

Usinage par procédés non traditionnels

Cours SYS 849-6

Procédés non traditionnels

- À action mécanique
 - Jet d'eau et jet d'eau abrasif
 - Usinage ultrasonique
- Procédés électrochimiques
 - Usinage électrochimique
 - Ébavurage et rectification électrochimiques
- Procédés thermiques
 - Electro-érosion: EDM
 - Laser, plasma
- Procédés chimiques

Jet d'eau et jet d'eau abrasif

Applications

- Mousse
- Bois
- Carrelage/Marbre
- Plastique
- Etc

Usinage par jet d'eau

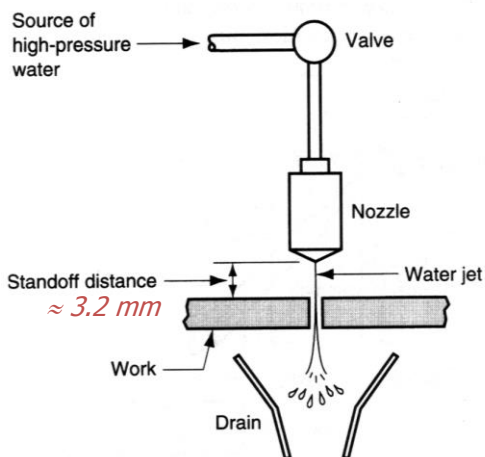


FIGURE 26.3 Water jet cutting.

- Avance : $f \approx 5 \text{ à } 500 \text{ mm/s}$
fonction de l'épaisseur coupée

Vitesse du jet $\approx 900 \text{ m/s}$

Pression $\approx 400 \text{ Mpa (60 ksi)}$

diamètre de l'orifice = $0.1 \text{ à } 0.4 \text{ mm}$

Non approprié pour les matériaux fragiles comme le verre
risque de fissuration

Source: Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing, John Wiley & Sons, 2002

Usinage au jet d'eau : Principes, applications et avantages

Usinages au jet d'eau:

- pression de 800 à 4000 bars.
- ajout de particules abrasives (silicates, alumine) pour la découpe de l'acier et du béton.
- buse d'injection en saphir diamètre d'injection de 0,075 à 0,5 mm.
- vitesse du jet: 1000 m/s (3 fois la vitesse du son).
- vitesse de coupe: 1m/min pour des épaisseurs jusqu'à 100mm.
- découpe à sec due à la grande pression.

Avantage:

- propre.
- immatériel (ne chauffe pas).
- inusable et facilement réglable.
- précis (quelques 1/100èmes de mm).

Usinage au jet d'eau : Inconvénients et utilisations

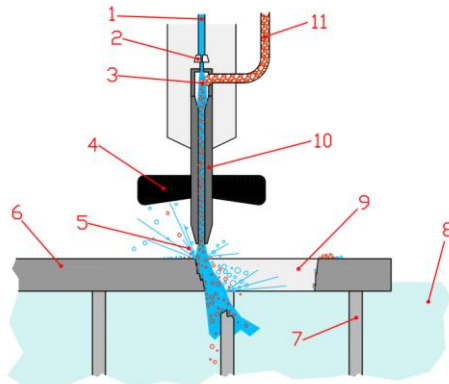
Inconvénients:

- limitation quant à la forme et à la profondeur de pénétration.
- durée de vie des buses (200 heures sous 4000 bars).
- coût de l'installation: 100 000 à 140 000 €, et encore autant pour la filtration et l'adoucissement de l'eau.

Utilisation:

Carton ondulé, contreplaqué, éponge, explosif, poisson surgelé, cube de glace, laine de verre, cuir, plaques d'amiante, verre, tôle, céramique, acier, aluminium, acier inoxydable, composites, marbre.

Usinage au jet d'eau :



<http://www.decoup-jet-eau.com/jet-deau>

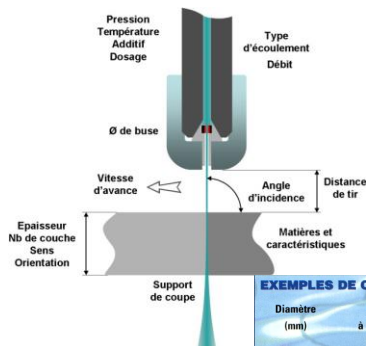
Jet d'eau pure pour les **matériaux tendres**. Buse de coupe de 0,08 mm à 0,30 mm (sertie d'un saphir industriel)

Jet d'eau abrasif utilisé pour les **matériaux les plus durs et les plus épais**. Buse de coupe de 0,20 mm à 0,40 mm (sertie d'un saphir ou d'un diamant industriel)

L'eau sous très haute pression sort de la buse de découpe :

- à une vitesse de 900 m/s à 4135 bars (environ 3 fois la vitesse du son).
- à une vitesse de 1 200 m/s à 6150 bars (environ 4 fois la vitesse du son).

Découpe à l'eau pure - Les paramètres



Permet la découpe de matériaux ductiles ou de composites

Le débit d'eau est fonction de la pression et du Ø de la buse.
Le débit d'eau approximatif peut-être calculé par la formule :

$$Q = 0.53 * Db^2 * \sqrt{P}$$

Q : Débit en (l/min)

Db : Diamètre de la buse(mm)

P : pression de service (bar)

