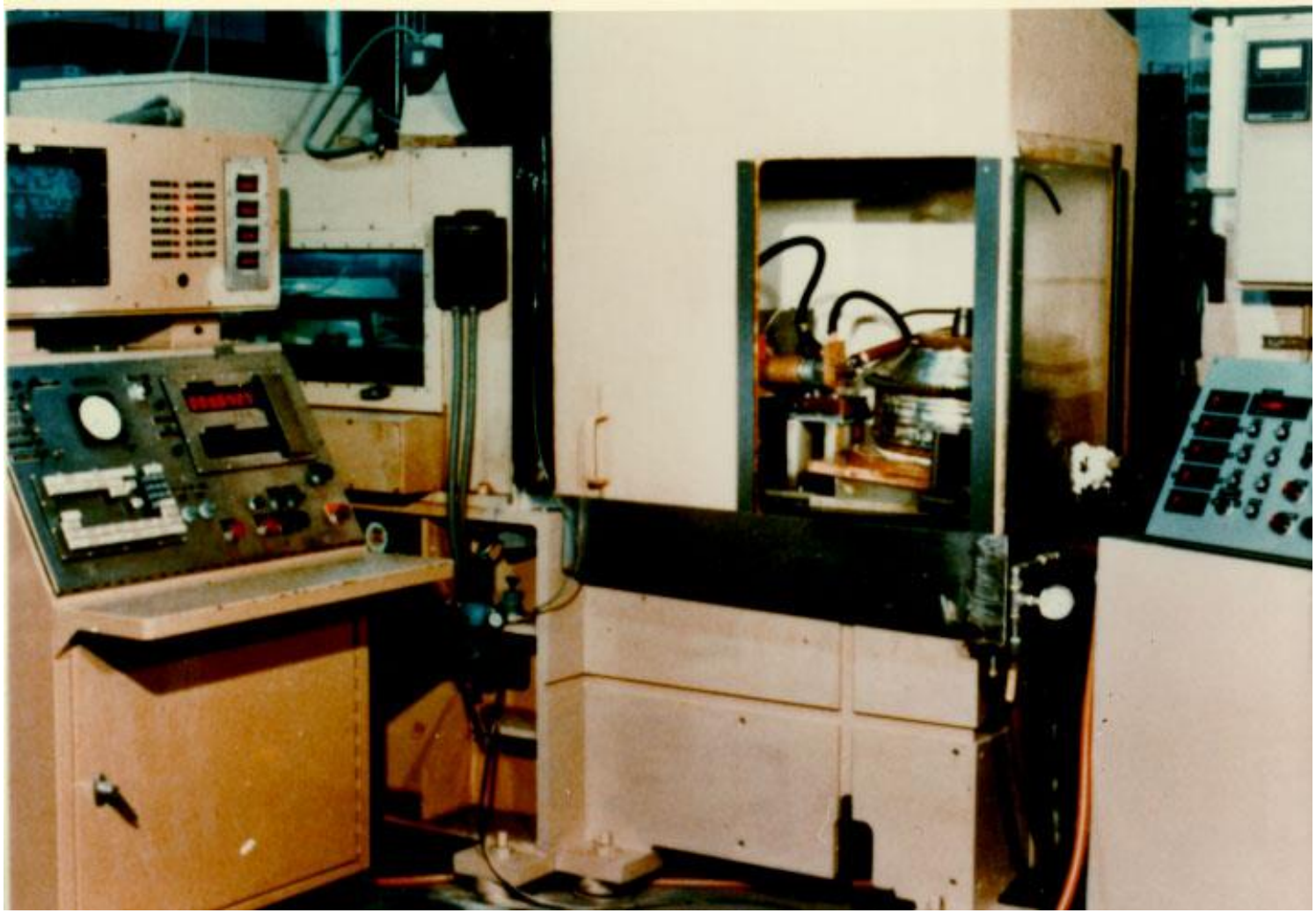
Electrochemical Machining example



Electrochemical Machining example



Electrochemical Machining example



Electrochemical Machining applications- Auxilary

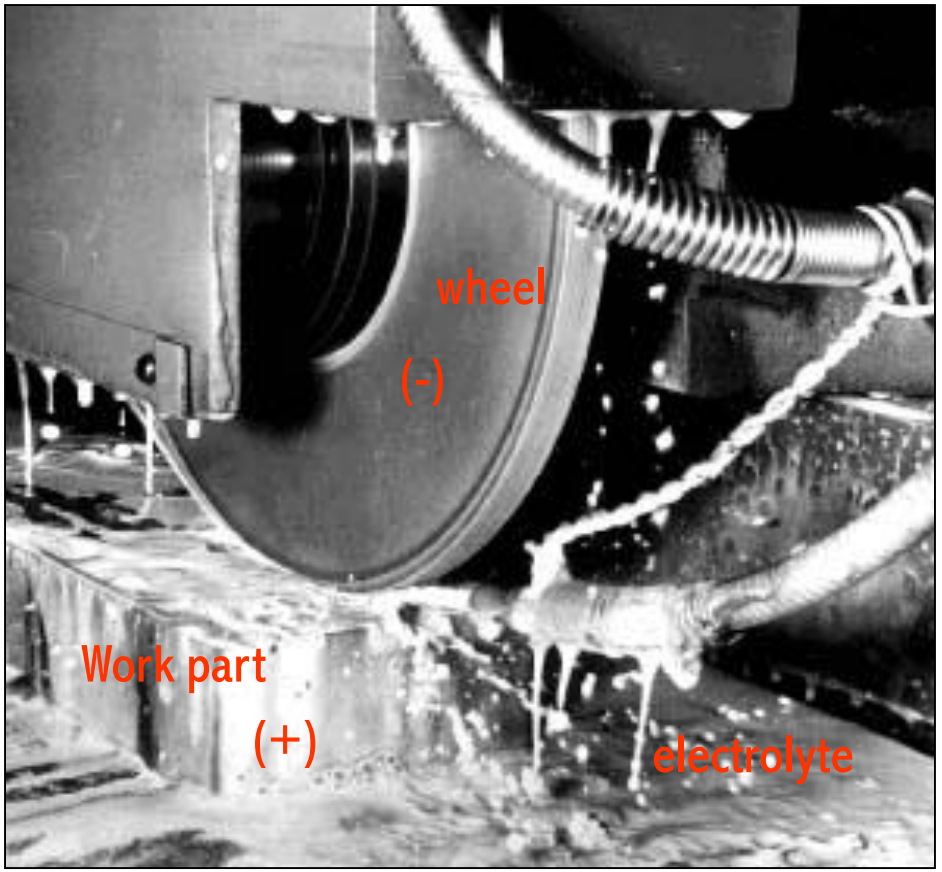
1- ECG (Electro chemical Grinding)
2- Electro chemical Deburring
3- STEM (Shape Tube Electrolytic Machining)
4- Capillary ECM

Electrochemical grinding (ECG)

- Combines electrochemical machining with conventional grinding
  - Grinding wheel is the cathode
