RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ Dr YAHIA FARES DE MÉDÉA

FACULTÉ DE LA TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DU GÉNIE MÉCANIQUE

Mémoire de Fin d'Études

Pour l'obtention du diplôme de Master

En **Génie Mécanique**

Option : **Construction Mécanique**

Thème

Etude expérimental de perçage des trous tourbulaires par procédé d'usinage non conventionnel

PrésentéPar :

GUETTOUCHE Abdelhak

Proposé et dirigépar :

PR. ABDELLAH ELHADJ .A

Promotion2018/2019

Dédicace

Je dédie ce fruit d'étude aux plus chères au monde :

A la mémoire de mon père qui nous a quittés.

A ma mère pour son soutien.

A ma femmequi a été à mes côtés.

A mes enfants.

A toute Ma famille et mes amis Sans exception

GUETTOUCHE Abdelhak

Remerciements

La réalisation de ce travail de recherche n'aurait pas été possible sans l'aide apportée par une multitude de gens passionnés, patients et aimants.

D'abord, je tiens à remercier le professeur ***ABDELLAH ELHADJ .A*** *pour m'avoir permis de réaliser ce projet, pour sa patience et pour sa compréhension et pour son soutien constant au cours de cette année.*

Enfin nos remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement et la réalisation de ce travail.

Merci...

Table des matières

Dédicace…….. I.
Remerciements…….. II.
Résumé …….. III.
Liste des figures…….. IV.
Liste des symboles…….. V.
Table des matières …….. VI.
Introduction…….. VII.

CHAPITRE 1 Champ d'application

1.1 Introduction…….. 2
1.2 Présentation d'un turboréacteur avec turbine refroidie…….. 3
1.3 Elaboration des pales…….. 5
1.4 Refroidissement interne de la pale…….. 6
1.5 OBJECTIFS…….. 8

CHAPITRE 2 l'Usinage non conventionnel

2.1 Introduction…….. 11
2.2 Classification de l'usinage non conventionnel…….. 11
2.3 Jet d'eau et jet d'eau abrasif…….. 13
2.3.1 Paramètres…….. 14
2.3.2 Avantage …….. 14
2.3.3 Inconvénients …….. 14
2.3.4 Utilisations …….. 15
2.4 Jet d'eau…….. 16
2.4.1 Jet d'eau pure …….. 16
2.5 Usinage avec jet abrasif…….. 17
2.5.1 Jet d'eau abrasif…….. 17
2.5.2 Applications …….. 17
2.5.3 Paramètres…….. 18
2.5.4 Système d'injection pour usinage par jet d'eau abrasif…….. 19
2.6 Usinage ultrasonique…….. 20
2.6.1 Performances de l'usinage ultrasonique…….. 24

2.7 Usinage électrochimique…….. 25
2.7.1 Applications …… 26
2.7.2 Avantages…….. 27
2.7.3 Inconvénients…… 27
2.7.4 Exemples d'usinage électrochimique…… 28
2.7.5 Exemples de pièces obtenues par procédé électrochimique…….. 30
2.8 Usinage par électroérosion…….. 31
2.8.1 Caractéristiques de l'usinage …….. 31
2.8.2 Applications…….. 32
2.9 AUTRES PROCEDES…….. 33
2.9.1 Usinage LASER…… 33
2.9.2 Usinage par faisceau d'électrons…….. 33
2.10 Géométries spéciales nécessitant les procédés non conventionnels 34

Chapitre 3 Perçage Électrochimique

3.1 Introduction…… 36
3.2 Principe de l'E.C.D…….. 37
3.3 Description des paramètres de processus…….. 37
3.4 Résistance à la fissuration…….. 38
3.4.1 L'étendue de la fissure…….. 38
3.4.2 La concentration de l'électrolyte…… 39
3.4.3 La température de l'électrolyte…….. 39
3.4.4 La vitesse d'alimentation…… 40
3.5 Modélisation physique du l'ECD…….. 41
3.6 Transfert de charge électrique…….. 42
3.7 Distribution de densité de courant…… 43
3.8 Transfert de chaleur dans les solutions électrolytiques…….. 45
3.9 Formation de gaz…… 46

Chapitre 4 Processus d'E.C.D

4. Introduction du processus d'E.C.D…….. 48
4.1 À propos de la machine ECD…… 50
4.2 Composants de base. …….. 52

4.3 Choix pour les matériaux..... 54
4.4 Outillage..... 54
4.5 Règles de base pour la conception. 55
4.6 Matériaux. 55
4.7 Perçage des pales. 55
4.7.1 Conditions des pales. 56
4.7.2 Contrôle CMM. 56
4.8 Processus. 56
4.9 Contrôle des acides. 57
4.10 Contrôle des Trous. 58
4.11 Tubulaire..... 58
4.12 Contrôle des cathodes. 59
4.13 Feuille de programme trous droits. 60
4.14 Fiche de programme Trous de turbulateurs..... 61
4.15 Qualification..... 62
4.15.1 Première étape..... 62
4.15.2 Deuxième étape..... 64
4.15.3 Troisième étape..... 64
4.16 Inspection..... 64
4.16.1 Radiographie..... 64
4.16.2 Épaisseur de la paroi..... 64
4.16.3 Dimension du trou..... 65
4.16.4 Connexion des trous supérieur et inférieur..... 65
4.17 Feuilles de fabrication d'inspection..... 66
4.18 Fiche qualité..... 68
Conclusion général..... 69
Références bibliographiques..... 70

Liste des figures

Figure 1.1 Une turbine d'un moteur d'avion……..2
Figure 1.2 Schéma d'un turboréacteur et photo d'une aube de turbine refroidie……. ….. 4
Figure 1.3 – Principe du procédé de fonderie par solidification dirigée……..6
Figure 1.4 Pale de turbine avec trous de refroidissement…….. 7
Figure 2.1 Schéma de principe…… ….. 13
Figure 2.2 Découpe jet eau…… 16
Figure 2.3 Figure 2.3 Jet d'eau abrasif…….. 17
Figure 2.4 Système d'injection…….. 19
Figure 2.5 Principe de l'abrasion ultrasonore…….. 20
Figure 2.6Principe de l'abrasion ultrasonore…….. 21
Figure 2.7 Sonotrode……22
Figure 2.8 Machine d'usinage à ultrasons……..23
Figure 2.9 Vitesse de pénétration en fonction de la dimension des grains (usinage du verre)……24
Figure 2.10Qualité de surface en fonction de la dimension des grains pour différents matériaux……24
Figure 2.11 Quelques exemples…….. 25
Figure 2.12 usinage électro chimique ECM……26
Figure 2.13 perçage électro chimique EDM……28
Figure 2.14Rectification électrochimique……29
Figure 2.15Rectification électrochimique……29
Figure 2.16Tournage électrochimique……29
Figure 2.17Usinage à l'électroérosion à l'électrode……31
Figure 2.18Usinage à l'électroérosion à fil……32
Figure 2.19 Géométries spéciales……34
Figure 3.1. Processus de perçage électrochimique……41
Figure 3.2. Champ induit par polarisation au sommet de la cathode……43
Figure 3.3. Conductivité de la solution H2S04 (17%)……44
Figure 3.4. Recirculation de l'électrolyte……45
Figure 4.1 électrolyte……49
Figure 4.2 : Ecran de commande et d'affichage……50

Figure 4.5 : Machine ECD model LAZPIUR……51
Figure 4.6 : Machine ECD model EMAG CS800……52
Figure4.7 Composants de base……53
Figure 4.8 Composants de base……53
Figure 4.9 Outillage de perçage……54
Figure 4.10: Une pale sur machine de contrôle CMM……56
Figure 4.11 Coin de contrôle d'acide……57
Figure 4.12: Trous tubulaires par procédé ECD……58
Figure 4.13 Machine à papier abrasif imperméable……59
Figure 4.14 Redressement des électrodes……59
Figure 4.15 Pale sans coupe……62
Figure 4.16 1er coupe contrôle de diamètres……62
Figure 4.17 2eme coupe contrôle de connexion……63
Figure 4.18 3eme coupe contrôle du coté opposé……63
Figure 4.19 Épaisseur de la paroi est bonne……65

LISTE DES SYMBOLES

Les vecteurs sont imprimés en caractères gras.

Symboles romains

c	Vitesse du son	[m s^{-1}]
c_p	Chaleur spécifique	[J kg^{-1} K^{-1}]
e	Fréquence équivalente électrochimique	[kg $Coulomb^{-1}$]
f	Force du corps	[Hz]
$\mathbf{f}$	Energie cinétique par unité de masse	[kg m s^{-2}]
k	Longueur de mélange	[m^2 s^{-2}]
ℓ_m	Pas de turbulateur	[m]
ℓ	Indice de périodicité	[m]
n	Pression	[–]
p	Pression réduite	[Pa]
p_r	Pression modifiée	[Pa]
p_m	Flux de chaleur	[Pa]
$\mathbf{q}$	Vitesse de perçage	[W m^{-2}]
s	Temps	[m s^{-1}]
t	Rapidité	[s]
$\mathbf{u}$	Vecteur de position	[m s^{-1}]
$\mathbf{x}$	Nombre d'électrons	[m]
z	Masse molaire	[–]
A	Van driest amortissant constamment	[kg mol^{-1}]
A^+	Coefficient de fermeture	[–]
$\mathcal{A}_T$	Coefficient de fermeture	[–]
$C_{\varepsilon 1}$	Coefficient de fermeture	[–]
$C_{\varepsilon 2}$	Taux de tension tenseur	[–]
C_μ	Diamètre hydraulique	[–]
D	Force de champ électrique	[s^{-1}]
D_h	Diamètre hydraulique	[m]
$\mathbf{E}$	Force de champ électrique	[Volt m]

Symboles grecs

α	Coefficient de transfert de chaleur	$[\mathrm{W\ m^{-2}\ K^{-1}}]$
β	Paramètre de chute de pression	$[\mathrm{Pa\ m^{-1}}]$
γ	Paramètre d'élévation de température	$[\mathrm{K\ m^{-1}}]$
θ	Température mesurée	$[-]$
λ	Conductivité thermique	$[\mathrm{W\ m^{-1}\ K^{-1}}]$
ε	Dissipation par unité de masse	$[\mathrm{m^2\ s^{-3}}]$
η	Viscosité dynamique	$[\mathrm{kg\ m^{-1}\ s^{-1}}]$
κ	Constante de kármán	$[-]$
κ_e	Conductivité électrolytique	$[\mathrm{Ohm^{-1}\ m^{-1}}]$
ν	V viscosité cinématique	$[\mathrm{m^2\ s^{-1}}]$
ν_t	Viscosité cinématique de foucault	$[\mathrm{m^2\ s^{-1}}]$
ρ	Densité	$[\mathrm{kg\ m^3}]$
σ_k	Coefficient de fermeture	$[-]$
σ_ε	Coefficient de fermeture	$[-]$
ϕ	Potentiel électrique	[Volt]
Φ_v	Débit volumétrique	$[\mathrm{m^3\ s^{-1}}]$
Φ_m	Débit massique	$[\mathrm{kg\ s^{-1}}]$
ω		$[\mathrm{rad\ s^{-1}}]$
Ω		$[-]$
$\delta\Omega$		$[-]$

Résumé

Dans cette mémoire, nous avons étudié un procédé de perçage par ECD « Electro ChemicalDrilling», qui est un procédé sans contact permettant de percer tous les matériaux durs conducteurs d'électricité à l'aide d'une électrode cylindrique faible diamètre et l'acide sulfurique.