Diamètre (mm)	Débit à 300 MPa (l/min)	Puissance à 300 MPa (kW)
0.1	0.25	1.9
0.13	0.41	3.0
0.15	0.59	4.3
0.18	0.81	5.9
0.2	1.06	7.7
0.23	1.34	9.7
0.25	1.65	12.0
0.28	2.0	14.5
0.3	2.38	17.3
0.33	2.79	20.3
0.36	3.23	23.3

http://www.critt-tjfu.com/article.php3?id_article=12

les débits d'eau sont en général assez faible souvent inférieur à 0.4 l/min

Vitesses de coupe

Vitesse de coupe en mm/min suivant le type de matériaux et l'épaisseur

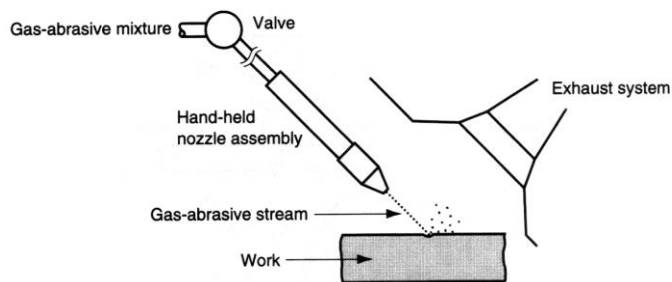
Matériaux Épaisseur Matériaux	5 mm	10 mm	15 mm	20 mm	25 mm	30 mm	50 mm	100 mm
Acier rapide	678	370	236	169	128	102	48	18
Acier inoxydable 304	833	454	290	208	159	125	60	22
Titane	1083	590	377	270	206	163	78	28
Aluminium	2250	1226	782	561	427	339	162	59
Granite (Mohogany)	2974	1621	1035	741	565	448	214	78
Composites Fibres de Carbone	3915	2135	1363	975	744	590	281	103
Verre	4315	2352	1502	1075	820	650	310	113
Marbre	4672	2547	1626	1164	888	704	336	123
Plexiglas	4904	2674	1707	1222	932	739	352	129
Composites Fibre de Verre	5948	3243	2070	1482	1131	896	427	156
Kevlar	6195	3378	2156	1543	1178	934	445	163
Graphite	8087	4409	2815	2015	1538	1219	581	213
Carreau de céramique	8869	4835	3087	2210	1686	1337	637	233

Ces valeurs représentent la vitesse de séparation maximale et sont obtenues en travaillant à 4100 bar, 3,7 l/min, et 580 g/min d'abrasif (FLOW PASTERplus Garnet, mesh 80). Pour une découpe d'ébauche, comptez 80% de ces valeurs et 40% pour une découpe de qualité. Ces valeurs sont théoriques et non contractuelles.

<http://www.decoup-jet-eau.com/jet-deau>

Usinage avec jet abrasif

FIGURE 26.4 Abrasive jet machining (AJM).



- Jet d'eau Abrasifs: Al_2O_3 , dioxyde de silicium, diamètre de l'orifice = 0.25 à 0.63 mm

Applications

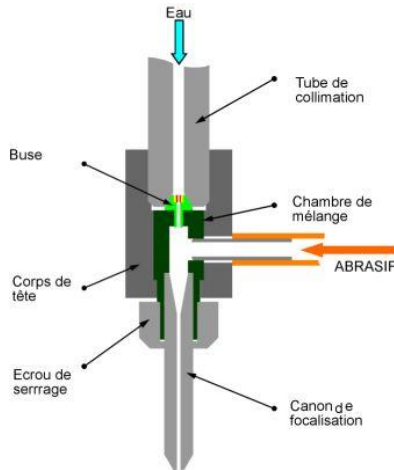
- gaz + abrasifs
gaz = air, azote, helium, dioxyde de carbone
pression de 0.2 à 1.4 Mpa
diamètre orifice: 0.075 à 1.0 mm
distance orifice-pièce = 3 à 75 mm

finition, ébavurage, nettoyage,
séparation des pièces

Coupe des matériaux durs:
céramiques, pierres

Source: Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing, John Wiley & Sons, 2002

Système pour usinage par jet d'eau abrasif



Le système de découpe à l'abrasif comprend :

- un injecteur d'abrasifs,
- un doseur d'abrasifs,

Les abrasifs utilisés sont caractérisés par :

- leur dureté,
- leur dimension : granulométrie,
- la matière : composition,
- leur forme : espèce.

Types d'abrasifs

ABRASIFS	COMPOSITION	DENSITÉ	DURETÉ
Grenat	Trisilicates d'alumine, magnésie, calcite, oxyde de fer, manganèse, ou oxyde chrome	3,4 à 4,3	Mohs : 7,5 Knoop : 1 350
Oxyde d'aluminium	99,5 à 99,9 % d'oxyde d'aluminium pur avec de la silice et des impuretés minérales	3,95 à 4	Mohs : 8-9 Knoop : 2 100
Carbure de silicium	Carbure de silicium	3,2	Mohs : 9,15 Knoop : 2 500
Particules d'acier	0,85 % de carbone 0,4 % de silicone 0,6 % de manganèse	8,7	Mohs : — Knoop : 400-800
Scories de cuivre	—	—	Mohs : — Knoop : —
Sable de silice	Dioxyde de silicium	2,2 à 2,65	Mohs : — Knoop : 700
Poudre de verre	—	2,45 à 2,5	Mohs : 5,5 Knoop : 400-600

Propriétés les plus utilisées des matériaux abrasifs ainsi que leur composition chimique.

Avantages de la découpe au jet d'eau:

- Coupe à froid sans influence thermique
- Coefficient d'utilisation optimal de la matière grâce à la réduction maximale des distances entre les pièces
- Usinage non polluant et propre sans émanation de gaz de fumées toxiques
- Productivité élevée grâce aux installations à plusieurs têtes de découpe