  - Metal bonded wheel with diamond or Al_2O_3 abrasive
  - Majority of material removal from electrolytic action (95%) therefore very low wheel wear
  - Much faster than conventional grinding

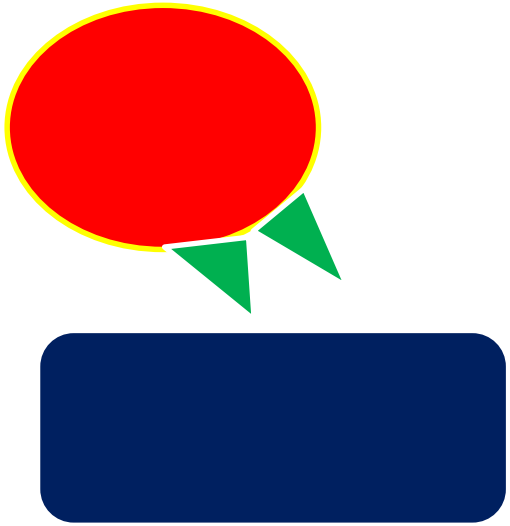
Electrochemical Processes - Electrochemical Grinding

- Similar to ECM
  - conductive grinding wheel is cathode (-)
  - work part is anode (+)
- Wheel - traditional abrasives embedded in a conductive bonding material
- Used for extremely hard materials