Le principe consiste à créer des micro-décharges électriques entre l'électrode et une pièce conductrice. En faisant parcourir à l'électrode un parcours 1D, et de creuser un trou complexe « exp : trous turbulaires ou trous courbé » dans la pièce avec des détails à fort rapport d'aspect.

Nous avons utilisé ce procédé pour réaliser des trous sur une pale de turbine à gaz. On a constaté que la réduction de la concentration entraîne une diminution de la fissure. En plus, l'augmentation de la température de l'électrolyte entraîne une augmentation de la fissure. Finalement, l'augmentation de la vitesse d'alimentation entraîne la diminution de la fissure.

.

Mots clés : ECD, ECM, trou complexe, usinage non conventionnel, usinage electro chimique.

Introduction

Il est connu que dans un écoulement turbulent, le transfert de chaleur est considérablement plus élevé que dans un écoulement laminaire et que, dans le cas de trous turbulents, la surface de contact entre le métal et l'air de refroidissement est également augmentée. Un autre facteur est la quantité d'air de refroidissement nécessaire pour atteindre un certain niveau de transfert de chaleur. Il est clair que pour les trous turbulents, il faut moins d'air de refroidissement que pour les trous à paroi lisse.

Les méthodesd'usinagesconventionnelssontsouventinefficaces de ce type des trouscomplexe, Surtout pour les matériauxdurs, de telles techniques ne conviennent pas. Ilfautdoncrecourir à d'autresmoyens. L'und'euxest de "percer" par électrolyse. C'estune application spécifique de l'ECM (Eletrochemicalmachining). Par conséquent, nous utilisonsl'abréviation E.C.D, dérivée du termeanglais Electro ChemicalDrilling. À l'instar des autresprocessus ECM de la technique ECD, la pièce à usinerestanodisée et uneélectrodespécialementforméeestcathodique.

L'électrodeest un tube creuxdanslequell'électrolytettraversantestcomprimé. L'électrolyteestfabriqué à partir de Titan et possèdeunebarrièred'isolation au niveau de la coucheexterne. La barrière d'isolement est retirée uniquement sur les côtés inférieur et supérieur du tube.

Dans ce mémoire, nous allons utiliser le procédé ECD sur une pale de turbine à gaz en superalliage (à base de Nickel). Nous a organisé le manuscrit comme suit :

- Le chapitre 1 présente une introduction générale sur les turbine à gaz et turboréacteur, le procédé d'obtention d'une pâle de turbine, le système de refroidissement des pâles.

- Le chapitre 2 présente les techniques d'usinage par procédé non conventionnel. Introduction à ces techniques non conventionnelle. La définition de différentes manières avec la mention de certains avantages et

inconvénients, termine par les géométries spéciales nécessitant les procédés non conventionnels.

- La production de conduits de refroidissement des aubes de turbine est abordée dans le Chapitre3. Le processus de perçage électrochimique, les paramètres de processus et Résistance à la fissuration sont modélisés en considérant les processus physiques pertinents impliqués. Le résultat est un problème mathématique de valeur limite. Les effets dus à la rotation de la turbine doivent être pris en compte. Les équations incompressibles, combinées à l'équation d'énergie, donnent un modèle mathématique permettant d'effectuer des calculs de simulations numériques du processus de transfert de chaleur à l'intérieur d'un conduit de refroidissement d'aube de turbine.

- Le dernier chapitre présente le processus ECD (principe de base et les moyens d'utilisation). Nous avons utilisé ce procédé pour réaliser des trous sur une pale de turbine à gaz.

- Finalement, on termine le travail, par une conclusion général.

ملخص

في هذه الأطروحة ، درسنا طريقة الثقب بواسطة التثقيب الكهرو كيميائي، وهي عملية بدون تلامس للمواد تسمح بثقب جميع المواد الصلبة الناقلة للكهرباء، باستخدام قطب كهربائي أسطواني بقطر صغير وحمض الكبريتيك.

المبدأ هو إنشاء شرارات كهربائية صغيرة بين القطب وجزء موصل. عن طريق مسح القطب الكهربائي لمسار ببعد واحد ، وانجاز ثقوب معقدة "مثال: الثقوب التوربينية أو الثقوب الملتوية في قطعة وبابعاد جد دقيقة.

استخدمنا هذه الطريقة لعمل ثقوب على عنفة التوربينات الغازية. لقد وجد أن تقليل التركيز يسبب انخفاضًا في الشقوق. بالإضافة إلى ذلك ، تؤدي الزيادة في درجة حرارة المحلول بالكهرباء إلى زيادة التشقق. أخيرًا ، تؤدي زيادة سرعة التغذية إلى تقليل التصدع.

.

الكلمات الأساسية: ECD، ECM ، ثقب معقد ، تصنيع غير تقليدي ، تصنيع ميكانيكي كهربائي.

ABSTRACT

In this thesis, we studied a method of drilling by ECD "Electro ChemicalDrilling", which is a non-contact process for drilling all hard electrically conductive materials using a small diameter cylindrical electrode and acid sulfuric.

The principle is to create electrical micro-discharges between the electrode and a conductive part. By scanning the electrode for a 1D path, and digging a complex hole "exp: turbular holes or bent holes" in the room with high aspect ratio details.

We used this method to make holes on a gas turbine blade. It has been found that the reduction of the concentration causes a decrease in the crack. In addition, the increase in the temperature of the electrolyte causes an increase in the crack. Finally, the increase of the feeding speed causes the decrease of the crack.

.

Key words: ECD, ECM, complex hole, unconventional machining, electro-chemical machining.

LISTE DES SYMBOLES

Les vecteurs sont imprimés en caractères gras.

Symboles romains

c	Vitesse du son	[m s^{-1}]
c_p	Chaleur spécifique	[J kg^{-1} K^{-1}]
e	Fréquence équivalente électrochimique	[kg $Coulomb^{-1}$]
f	Force du corps	[Hz]
$\mathbf{f}$	Energie cinétique par unité de masse	[kg m s^{-2}]
k	Longueur de mélange	[m^2 s^{-2}]
ℓ_m	Pas de turbulateur	[m]
ℓ	Indice de périodicité	[m]
n	Pression	[−]
p	Pression réduite	[Pa]
p_r	Pression modifiée	[Pa]
p_m	Flux de chaleur	[Pa]
$\mathbf{q}$	Vitesse de perçage	[W m^{-2}]
s	Temps	[m s^{-1}]
t	Rapidité	[s]
$\mathbf{u}$	Vecteur de position	[m s^{-1}]
$\mathbf{x}$	Nombre d'électrons	[m]
z	Masse molaire	[−]
A	Van driest amortissant constamment	[kg mol^{-1}]
A^+	Coefficient de fermeture	[−]
$\mathcal{A}_T$	Coefficient de fermeture	[−]
$C_{\varepsilon 1}$	Coefficient de fermeture	[−]
$C_{\varepsilon 2}$	Taux de tension tenseur	[−]
C_μ	Diamètre hydraulique	[−]
D	Force de champ électrique	[s^{-1}]
D_h	Diamètre hydraulique	[m]
$\mathbf{E}$	Force de champ électrique	[Volt m]

Symboles grecs

α	Coefficient de transfert de chaleur	[W m^{-2} K^{-1}]
β	Paramètre de chute de pression	[Pa m^{-1}]
γ	Paramètre d'élévation de température	[K m^{-1}]
θ	Température mesurée	[–]
λ	Conductivité thermique	[W m^{-1} K^{-1}]
ε	Dissipation par unité de masse	[m^2 s^{-3}]
η	Viscosité dynamique	[kg m^{-1} s^{-1}]
κ	Constante de kármán	[–]
κ_e	Conductivité électrolytique	[Ohm^{-1} m^{-1}]
ν	V viscosité cinématique	[m^2 s^{-1}]
ν_t	Viscosité cinématique de foucault	[m^2 s^{-1}]
ρ	Densité	[kg m^3]
σ_k	Coefficient de fermeture	[–]
σ_ε	Coefficient de fermeture	[–]
ϕ	Potentiel électrique	[Volt]
Φ_v	Débit volumétrique	[m^3 s^{-1}]
Φ_m	Débit massique	[kg s^{-1}]
ω		[rad s^{-1}]
Ω		[–]
$\delta\Omega$		[–]

CHAPITRE 1

Champ D’application

1.1 Introduction

Les turbines à gaz jouent un rôle important dans les applications aéronautiques et industrielles. Il existe une tendance croissante à utiliser des températures plus élevées à l'entrée de la turbine pour améliorer l'efficacité du moteur à turbine à gaz. En conséquence, la charge thermique sur les composants de la turbine augmente, en particulier dans la section de turbine à haute pression. Cette charge thermique est causée par l'exposition à un énorme flux de chaleur provenant des gaz brûlés provenant de la chambre de combustion. En conséquence, la durée de vie d'une pale peut être considérablement réduite. Afin de respecter les normes de sécurité modernes, les aubes des turbines à gaz doivent être refroidies. Cela ne s'applique pas seulement aux turbines à gaz industrielles fixes, mais également aux moteurs d'avion.

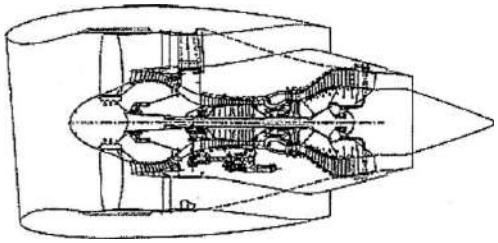


Figure 1.1 Une turbine d'un moteur d'avion

Les méthodes de protection introduites pour prolonger la durée de vie des aubes de turbine sont le revêtement, le refroidissement interne et le refroidissement par film. En recouvrant la surface d'un revêtement thermiquement isolant, la pale peut être protégée de son environnement. Dans le refroidissement par film, l'air de refroidissement est dirigé vers la surface de l'aube et sort du conduit de refroidissement par le bord d'attaque de l'aube. L'objectif principal du refroidissement des aubes de turbine est généralement d'atteindre des coefficients de transfert de chaleur maximum minimiser le débit de liquide de refroidissement. Dans cette mémoire, nous allons nous concentrer uniquement sur le refroidissement interne.