Usinage ultrasonique

Usinage ultrasonique

*Outil: Acier rapide
Amplitude: 0.075 mm
Fréquence : 20 000 Hz*

*Eau + 20 à 60 %
des particules
abrasives (SiC , B_4C , Al_2O_3)*

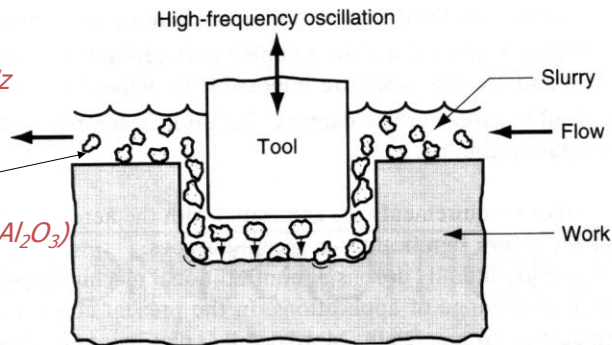
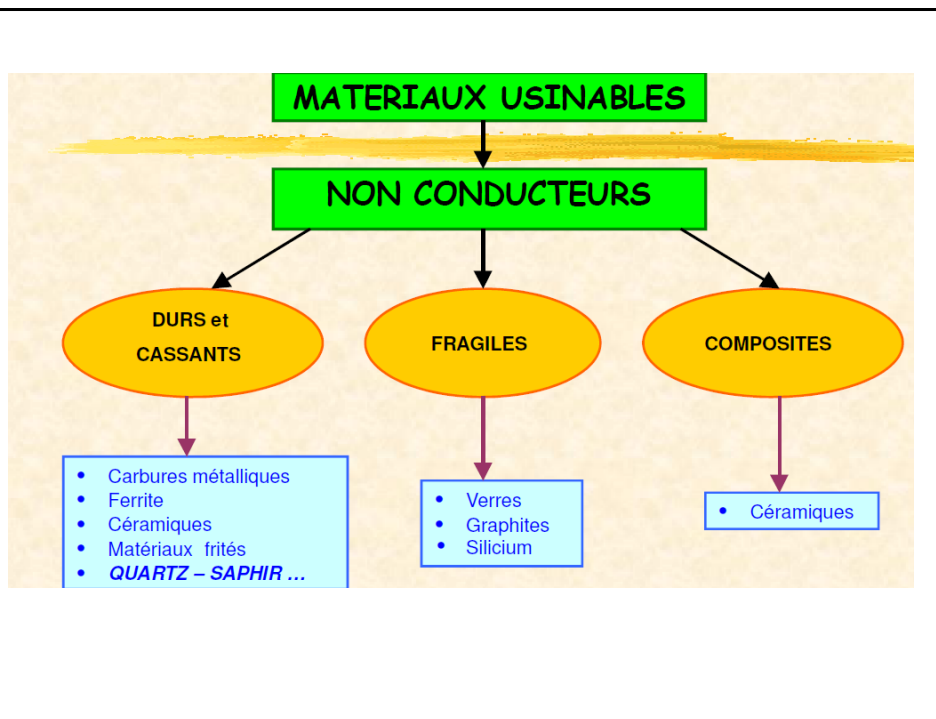


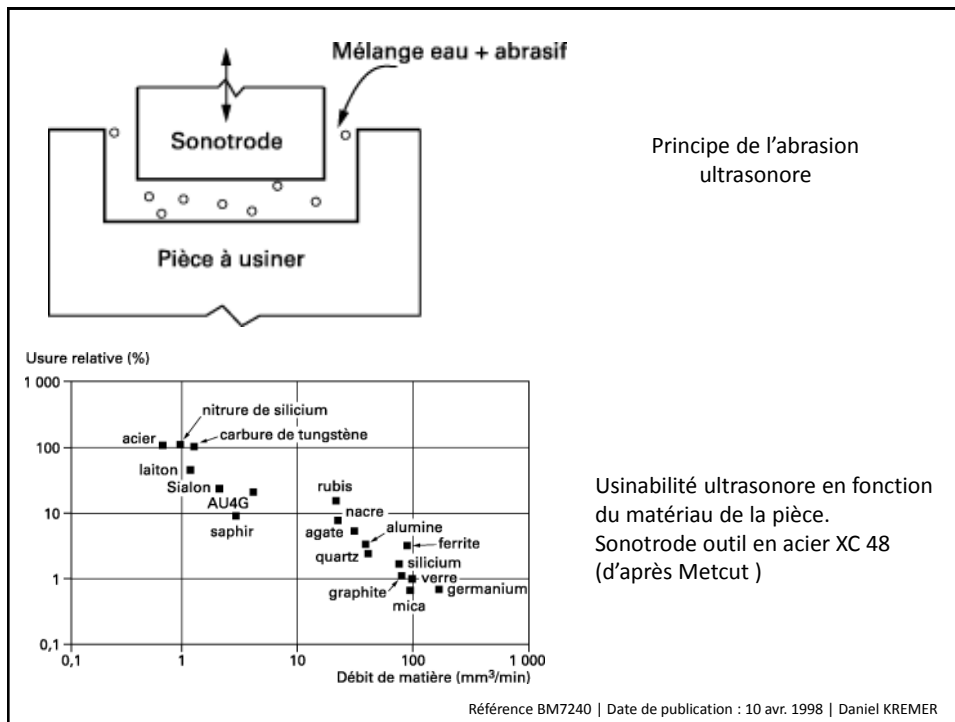
FIGURE 26.1 Ultrasonic machining.

Application: Matériaux fragiles : carbures, trous non ronds

Plus amplitude et fréquence élevées, plus débit de coupe l'est aussi

Source: Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing, John Wiley & Sons, 2002





Performance de l'usinage ultrasonique

Le procédé peut être caractérisé par trois **critères** principaux (performances):

- débit de matière ;
- usure relative de la sonotrode ;
- état de surface.

Les performances dépendent essentiellement:

- du matériau à usiner,
- du matériau de la sonotrode
- du matériau des grains abrasifs
- d'autres paramètres (Concentration, paramètres ultrasonores, charge statique)

Dimension des grains	Grain 600	Grain 280
Verre	100	100
Carbure de tungstène	1	9
Acier rapide	0,4	2,7

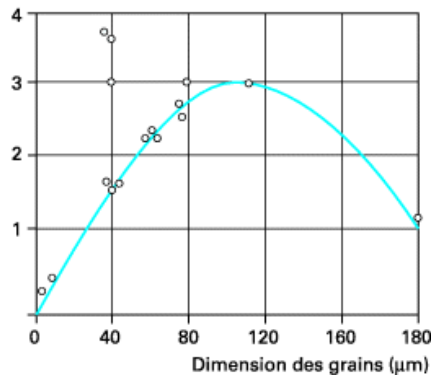
Enlèvement de matière suivant le matériau et la dimension des grains.
(Usinage du verre pris comme référence 100)

Performance de l'usinage ultrasonique

Abratif	Dureté Knoop	Pouvoir de coupe relatif
Diamant	6 500 à 7 000	1
Nitride de bore cubique	4 700	0,95
Carbure de bore	2 800	0,50 à 0,60
Carbure de silicium	2 500	0,25 à 0,45
Alumine	2 000 à 2 100	0,14 à 0,16