Electrochemical Processes - Electrochemical Grinding

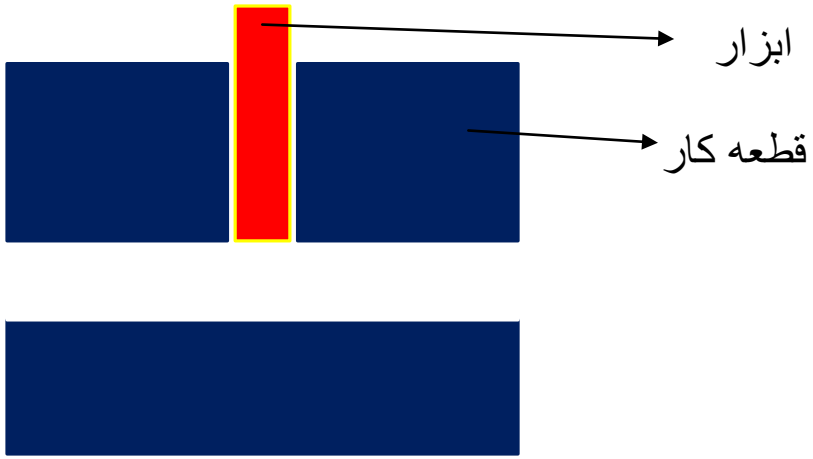
- Electrolytic action forms soft metal hydroxide on surface of part which is “wiped” away by grinding wheel
- Grinding only occurs where wheel wipes away hydroxide & exposes fresh metal
- Deplating responsible for 95% of metal removal, and abrasive action removes remaining 5%
- Wheel lasts much longer than in traditional grinding



- سنگ زنی ECG
electro chemical grinding

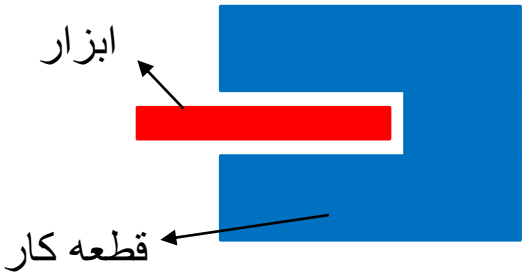
جنس دانه ها الماس یا CBN یا Al2O3 می باشد
ابزار به قطب – و قطعه کار +

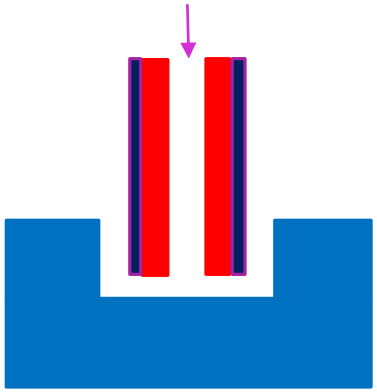
مثلا سنگ زنی توربین و ایجاد ریشه پره توربین
electo chemical machining 70-100 %
mechanical machining 0-30 %



- پلیسه زدایی

ابزار را به قطب - و قطعه کار را به قطب + متصل می کنیم ، سپس الکترولیت را در گپ بین ابزار و قطعه وارد نموده با برقراری جریان پلیسه های موجود از بین می رود.



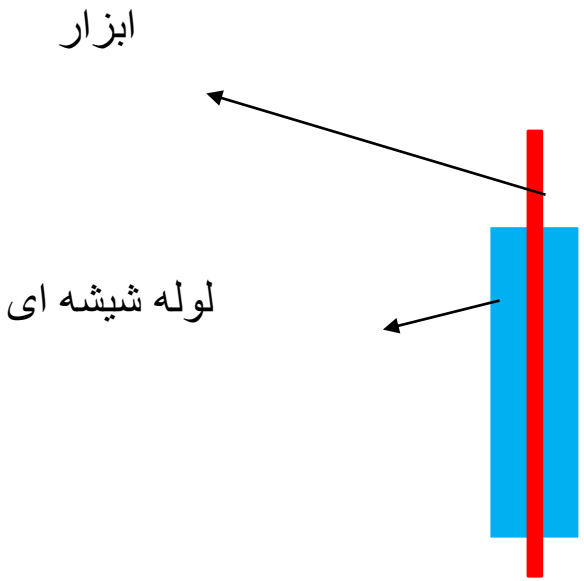


- STEM (shaped tube electrolytic machining)

ایجاد سوراخ هایی که نسبت طول به قطر انها زیاد است
مانند سوراخ های خنک کاری توربین

الف) برای ابزارهای استاندارد
قسمت میانی ابزار (سفید رنگ) محل ورود الکترولیت (اسید)
قسمت قرمز رنگ ابزار (از جنس تیتانیوم) و قسمت تیره رنگ
پوشش روی ابزار برای جلوگیری از گشادی کناری

تلرانس گشادی کناری علاوه بر عوامل قبل به دما و غلظت اسید
بستگی دارد



- ب) برای ابزارهایی با قطر کم (روش مویی) Capillary ECM

سیستم ابزار از یک لوله شیشه ای (قسمت آبی) که محل ورود الکترولیت است و ابزار از جنس پلاتین یا تیتانیوم (قسمت قرمز رنگ) داخل لوله تشکیل شده

- Questions???