1.2 Présentation d'un turboréacteur avec turbine refroidie

Un turbo réacteur est une machine thermodynamique basée sur le cycle de Brayton, servant à la propulsion des aéronefs. Comme on peut le voir FIGURE 1.2, il est composé d'un compresseur, d'une chambre de combustion et d'une turbine qui sont traversés en continu par un flux d'air. Sur la plupart des turboréacteurs récents, le compresseur et la turbine sont chacun divises en une partie basse pression et une partie haute pression, afin d'améliorer le rendement du moteur. On parle alors de turboréacteur à double corps.

La turbine haute pression est située juste en sortie de la chambre de combustion. Elle est généralement composée d'un ou deux étages, chaque étage étant lui-même compose d'un stator puis d'un rotor. Le rotor consiste en un disque métallique auquel sont attachées des aubes. Lebas de l'aube (ou pied d'aube), est usiné selon une forme dite en ≪pied de sapin ≫et sert d'attache avec le disque de turbine. La partie en contact avec les gaz chauds est appelée ≪la pale ≫et la zone plate entre la pale et le pied se nomme la ≪plateforme ≫. La pale étant similaire a une aile d'avion, on emploi la même terminologie. On parle ainsi de bord d'attaque pour la partie de l'aube en amont de l'écoulement et de bord de fuite pour la partie en aval.

Un des points dimensionnant d'un turboréacteur est la température de l'air en entrée de la turbine haute pression. C'est notamment l'augmentation continue de cette température depuis l'apparition des premiers turboréacteurs dans les années 1930, qui a permis l'amélioration considérable du rendement des moteurs.

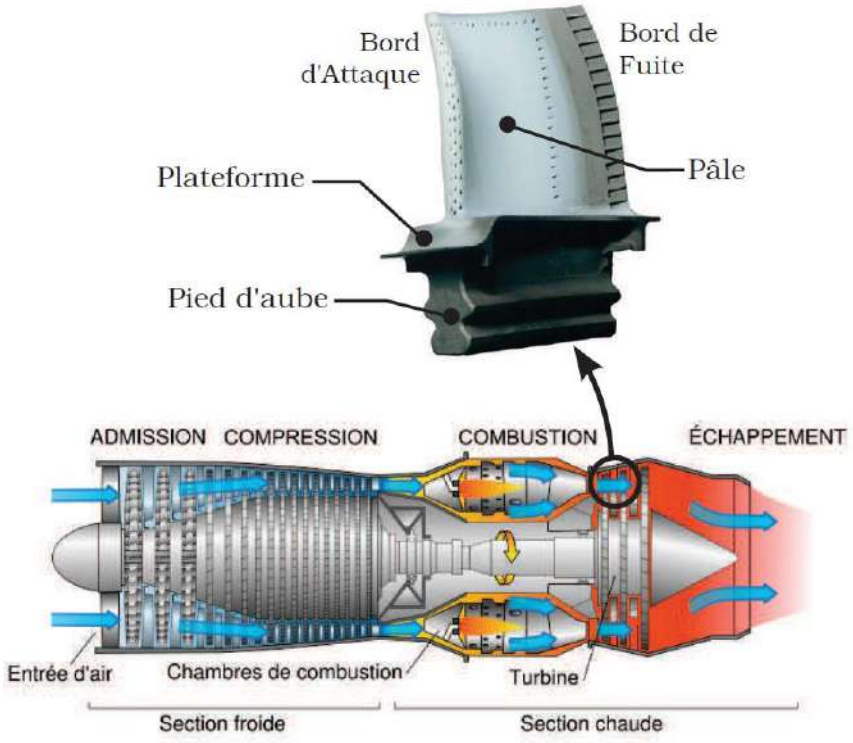


FIGURE 1.2 – Schéma d'un turboréacteur et photo d'une aube de turbine refroidie.

Cette température peut atteindre 1850°K, soit au-dessus de la température de fusion de bon nombre de matériaux. Afin de diminuer la température du métal, les aubes de turbine haute pression sont refroidies par de l'air ≪ froid ≫, prélevé en sortie du compresseur.

L'air de refroidissement circule à l'intérieur de l'aube par un réseau complexe de canaux, alimentés par le pied d'aube. L'air s'échappe de l'aube par des fentes en bord de fuite, ainsi que par des trous de refroidissement placés dans les zones les plus chaudes de l'aube. Une série de trous de refroidissement est notamment percée en bord d'attaque sur toute la hauteur de la pale. Leur rôle est de refroidir cette zone impactée par les gaz chauds provenant de la chambre de combustion.

De plus, l'air s'échappant par ces perforations forme un film d'air plus froid autour de la pale. Cette technologie est appelée≪ film cooling ≫. Sur les turboréacteurs de dernière génération, la pale est également revêtue par une céramique appelée barrière thermique, afin de l'isoler thermiquement des gaz chauds.

En plus des hautes températures auxquelles elles sont soumises, les aubes de turbine subissent, entre autre, un effort centrifuge causé par la rotation du disque autour de l'arbre moteur.
Les cycles d'utilisation du moteur (allumage, décollage, croisière, ...) étant par ailleurs variables, les contraintes et températures vues par la pièce varient au cours du vol. C'est particulièrement vrai dans le cas des moteurs militaires, où la puissance demandée lors des phases de combat varie de manière rapide.

1.3 Elaboration des pales

La pale est fabriquée selon le procédé de fonderie par cire perdue. Dans une première étape, de la cire liquide est injectée dans une matrice d'injection. La matrice est en fait un outillage métallique dans lequel on vient positionner une pièce appelée ≪ noyau ≫.

Ce noyau est fabriquée à base de matière minérale, la cire se solidifie et forme une grappe de modèles de la pièce en cire.

La grappe est ensuite enrobée d'un matériau réfractaire pour former une carapace. Une étape de décirage permet d'éliminer les modèles en cire et de ne laisser que le moule réfractaire et le noyau. Le métal est alors coulé dans le moule selon un procédé de fonderie par solidification dirigée, dans un four de type ≪ Bridgman ≫ (FIGURE 1.3). Ce four est composé de deux parties.

Dans la partie basse du four, se trouve une sole mobile refroidie où repose le moule de fonderie.

La partie haute du four est, elle, chauffée par des résistances. A l'interface entre les zones chaudes et froides, se trouve un écran thermique censé favoriser le gradient thermique au niveau du front de solidification. La partie du moule en contact avec la sole refroidie comprend un sélecteur de grain favorisant la croissance d'un unique grain. Le déplacement progressif du moule dans le four fait croitre le grain pour former la pièce.

Après solidification, le moule céramique est éliminé de manière mécanique et le noyau est éliminé chimiquement.

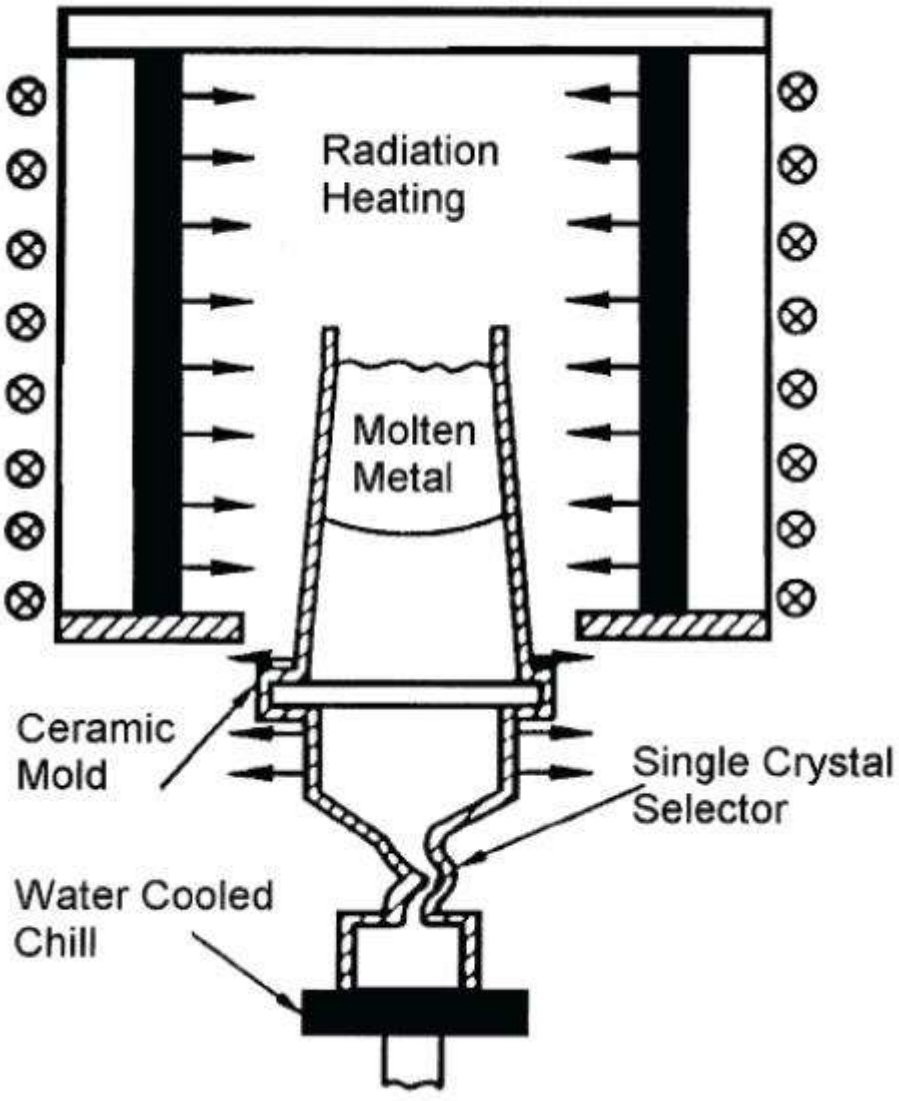


FIGURE 1.3 – Principe du procédé de fonderie par solidification dirigée

1.4 Refroidissement interne de la pale

Deux méthodes sont actuellement utilisées pour obtenir un refroidissement interne. Les deux méthodes sont basées sur le principe suivant: l'air de refroidissement est acheminé à travers des passages turbulents dans l'aube et évacue ainsi de manière convective la chaleur de l'aube. L'air de refroidissement est ensuite éjecté soit à l'extrémité de l'aube, par des fentes de refroidissement situées le long du bord de fuite ou par des trous de refroidissement situés le long de la surface de l'aube. Les pales sont en superalliage à très haute température de fusion. En utilisant la méthode de la cire perdue, ces cavités sont moulées. Avec cette technique, il est possible de produire des cavités en forme de serpentin. L'autre méthode utilise le forage pour fournir aux lames des trous de refroidissement. Ces trous sont placés dans le sens de l'envergure des aubes de la turbine. Dans les deux cas, les parois du passage ont des surfaces côtelées