Dureté et pouvoir de coupe des grains d'abrasif

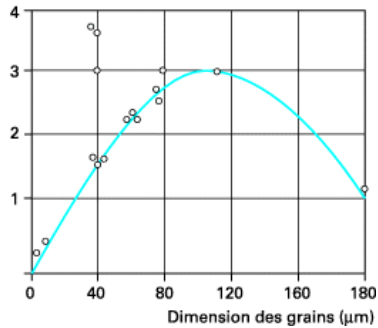
Vitesse de pénétration
(mm / min)



Vitesse de pénétration en fonction de la dimension des grains (usinage du verre) (d'après Neppiras)

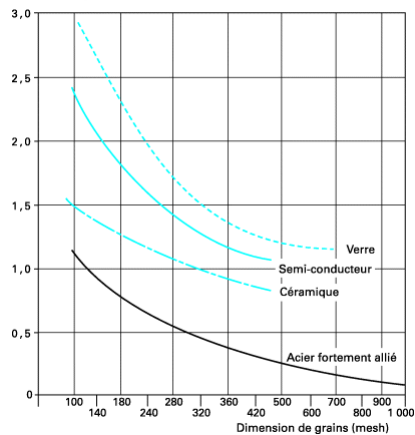
Référence BM7240 | Date de publication : 10 avr. 1998 | Daniel KREMER

Vitesse de pénétration
(mm / min)



Vitesse de pénétration en fonction de la dimension des grains (usinage du verre) (d'après Neppiras)

Rugosité Ra (μm)



Qualité de surface en fonction de la dimension des grains pour différents matériaux (d'après Kennedy et Grieve)

NEPPIRAS (E.A.) - Report on ultrasonic machining. - Metalworking Production, 100, no 27-33, 1968.

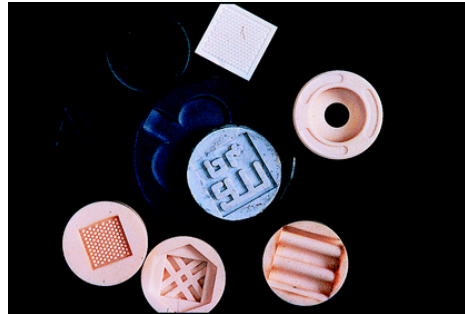
KENNEDY (D.C.), GRIEVE (R.J.) - Ultrasonic machining, - a review, The Production Engineer, Sept. 1975

Référence BM7240 | Date de publication : 10 avr. 1998 | Daniel KREMER

Usinage par ultrasons: Quelques exemples



Exemples d'électrodes en graphite
usinées par ultrasons (Doc. ENSAM-
EXTRUDE HONE)



Exemples de pièces en céramiques
usinées par ultrasons (Doc. ENSAM)

Usinage ultrasonique du granit



Usinage électrochimique

Usinage électrochimique vs chimique

Usinages chimiques: dissolution d'un matériau dans un bain d'acide

- protection des zones à ne pas usiner.
- trempage de la pièce dans un bain acide.
- très lent (0,3 à 0,6mm/h).
- usinage sans effort.

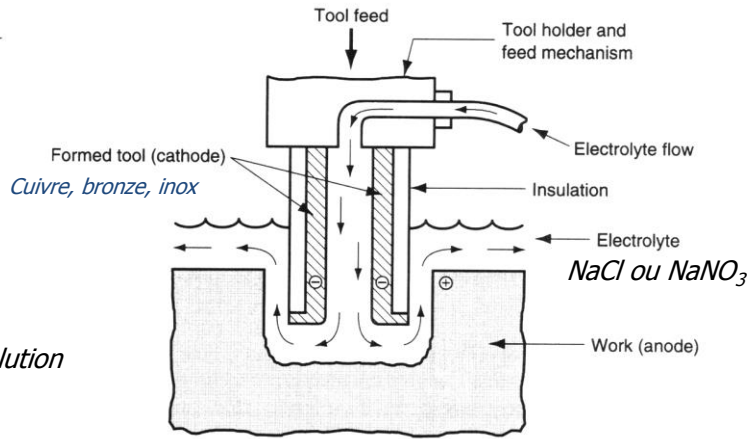
Usinages électrochimiques:

- outil électrode.
- plus rapide que le chimique mais dégagement d'hydrogène et d'oxygène.
- recyclage des boues dangereuses ($4\text{Fe}(\text{OH})_3$).
- L'outil ne s'use que par contact avec l'électrolyte.

Usinage électrochimique

Energie électrique + réaction chimique

FIGURE 26.5
Electrochemical machining (ECM).



Coupe par dissolution anodique

*Applications : usinage des matériaux conducteurs d'électricité
(Al, Cu, Fe, Ni, aciers)*

Matériaux durs ou difficiles-à-usiner ou pour des géométries complexes

Source: Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing, John Wiley & Sons, 2002

Usinage électrochimique

Vitesse d'avance : $V_f = C \cdot I/A$ *A: aire frontale de l'électrode (mm²)*
I : courant (A)
Courant (I) allant jusqu'à 1200 A
C: Constante = f(matériau)

TABLE 26.1 Typical values of specific removal rate C for selected work materials in electrochemical machining.

Work Material ^a	Specific Removal Rate C		Work Material ^a	Specific Removal Rate C	
	mm ³ /amp-sec	(in. ³ /amp-min)		mm ³ /amp-sec	(in. ³ /amp-min)
Aluminum (3)	3.44×10^{-2}	(1.26×10^{-4})	Steels:		
Copper (1)	7.35×10^{-2}	(2.69×10^{-4})	Low alloy	3.0×10^{-2}	(1.1×10^{-4})
Iron (2)	3.69×10^{-2}	(1.35×10^{-4})	High alloy	2.73×10^{-2}	(1.0×10^{-4})
Nickel (2)	3.42×10^{-2}	(1.25×10^{-4})	Stainless	2.46×10^{-2}	(0.9×10^{-4})
			Titanium (4)	2.73×10^{-2}	(1.0×10^{-4})

Compiled from data in [5].

^aMost common valence given in parentheses ()—assumed in determining specific removal rate C. For different valence, compute C by multiplying C by most common valence and dividing by actual valence.

*Usiner de l'aluminium avec un courant $I = 1200A$ et une électrode de 300 mm²,
Vitesse d'avance $V_f = 0.14 \text{ mm/s} = 8.4 \text{ mm/min}$*

Source: Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing, John Wiley & Sons, 2002

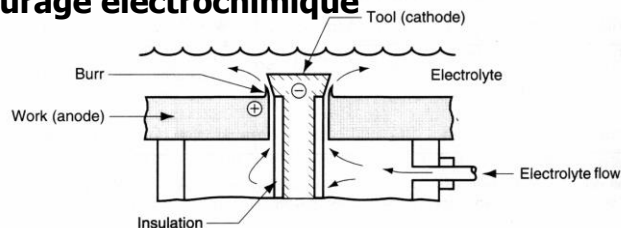
Usinage électrochimique

- Applications :
 - Formes irrégulières et complexes des moules
 - Perçage de plusieurs trous à la fois
 - Perçage des trous non ronds
 - Ébavurage
- Avantages
 - pas de contact, peu de dommage à la pièce.
 - peu d'usure de l'outil
 - pas de bavures
- Désavantages
 - coûts du système électrique
 - coûts de traitement de l'électrolyte

Variantes du procédé électrochimique

Ébavurage électrochimique

FIGURE 26.6
Electrochemical deburring
(ECD).



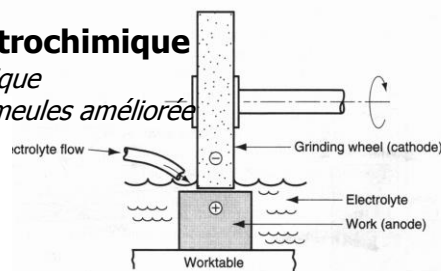
Rectification électrochimique

95% de coupe par procédé électrochimique

5 % rectification ordinaire, --> vie des meules améliorée

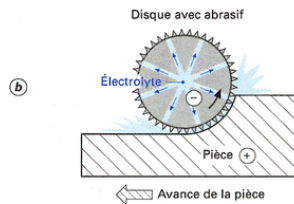
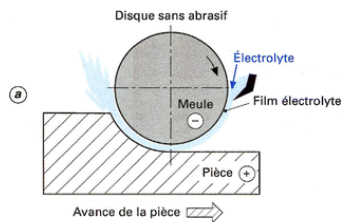
Applications

aiguiser les outils de coupe
rectifier les aiguilles chirurgicales
usiner des tôles et tubes minces
usiner des pièces fragiles

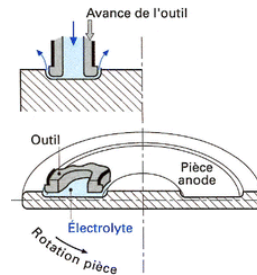


Source: Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing, John Wiley & Sons, 2002

Variantes du procédé électrochimique



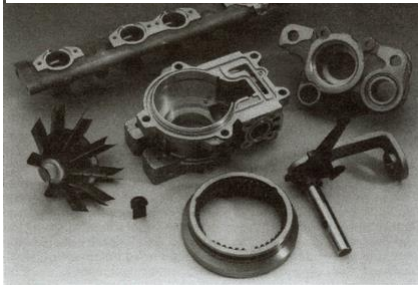
Rectification électrochimique



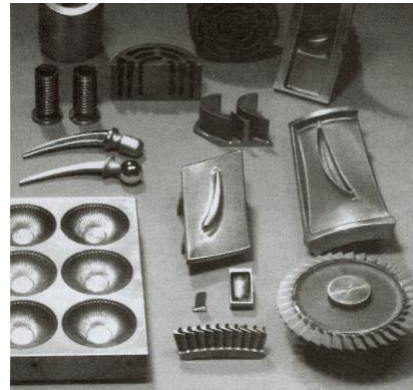
Tournage électrochimique

Référence B7270 | Date de publication : 10 mai 1996 | Pierre LECHERVY

Exemples de pièces obtenues par procédé électrochimique



Exemples de **pièces ébavurées par ECM**
(doc. Dubuis)



Exemples de **pièces usinées par ECM**
(doc. AEG-Elotherm)

Avantages et inconvénients de l'usinage électrochimique

Avantages :

- l'usinage de tout matériau conducteur (aciers ordinaires et inoxydables, alliages réfractaires à base de nickel ou cobalt, alliages à base de titane, matériaux frittés, etc.), quel que soit leur état de traitement métallurgique ;
- un usinage surfacique avec une vitesse de pénétration importante tout en permettant l'obtention d'un état de surface de finition sans perturbations métallurgiques ;
- l'absence d'opération d'ébauche ;
- la reproduction de formes complexes ;
- le perçage avec des rapports profondeur/diamètre très importants (< 200) ;
- l'usinage de parois minces par usinage simultané des deux côtés de la pièce, par exemple pour les aubes de turbomachines ;
- l'absence d'usure de l'outil ;
- un contrôle aisé des paramètres de l'usinage permettant une grande reproductibilité.

Les inconvénients relatifs :

- aux problèmes de corrosion ;
- aux difficultés inhérentes à l'électrolyte ;
- à l'existence de pressions hydrauliques élevées (inférieures à 25 bar) ;
- aux études et à la mise au point de(s) l'outil(s).

Usinage électrochimique: Remarques et applications

Remarques

- Usinage sans échauffement du métal.
- Obtention de surfaces complexes.
- Usinage de matériaux durs, traités ou réfractaires et conducteurs.
- Usure nulle de l'outil.
- Bon état de surface sans trace d'outil.
- Débit important de métal usiné (5 à 10 fois celui de l'électroérosion).
- Le déplacement de l'électrode-outil n'est pas asservi.
- La précision d'usinage reste faible.
- Forme de l'électrode difficile à déterminer pour certains usinages.

Applications

- Rectification plane ou cylindrique.
- Ebauche de matrices ou moules, ébavurage, affûtage.
- Possibilités : précision 0,01 mm en rectification et 0,1 mm en défonceage.