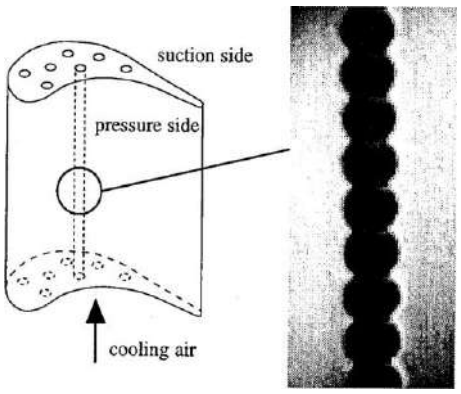


Figure 1.4 Pale de turbine avec trous de refroidissement

Ces nervures sont appelées promoteurs de turbulence ou turbulateurs (voir figure 1.3). Bien que la technique de moulage ait été considérablement améliorée au fil des ans, il est toujours très difficile de mouler des cavités dans de grandes pièces, telles que les aubes de turbine des premier et deuxième étages des turbines à gaz industrielles dans la plage de puissance plus élevée. Par conséquent, les lames avec des trous longitudinaux sont produites en utilisant la technique de perçage.

Étant donné que les trous ont une forme complexe et que leur diamètre n'est que de quelques millimètres, les techniques de perçage classiques ne conviennent pas. De plus, la surface du trou doit être striée et le matériau est très dur. On utilise donc une technique de perçage électrochimique (ECD): on utilise un procédé électrolytique dans lequel une anode se déplace progressivement dans le métal. Dans cette thèse, nous allons également modéliser cette technique ECD pour la production des trous de refroidissement.

1.5 OBJECTIFS

Le perçage des trous de refroidissement nécessite un grand nombre d'essais bien définis sur des éprouvettes très onéreuses. La simulation informatique du processus de l'ECD peut réduire le nombre d'essais. Les turbulateurs sont souvent soumis à des contraintes géométriques, dues aux limitations de perçage associées à de petites dimensions. Des problèmes tels que les imperfections du turbulateur et les variations de tolérance de perçage modifient les profils du turbulateur dans leur forme finale. Ce changement de géométrie du turbulateur affecte, parfois avec des conséquences indésirables, le coefficient de transfert de chaleur dans la cavité de refroidissement.

Ici, un problème de conception ou d'ingénierie intéressant se pose. Comment la forme et la répartition des turbulateurs influencent-elles le transfert de chaleur global? Bien qu'il ne soit pas possible de produire des turbulateurs de forme arbitraire avec la technique ECD, certains turbulateurs essentiellement différents peuvent être fabriqués. Outre la question de savoir comment un passage de refroidissement devrait être turbulé, il est également intéressant de savoir quel est le gain de transfert de chaleur par rapport aux trous de refroidissement sans turbulateurs. Il est connu que dans un écoulement turbulent, le transfert de chaleur est considérablement plus élevé que dans un écoulement laminaire et que, dans le cas de trous turbulents, la surface de contact entre le métal et l'air de refroidissement est également augmentée. Un autre facteur est la quantité d'air de refroidissement nécessaire pour atteindre un certain niveau de transfert de chaleur. Il est clair que pour les trous turbulents, il faut moins d'air de refroidissement que pour les trous à paroi lisse.

Les normes internationales prescrivent que chaque aube de turbine produite doit comporter un certificat d'approbation ainsi que des rayons X afin de révéler la qualité de l'intérieur de l'aube. On voudrait pouvoir justifier que des trous de refroidissement présentant des défauts, tels que des formes erronées, puissent toujours être conformes aux normes. [1]. [7]. [10]

CHAPITRE 2

Usinage Non Conventionnel

2.1 Introduction

L'usinage conventionnel est principalement basé sur l'enlèvement de matériaux en utilisant des outils plus durs que les matériaux eux-mêmes.

Matériaux nouveaux et novateurs en raison de leur grande amélioration propriétés chimiques, mécaniques et thermiques sont parfois impossibles à usiner avec les procédés d'usinage conventionnels.

Les méthodes d'usinage conventionnels sont souvent inefficaces pour usiner des matériaux durs comme la céramique et les composites ou usinage dans des tolérances très serrées comme en micro-usiné

La nécessité d'éviter les dommages superficiels qui accompagnent souvent les contraintes créées par l'usinage conventionnel.

Exemple : industries aérospatiales et électroniques.

Ils sont classés dans le domaine des produits non conventionnel.

2.2 Classification de l'usinage non conventionnel

Ceux-ci peuvent être classés en fonction de la source d'énergie utilisée pour générer une telle action d'usinage : mécanique, thermique, chimique et électrochimique.

- **Mécanique :** Érosion du matériau de travail par un flux de grande vitesse abrasifs ou fluides (ou les deux)

• L'usinage par ultrasons (USM) et l'usinage par jet d'eau (WJM) sont typiques exemples de procédés d'usinage mécaniques à simple action et non traditionnels.

• Le milieu d'usinage est constitué de grains solides en suspension dans une boue abrasive dans ancien, alors qu'un fluide est utilisé dans le procédé WJM.

• L'introduction d'abrasifs dans le jet de fluide améliore l'usinage l'efficacité et est connu sous le nom d'usinage par jet d'eau abrasif. Cas similaire se produit lorsque des particules de glace sont introduites comme dans l'usinage par jet de glace

- **Thermique** : l'énergie thermique est appliquée à une très petite partie du travail surface, entraînant l'élimination de cette partie par fusion et / ou vaporisation du matériel. L'énergie thermique est générée par conversion d'énergie électrique.

• Usinage thermique enlève les matériaux par faire fondre ou vaporiser le matériau de la pièce.

• Beaucoup secondaire des phénomènes se produisent pendant usinage tel que microfissuration, formation de zones affectées thermiquement, striations etc.

•La source de chaleur pourrait être plasma comme pendant l'EDM « électro décharge machining » et PBM « plasma beam machining »ou photons comme pendant LBM « laser beam machining », des électrons dans EBM « électron beam machining », ions chez IBM « ion beam machining » etc..

- **Chimique et Électrochimique:** la plupart des matériaux (métaux en particulier) sont sensibles aux produits chimiques, attaque par certains acides. En usinage chimique, produits chimiques retirer sélectivement le matériau de parties de la pièce, tandis que d'autres parties de la surface sont protégées par un masque.

• Broyage chimique et usinage photochimique ou le masquage photochimique utilise tous une action de dissolution chimique à supprimer la surépaisseur d'usinage à travers des ions dans un décapant.

• Usages électrochimiques la dissolution électrochimique phase de suppression de l'usinage allocation en utilisant le transfert d'ions dans une cellule électrolytique.

2.3 Jet d’eau et jet d’eau abrasif

Le découpage au jet d'eau est un procédé de fabrication qui utilise un jet d'eau hyperbare pour découper la matière (Plastique, organique, métallique, composite, etc.).

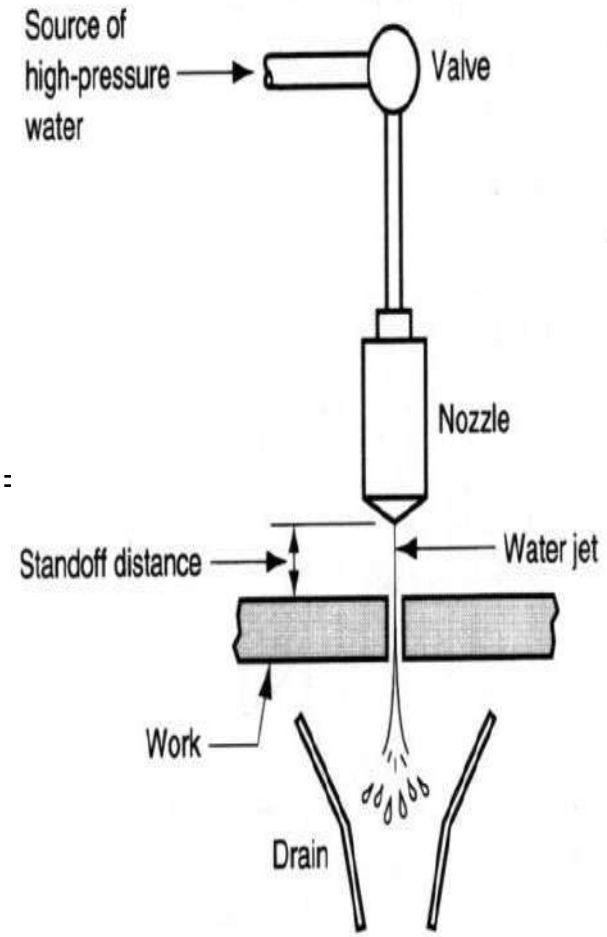


Figure 2.1 Schéma de principe

2.3.1 Paramètres

- 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
- Vitesse de coupe : 1m/min pour des épaisseurs jusqu'à100mm.
- découpe à sec due à la grande pression

2.3.2 Avantage :

- Coupe à froid sans influence thermique
- inusable et facilement réglable.
- précis (quelques 1/100èmes de mm)
- Coefficient d'utilisation optimal de la matiére grace à la réduction maximale des distances entre les piéces
- Usinage non polluant et propre sans émanation de gaz de fumées toxiques
- Productivité élevée grâce aux installations à plusieurs têtes de découpe

2.3.3 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 (filtration et adoucissement de l'eau)

2.3.4 Utilisations :

- Mousse, Carton ondulé, contreplaqué, éponge
- Bois, glace, cuir, plaques d'amiante, verre
- Marbre, divers matériaux de construction
- Céramique, acier, aluminium, acier inoxydable, composites
- Plastique

2.4 Jet d'eau

2.4.1 Jet d'eau pure :

Pour les matériaux tendres. Buse de coupe de 0,08 mm à 0,30 mm (sertie d'un saphir industriel)

Permet la découpe de matériaux ductiles ou de composites

Le débit d'eau est fonction de la pression et du Ø de la buse

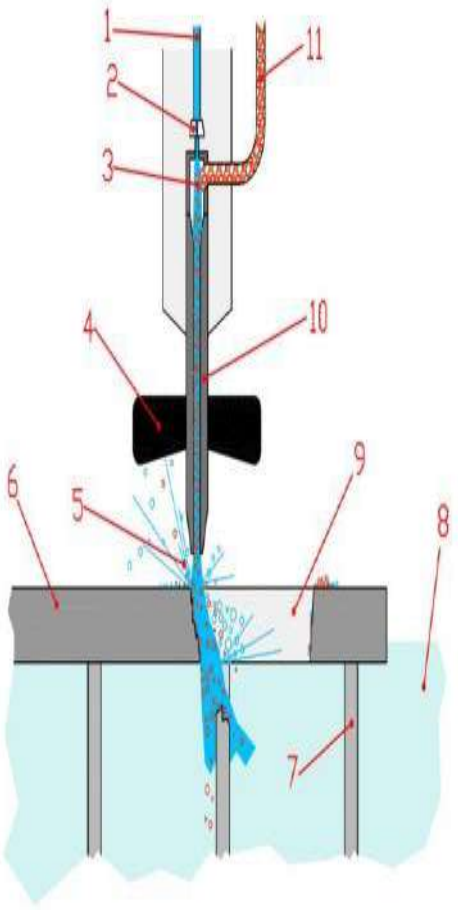


Figure 2.2 Découpe jet eau

2.5 Usinage avec jet abrasif

2.5.1 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)

2.5.2 Applications :

Finition, ébavurage, nettoyage, séparation des pièces, coupe des matériaux durs :
Céramiques, pierres

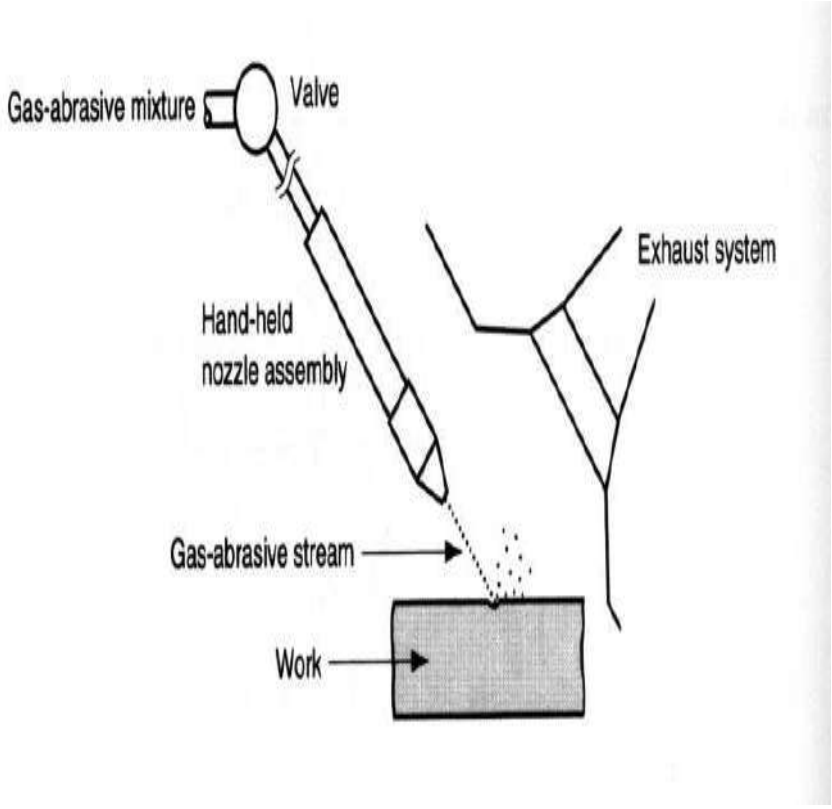


Figure 2.3 Jet d'eau abrasif

2.5.3 Paramètres

•Jet d'eau Abrasifs : Al2O3, dioxyde de silicium.

Diamètre de l'orifice = 0.25 à 0.63 mm

•gaz + abrasifs

gaz = air, azote, hélium, 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

2.5.4 Système d'injection pour usinage par jet d'eau abrasif

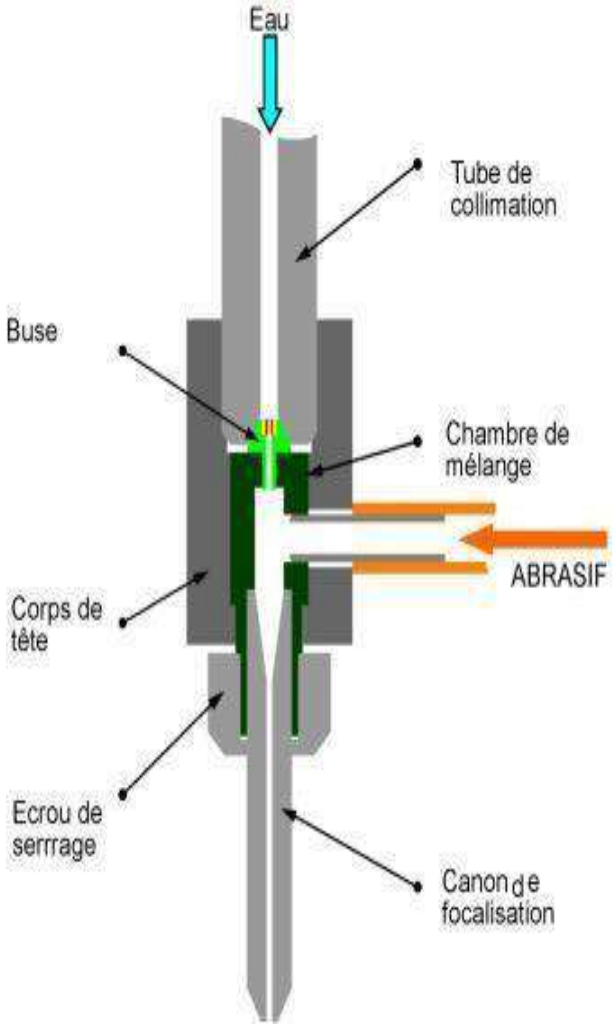


Figure 2.4 Système d'injection

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

2.6 Usinage ultrasonique

L'usinage par ultrasons est un procédé de reproduction de forme par abrasion particulièrement adapté à l'usinage des matériaux durs, fragiles et cassants (verres, céramiques, quartz, pierre précieuse, semi-conducteur…).

Il s'appuie sur trois phénomènes physiques pour enlever la matière:

- le cisaillement,
- l'érosion,
- l'abrasion.

Ainsi cette méthode consiste à projeter des particules abrasives très dures sur la pièce à usiner, à l'aide d'une sonotrode, vibrant à fréquence ultrasonore.

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

Eau + 20 à 60 % des particules abrasives (SiC, B4C, Al2O3)

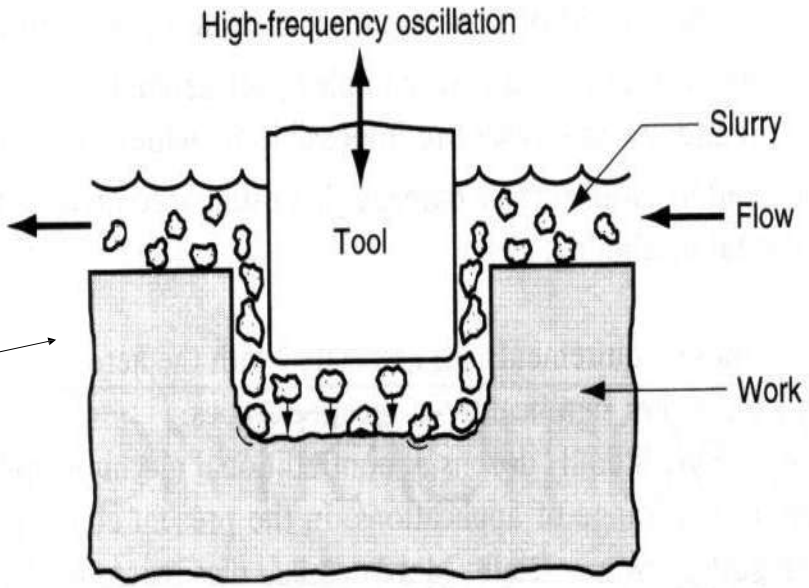


Figure 2.5 Principe de l'abrasion ultrasonore

Les particules sont amenées dans la zone de travail par un fluide porteur (par ex. l'eau). Un flot constant assure l'évacuation des copeaux et le renouvellement des grains abrasifs.

On a donc ainsi trois phénomènes :

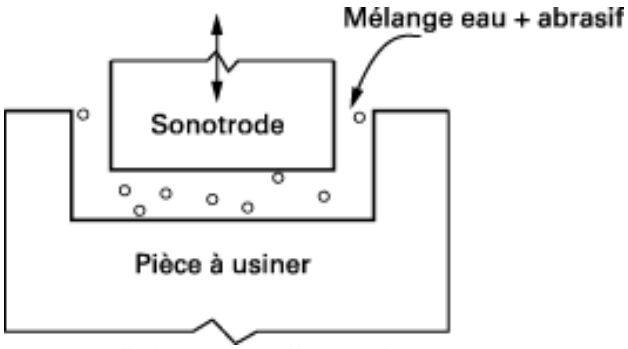


Figure 2.6 Principe de l'abrasion ultrasonore

Plus l'amplitude de vibration est grande plus le débit de matière enlevé est grand

• Une action mécanique due à la projection et au martèlement des grains abrasifs contre la surface de la pièce

• Une érosion de cavitation due aux variations de pression au sein du liquide, engendrées par les variations de la sonotrode