Comparaison usinage Electrochimique vs Electroérosion

	Rugosité Ra (μm)	Précision dimensionnelle (mm)	Usure de l'électrode	Débit maxi de matière (cm^3/min)	Puissance absorbée (W par cm^3/min)
Electroérosion	0.2 à 0.4	0.01 à 0.02	oui	4.8	1700
Electrochimique	0.1	0.05	non	16	7150

Comparaison des 2 procédés pour un travail de défonçage

Avantages de l'électrochimie sur l'électroérosion

- Débit de matière 3 à 4 fois supérieur.
- Pas d'opération d'ébauche ni de demi-finition.
- Suppression totale de l'usure de l'outil.

Inconvénients de l'électrochimie sur l'électroérosion

- La puissance consommée pour enlever un cm^3 de métal est 2 à 3 fois supérieur.
- La précision maximale est de 0.05 mm (à cause du phénomène d'érosion).
- La pression importante de l'électrolyte tend à écarter la pièce de l'outil et à les déformer s'ils ne sont pas suffisamment rigides.

Usinage électrochimique



Centre d'Applications et d'essais Français

Avantage usinage Électrochimique

L'usinage Électrochimique apporte des solutions d'applications jusqu'alors irréalisables d'un point de vue technique ou en termes de rentabilité :

- Aucune usure d'électrode (outil).
- Aucune incidence thermique sur la structure métallique. (Température du processus entre 20 – 50°C)
- Aucun risque de micro- fissure - Pas de surface blanche.
- Vitesse d'usinage de 0,1 à 2 mm/min. (10 fois plus rapide que l'électro érosion à enfonçage)
- Réalisation de formes complexes irréalisables par un autre procédé.
- Les qualités de surface de l'électrode sont reproduites à valeur identique.
- Rugosité pouvant atteindre Ra 0,03µm.
- Pas de contrainte mécanique sur la pièce.

Exemple d'usinage Électrochimique

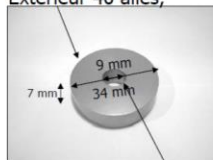
Exemples d'application :



Ailettes de turbine

- ❑ Double ailette de turbine, utilisée dans les outils pneumatiques manuels
- ❑ Fabrication précise de géométrie d'aile complexe avec des épaisseurs de paroi entre 0,16 et 0,79 mm
- ❑ Profondeur d'érosion 5 mm
- ❑ $I = 1000 \text{ A}$, vitesse d'avance 0,12 mm/min
- ❑ Rugosité de surface $< 0,2 \mu\text{m}$
- ❑ Temps d'usinage 42 min

Extérieur 40 ailes,



S.MICHEL

intérieur 16 ailes



Électrode laiton 13

Comparaison de l'ECM par rapport à d'autres procédés d'usinage

Caractéristiques	ECM	Électro-érosion EDM	Enlèvement mécanique de matière	Usinage chimique UC	Usinage ultrasons US
Matériau :					
métallique conducteur électrique	oui	oui	oui	oui	difficile
composite non conducteur électrique	non	non	oui	non	non
céramique non conducteur électrique	non	non	oui	non	oui
taux d'usinabilité	sans influence	sans influence	très influent	sans influence	influent
Usinage :					
surface gauche	surfactive	surfactive	linéaire	surfactive	surfactive/linéaire
ébavurage peu accessible	oui	non	non	non	non
contournage/trépanage	oui	oui	oui	non	oui
perçage { cylindrique de forme	oui	oui	oui	oui	oui
	oui	oui	non	oui	oui
rapport profondeur/diamètre	200	10 à 20	10 à 20	2	5 à 10
diamètre minimal	0,15	0,05	suivant matériaux	[1]	0,5
tournage	oui	oui	oui	non	non
cycle : ébauche + finition	non	oui	oui	non	non/oui [2]
Outil :					
spécifique	oui	oui	non	masque	oui
consommable	non	oui	oui	oui	oui
Contrainte de surface	sans	[3]	compression	sans	peu de compression
État de surface Ra (µm)	0,6	< 0,6	< 0,6	0,8	< 0,6
Influence du Ra sur le temps d'usinage	sans	très importante	importante	sans	peu

- [1] - suivant applications et techniques de masquage.
- [2] - suivant la technologie d'usinage.
- [3] - ZAT : zone affectée thermiquement.

Système d'ébavurage Électrolytique de petites pièces et de prototypes



Vol. II - Septembre 2005 - TRAMETAL

Usinage par électroérosion

Machines actuelles pour électroérosion



***Machine d'électroérosion
à électrode rotative
Vollmer pour la
production d'outils PCD***

Vol. II - Septembre 2005 - TRAMETAL

Machines actuelles pour électroérosion



Machine à percer par électroérosion TOP EDM, spécialement conçue pour les applications aéronautiques et spatiales.

Vol. II - Septembre 2005 - TRAMETAL

Usinage par électroérosion: EDM

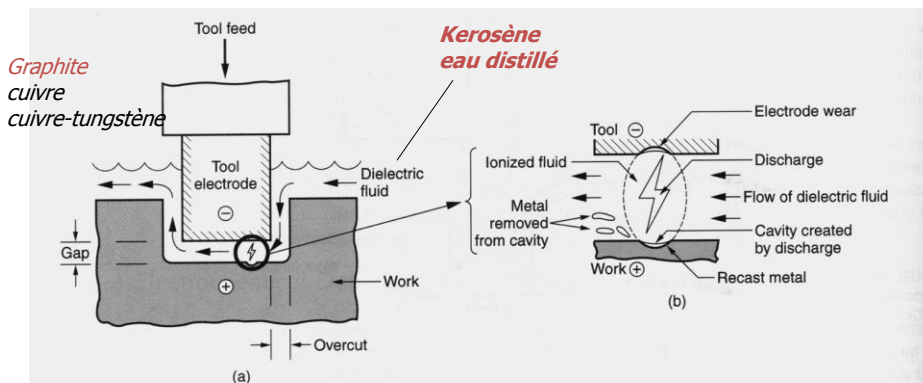


FIGURE 26.8 Electric discharge machining (EDM): (a) overall setup, and (b) close-up view of gap, showing discharge and metal removal.

Des décharges électriques (étincelles) produisent des T° très élevées qui fondent ou évaporent le métal au voisinage de l'électrode.