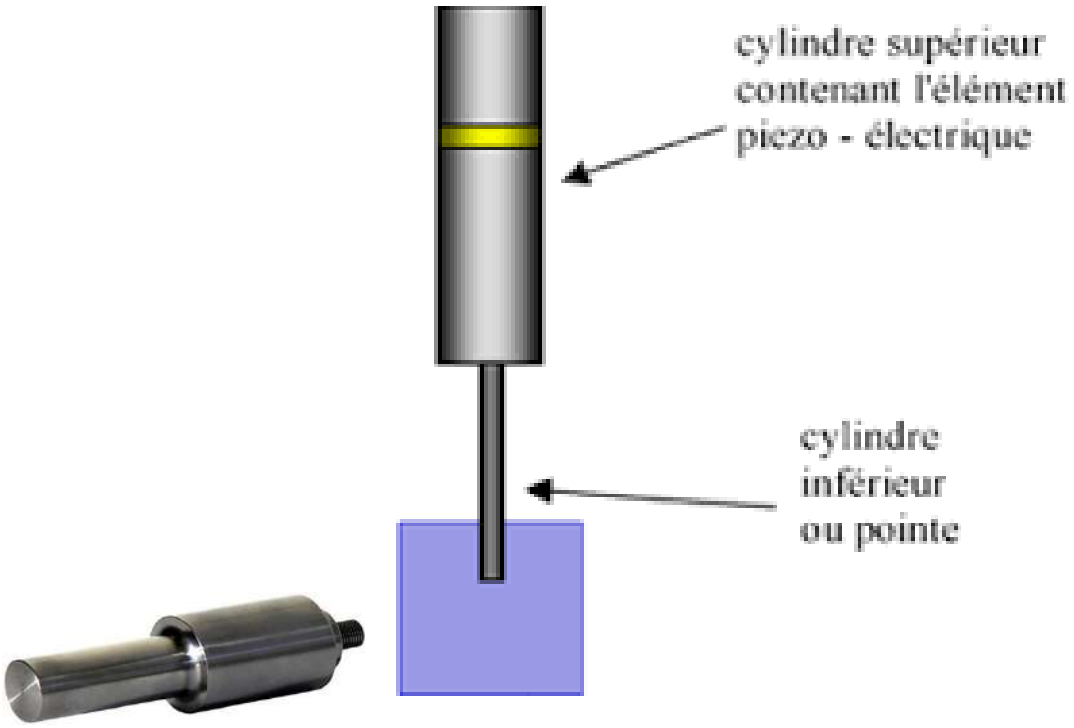
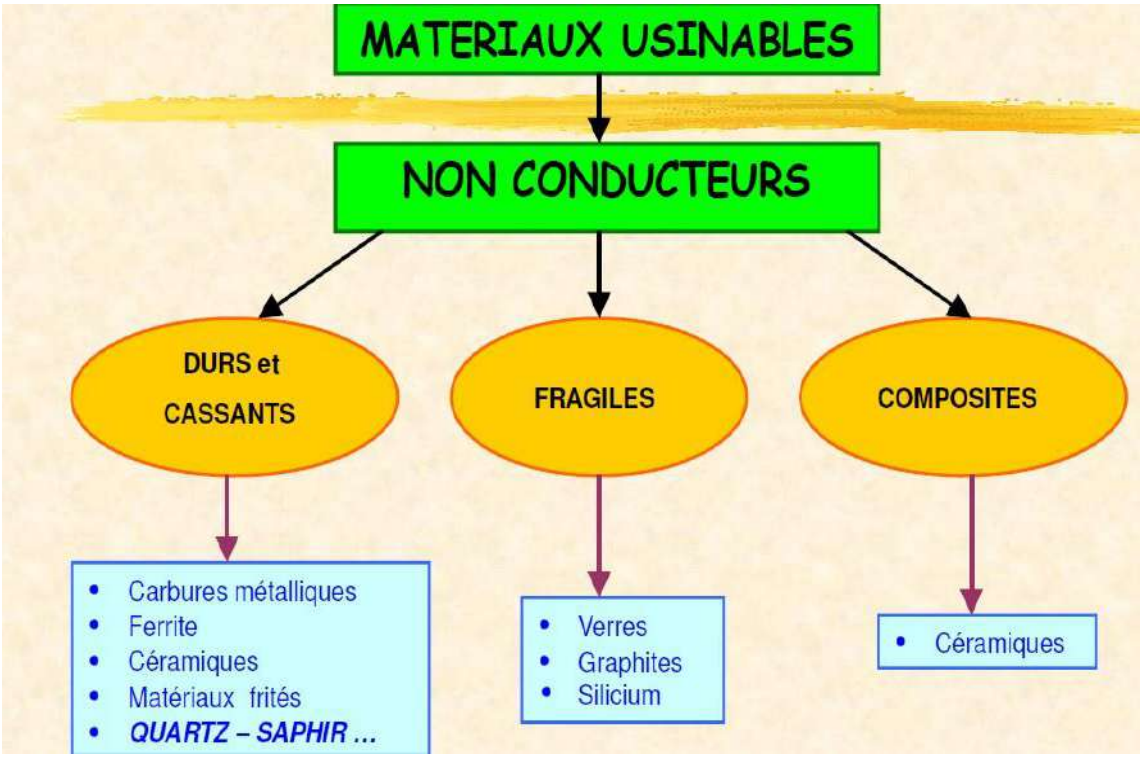


Figure 2.7 SONOTRODE

• Une action chimique due au fluide porteur : cette action est le plus souvent inutilisée.



Figure 2.8 Machine d'usinage à ultrasons



2.6.1 Performances 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)

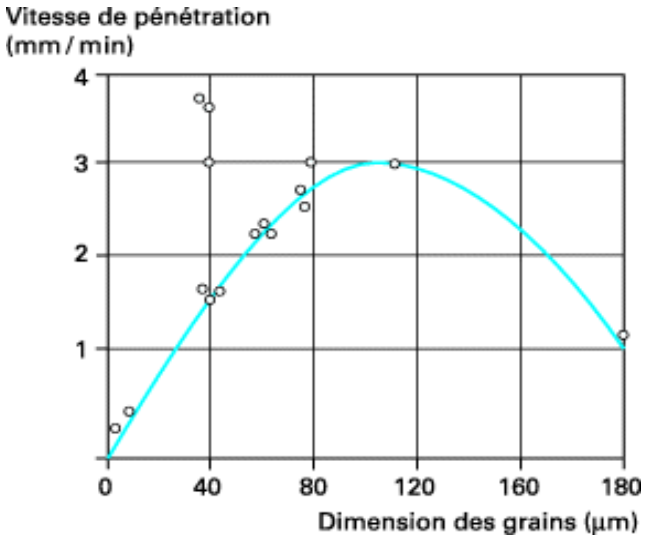


Figure 2.9 Vitesse de pénétration en fonction de la dimension des grains (usinage du verre)

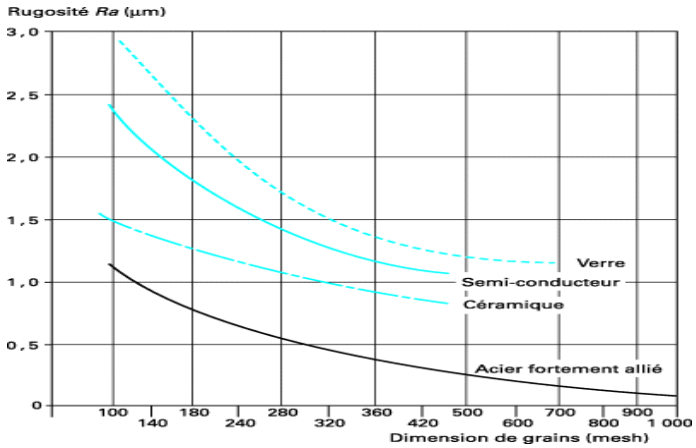


Figure 2.10 Qualité de surface en fonction de la dimension des grains pour différents matériaux

Exemples d'en graphite
Usinées par ultrasons



Exemples de pièces en céramiques
usinées par ultrasons

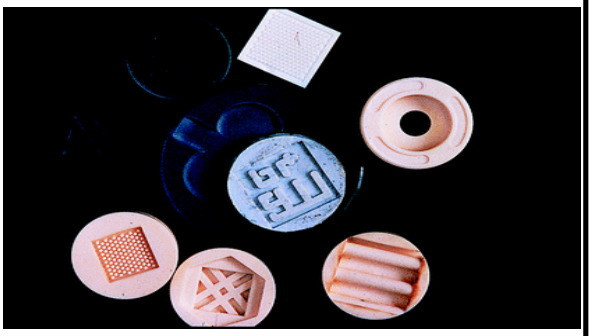


Figure 2.11 Quelques exemples

2.7 Usinage électrochimique

La pièce métallique qui sert d'anode (+) est raccordée à un courant continu, l'outil sert de cathode (-), le tout arrosé par une solution d'eau salée injectée sur les surfaces à usiner attirant les ions de métal de la pièce

- L'outil est l'électrode.
- Ce procède est plus rapide que le chimique mais il y'a dégagement d'hydrogène et d'oxygène.
- Recyclage des boues dangereuses (4Fe(OH)3).
- L'outil ne s'use que par contact avec l'électrolyte.

Energie électrique + réaction chimique

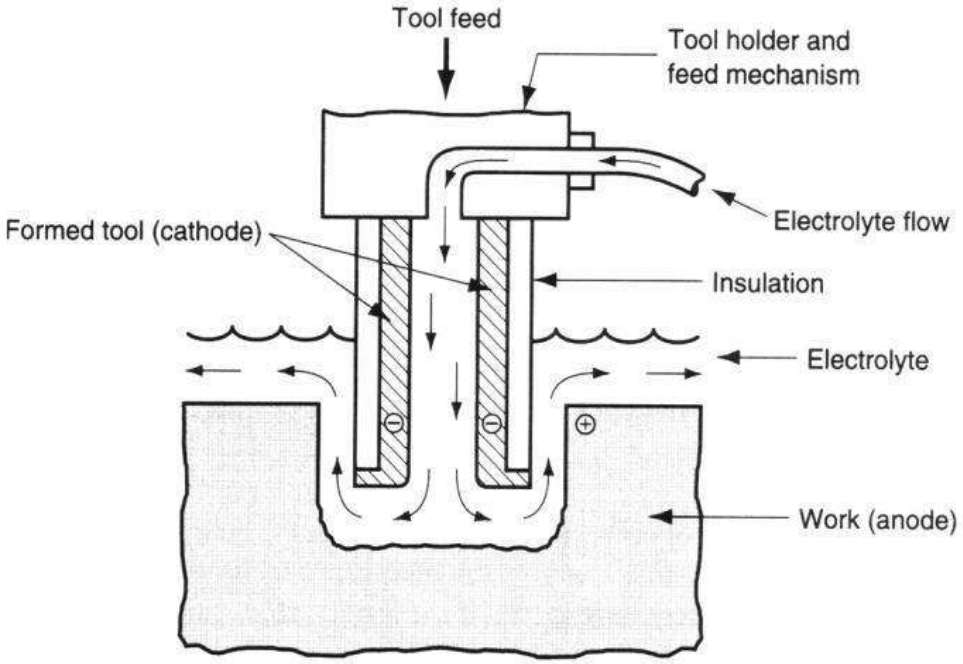


Figure 2.12 usinage électro chimique ECM

2.7.1 Applications :

- Usinage des matériaux conducteurs d'électricité (Al, Cu, Fe, Ni, aciers)
- Usinage des matériaux frittes
- Usinage Matériaux durs ou difficiles-à-usiner ou pour des géométries complexes
- Formes irrégulières et complexes des moules
- Perçage des trous non ronds
- Ébavurage
- Rectification plane ou cylindrique.
- usinage de matrices ou moules, ébavurage, affûtage.
- Possibilités : précision 0,01 mm en rectification et 0,1 mm en défonçage