Pas de contact: duréte de la pièce n'influence pas la coupe

Source: Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing, John Wiley & Sons, 2002

Usinage par électroérosion: EDM

- 2 variantes
 - L'électroérosion avec électrode : EDM
 - L'électroérosion à fil : Wire EDM
- Applications
 - Matrices et moules de forgeage, extrusion, moulage par injection, d'estampage, etc..
 - Pièces minces
 - Perçage des trous à axe non perpendiculaire à une surface plane.
 - Usinage des matériaux conducteurs durs.

U. par électroérosion à fil:

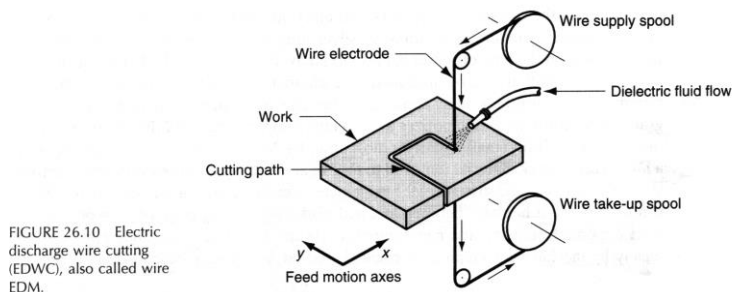
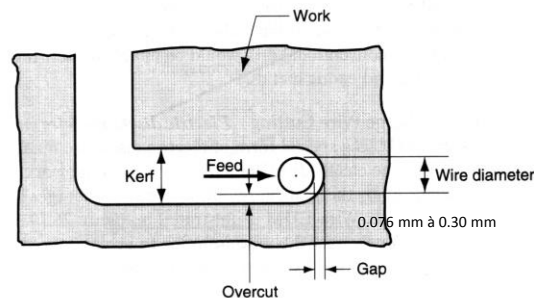


FIGURE 26.10 Electric discharge wire cutting (EDWC), also called wire EDM.

FIGURE 26.11 Definition of kerf and overcut in electric discharge wire cutting.



Source: Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing, John Wiley & Sons, 2002

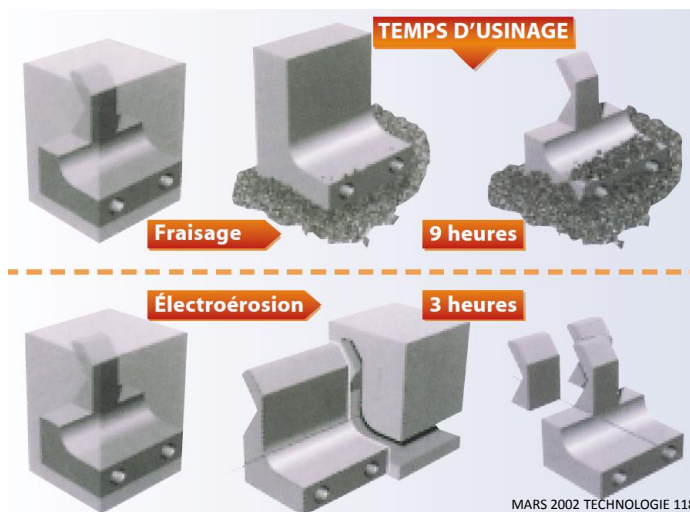
Caractéristique de l'usinage :

- Usinage sans déformation (faible dimension, pas de contact pièce-outil) ;
- Usinage de métaux durs, traités ou réfractaires ;
- Précision de l'ordre de 0.01 mm jusqu'à 2 μm en finition. ;
- Reproduction automatique de forme ;
- Obtention de surfaces complexes ;
- Usure de l'électrode (difficile à contrôler) ;
- Limité aux matériaux conducteurs et aux formes démoulables ;
- Débit maximal de copeaux: ébauche ($5\text{cm}^3/\text{min}$) et finition ($0.05\text{cm}^3/\text{min}$).

Applications

- Usinage de matrices de forge et moule de fonderie.
- Découpage au fil (contour de pièces, analogie avec scie à ruban).
- Moyens pratiquement réservés à l'obtention d'outillage.

Électroérosion vs Fraisage conventionnel



En partant d'un même bloc de métal, on obtient la pièce prismatique **trois fois plus vite en électroérosion, et sans copeaux**

Usinages LASER

Usinages LASER (Light Amplificated by Stimulated Emission of Radiation):

- découpe jusqu'à 10mm d'épaisseur maxi.
- puissance de 20 à 25kW dans l'industrie (contre quelques mW dans le médical).
- Possibilité d'usiner dans des zones difficiles d'accès.
- soudage de matériaux différents.
- mauvais rendement (20%).
- nécessite des protections importantes.

4 applications principales:

- le soudage.
- le découpage.
- le traitement de surface.
- le marquage (identification de pièces...).

Usinages par faisceau d'électrons

Usinages par faisceau d'électrons: (vitesse: 2/3 de la vitesse de la lumière)

Avantages:

- outil immatériel, inusable et facilement réglable.
- soudures de qualité avec des joints étroits.
- faibles déformations (économie de matière).
- soudage de matériaux facilement oxydables (car sous vide).
- soudage d'épaisseurs importantes: 250mm maxi.
- bonnes conditions de travail (pas de bruits ni fumées).
- soudure de matériaux différents.

Inconvénients:

- faire un vide poussé: 10^{-2} à 10^{-4} Torr; 1Torr = 1mm de Hg.
- émission de rayons X (enceinte en acier ou en plomb).
- faisceau sensible à E et B déviation du faisceau (on ne peut pas souder de plastiques).

Usinage chimique

Sequence des opérations

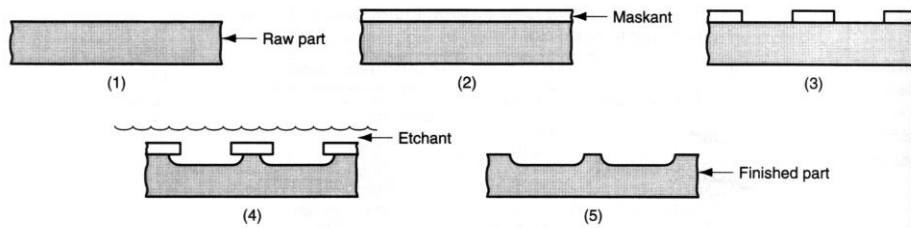


FIGURE 26.17 Sequence of processing steps in chemical milling: (1) clean raw part; (2) apply maskant; (3) scribe, cut, and peel the maskant from areas to be etched; (4) etch; and (5) remove maskant and clean to yield finished part.