2.7.2 Avantages

- Pas de contact, peu de dommage à la pièce.
- Pas ou peu d'usure de l'outil
- Pas de bavures
- L'absence d'opération d'ébauche
- 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
- Vitesse d'usinage de 0,1 à 2 mm/min. (10 fois plus rapide que l'électro érosion à enfonçage)
- 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
-

2.7.3 Inconvénients

- Coûts du système électrique
- Coûts de traitement de l'électrolyte
- Problèmes de corrosion
- 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)

2.7.4 Exemples d'usinage électrochimique

a. Ébavurage électrochimique

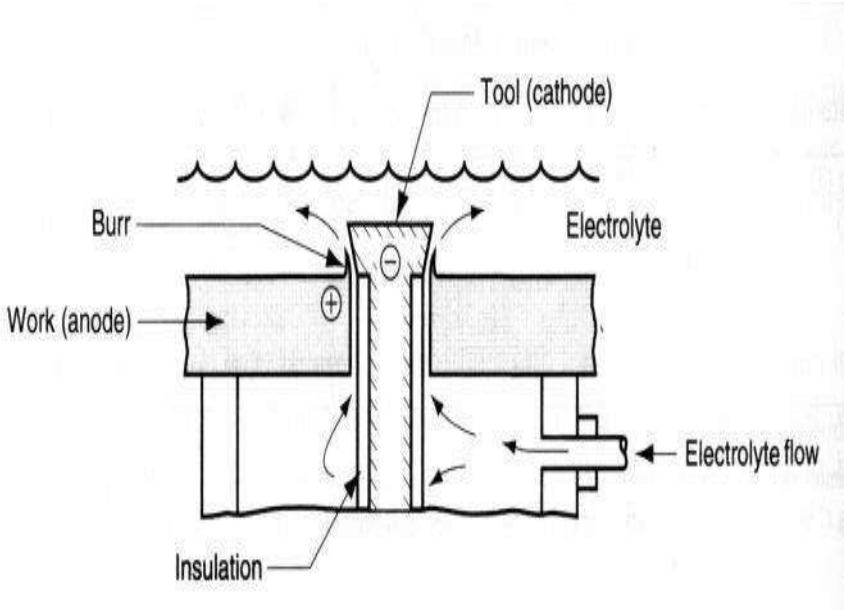


Figure 2.13 perçage électro chimique EDM

b. Rectification électrochimique

95% de coupe par procédé électrochimique

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

c. Applications

Aiguiser les outils de coupe rectifier les aiguilles chirurgicaux usiner des tôles et tubes minces usiner des pièces fragiles

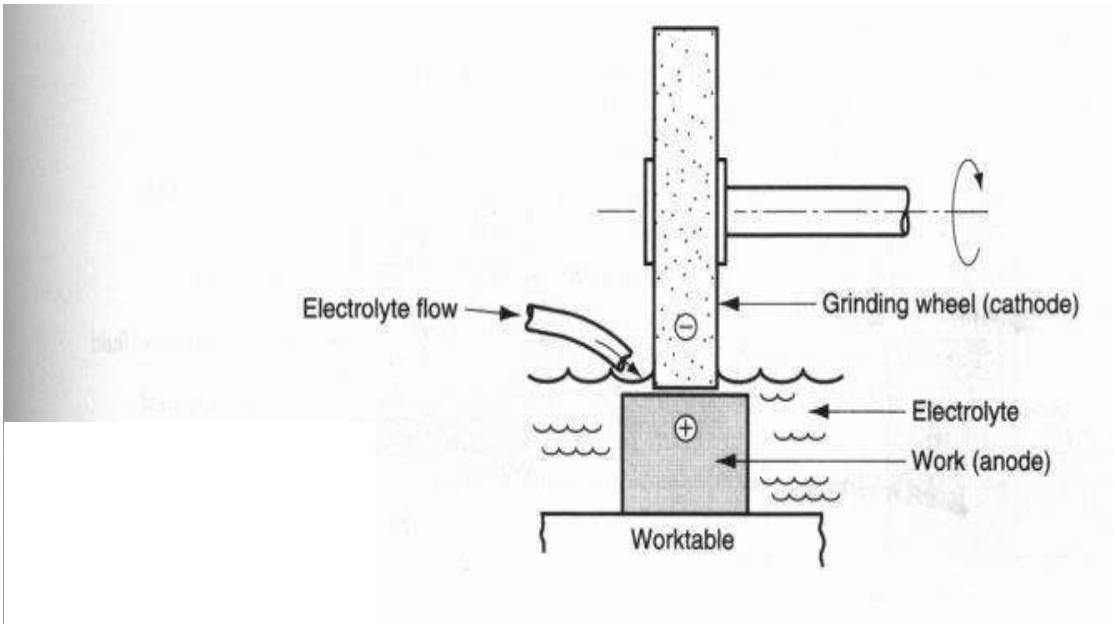


Figure 2.14a : Rectification électrochimique

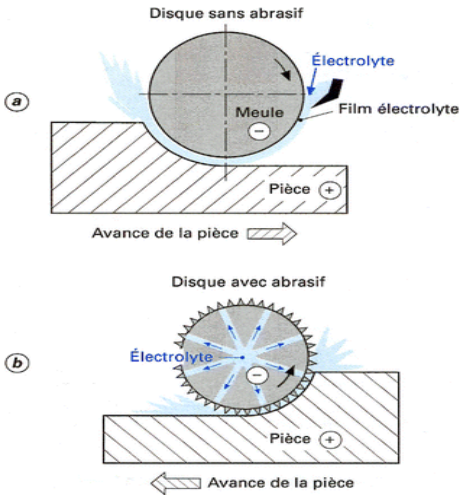


Figure 2.15b : Rectification électrochimique

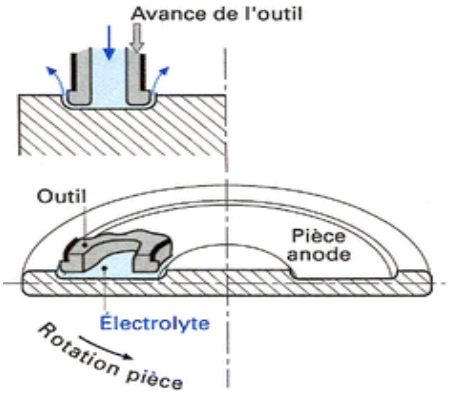
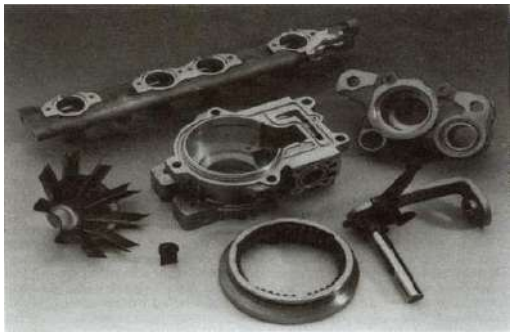


Figure 2.16 Tournage électrochimique

2.7.5 Exemples de pièces obtenues par procédé électrochimique



Exemples de **pièces ébavurées**





Exemples de **pièces usinées**

2.8 Usinage par électroérosion

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

Pas de contact ; Dureté de la pièce n'influence pas la coupe

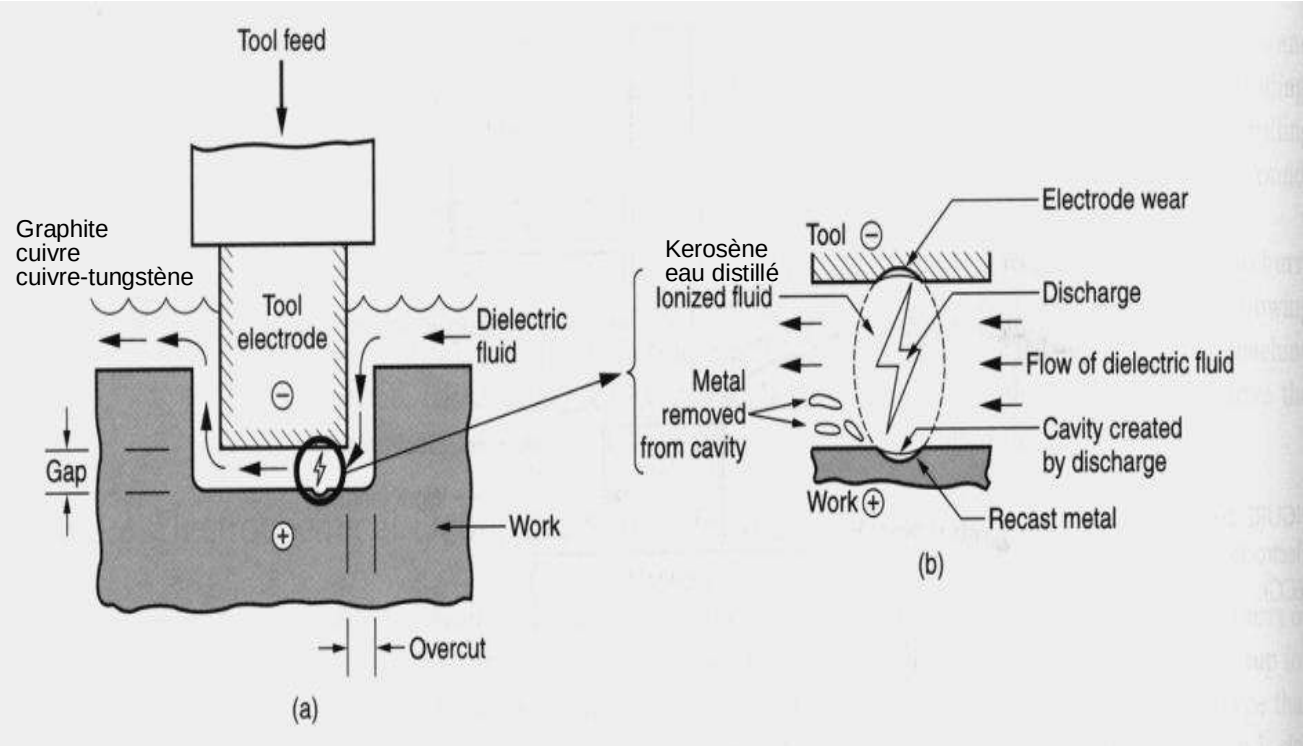


Figure 2.17 Usinage à l'électroérosion à l'électrode

2.8.1 Caractéristiques 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 (5cm3/min) et finition (0.05cm3 /min)

2.8.2 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.