Source: Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, John Wiley & Sons, 2002

Etat de surface en usinage chimique

TABLE 26.3 Surface finishes expected in chemical milling.

Work Material	Surface Finish Range	
	μm	$\mu\text{-in.}$
Aluminum and alloys	1.8–4.1	(70–160)
Magnesium	0.8–1.8	(30–70)
Mild steel	0.8–6.4	(30–250)
Titanium and alloys	0.4–2.5	(15–100)

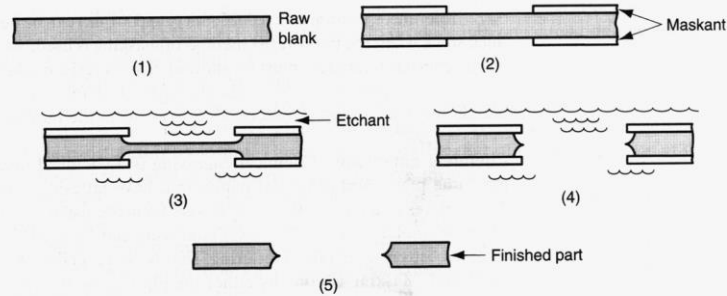
Compiled from [5] and [13].

Rms: Root mean square

Source: Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, John Wiley & Sons, 2002

Utilisation d'usinage chimique pour découper les pièces minces avec forme particulière

FIGURE 26.18 Sequence of processing steps in chemical blanking: (1) clean raw part, (2) apply resist (maskant) by painting through screen, (3) etch (partially completed), (4) etch (completed), and (5) remove resist and clean to yield finished part.

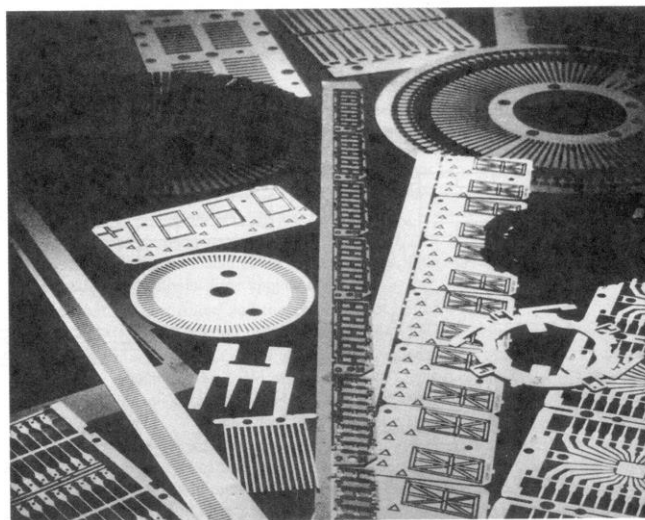


Épaisseur aussi petite que 0.025 mm (0.001 in)
Tolérances ± 0.0025 mm (1/10000 in)

Source: Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing, John Wiley & Sons, 2002

Utilisation d'usinage chimique pour les pièces minces

FIGURE 26.19 Parts made by chemical blanking (courtesy Buckbee-Mears St. Paul).



Source: Groover, Fundamentals of Modern Manufacturing, John Wiley & Sons, 2002

Comparaison des procédés

TABLE 26.4 Applicability of selected nontraditional machining processes to various work materials. For comparison, conventional milling and grinding are included in the compilation.

Work Material	Nontraditional Processes								Conventional Processes	
	Mech	Elec	Thermal			Chem			Milling	Grinding
	USM	WJC	ECM	EDM	EBM	LBM	PAC	CHM		
Aluminum	C	C	B	B	B	B	A	A	A	A
Steel	B	D	A	A	B	B	A	A	A	A
Super alloys	C	D	A	A	B	B	A	B	B	B
Ceramic	A	D	D	D	A	A	D	C	D	C
Glass	A	D	D	D	B	B	D	B	D	C
Silicon ^a			D	D	B	B	D	B	D	B
Plastics	B	B	D	D	B	B	D	C	B	C
Cardboard ^b	D	A	D	D			D	D	D	D
Textiles ^c	D	A	D	D			D	D	D	D

Compiled from [13] and other sources.

Key: A = good application, B = fair application, C = poor application, D = not applicable, and blank entries indicate no data available during compilation.

^aRefers to silicon used in fabricating integrated circuit chips.

^bIncludes other paper products.

^cIncludes felt, leather, and similar materials.

Source: Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, John Wiley & Sons, 2002

Géométries spéciales nécessitant les procédés non traditionnels

*Très petit diamètres
 $d < 0.125 \text{ mm}$*

*L/d très élevé
($L/d > 20$)*

Trou non rond

Rainure courbée

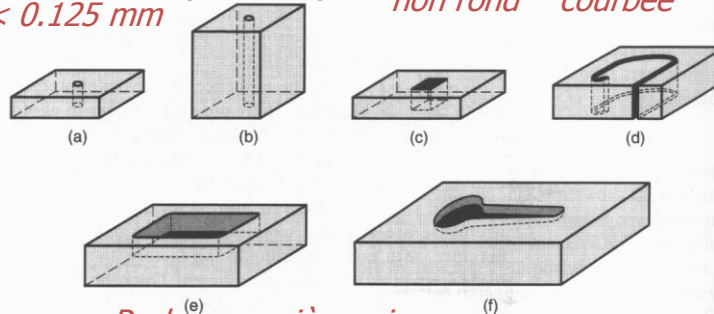


FIGURE 26.21 Special shapes for which the non-traditional machining processes are appropriate: (a) very small diameter holes; (b) holes with large depth-to-diameter ratios; (c) non-round holes; (d) narrow, non-straight slots; (e) pockets; and (f) die-sinking.

*Poches sur pièce mince
ou très de matériaux durcis
et contours spéciaux pour les moules*

Source: Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing*, John Wiley & Sons, 2002