Pièces minces

Perçage des trous à axe non perpendiculaire à une surface plane.

Usinage des matériaux conducteurs durs

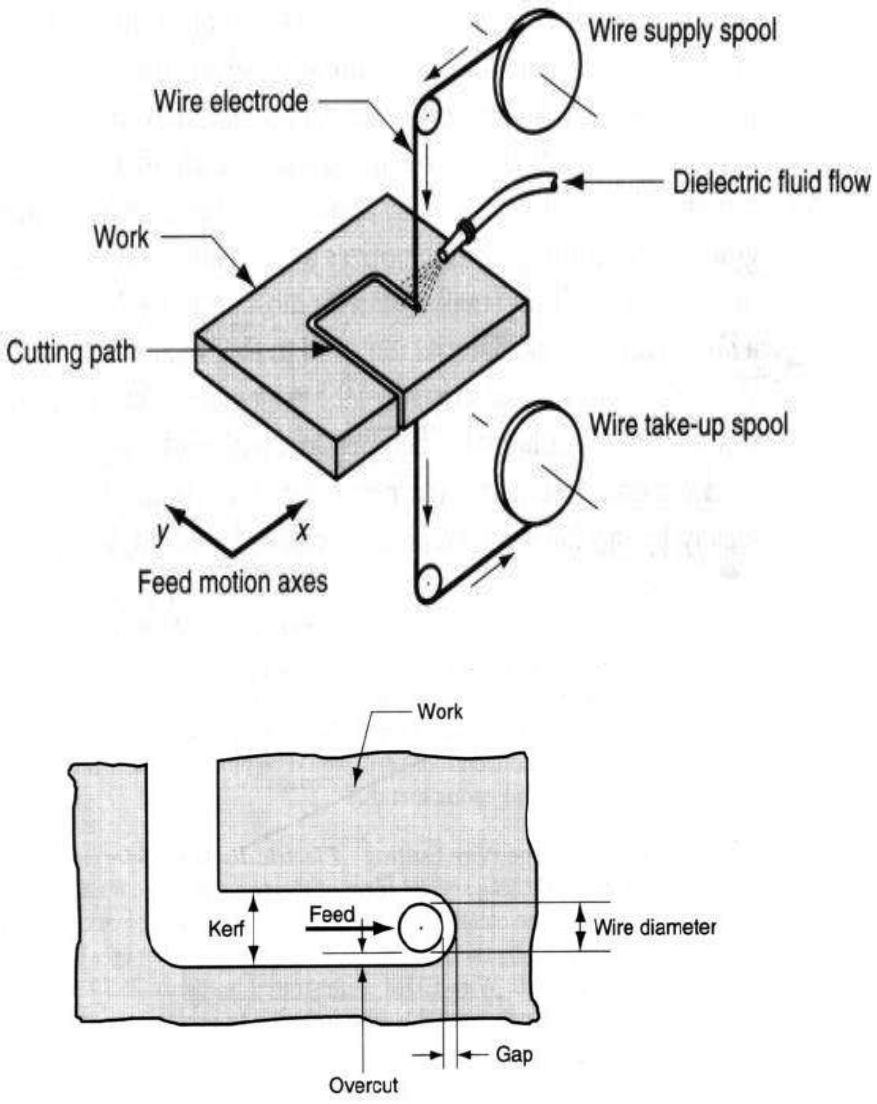


Figure 2.18 Usinage à l'électroérosion à fil

2.9 AUTRES PROCEDES

2.9.1 Usinage LASER

Découpe jusqu'à10mm d'épaisseur maxi.
Puissance de 20 à25kW 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.

Applications principales:

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

2.9.2 Usinage par faisceau d'électrons

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

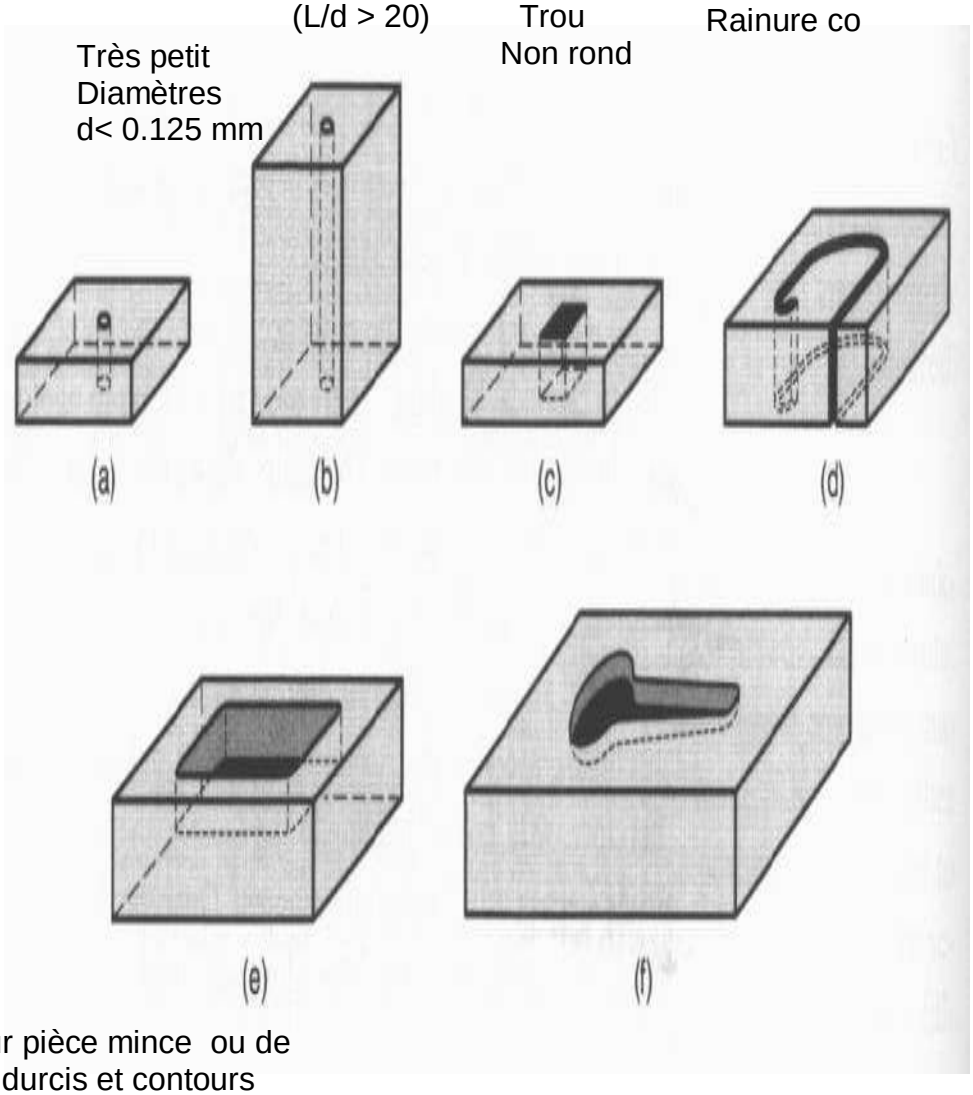
Avantage:

- 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 10-4Torr; 1Torr =1mm de Hg.
- Émission de rayons X (enceinte en acier ou en plomb).
- Faisceau sensible, déviation du faisceau
- on ne peut pas souder de plastiques

2.10 Géométries spéciales nécessitant les procédés non conventionnels



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

Figure 2.19 Géométries spéciales

CHAPITRE 3

Perçage Électrochimique

3.1 Introduction

La technique ECD est utilisée pour la production de conduits de refroidissement dans le sens de l'envergure de l'aube de la turbine. Nous allons discuter de cette technique plus en détail ici. La surface nervurée des conduits est obtenue en faisant varier les paramètres du processus de perçage, tels que la vitesse de perçage, de manière contrôlée. La perceuse avance de quelques millimètres par minute dans le matériau de la pale. Un diamètre de conduit typique est d'environ 3-4 mm. Le transfert de charge électrique entraînera la dissolution de la surface de l'anode. Dans la section suivante, nous allons modéliser ce processus. Le but est de trouver une expression pour la vitesse de dissolution du métal de la pale.

3.2 Principe de l'E.C.D

Dans le processus E.C.D, la pièce est connectée au pôle chargé positivement d'une source de tension continue, tandis que l'outil (l'électrode) est connecté au pool chargé négativement.

Un électrolyte est pompé entre la pièce et l'outil. L'alimentation en électrolyte se fera par électrodes.

Lorsque la source de tension est connectée, un flux électrique, qui veille à ce que le matériau au pôle chargé positivement soit résolu (dans notre cas, la pièce à usinée). Grâce à l'électrode de vitesse constante inférieure ou égale à la vitesse de dissolution se dirigeant vers la pièce, un trou dans le matériau peut être percé.
Un espace constant entre la pièce et l'électrode sera généré.

Le métal enlevé sera dégagé pour la plupart des pièces par l'électrolyte en flux continu. Cependant, une petite partie précipitera sur l'électrode, qui est

connectée au pôle chargé négativement. Ce phénomène est indésirable, car la forme de l'électrode sera modifiée et crée un danger de court-circuit.

Pour éviter ce problème, le processus sera inversé de temps en temps, ce qui signifie que l'électrode sera positive et que la pièce à usiner sera inversée. En faisant cela, le matériau condensé sera résolu sur l'électrode. L'électrode sera nettoyée.

3.3 Description des paramètres de processus

Comme il ressort des chapitres précédents, le développement du processus dépend de nombreux facteurs. Ce facteur, qui influence le processus, est appelé paramètres. Un paramètre fondamental est la force d'écoulement. La force d'écoulement dans le circuit électrique est une mesure du nombre d'électrons qui seront retirés au niveau des atomes de la pièce. Ce paramètre détermine le nombre d'ions métalliques dissous par seconde.

La force d'écoulement sera exprimée en ampère A.

Ce paramètre fondamental importera peu pour la pratique quotidienne, contrairement aux paramètres qui influencent la force d'écoulement. Celles-ci sont appelées paramètres dérivés. Ces paramètres s'expliquent mieux avec la loi d'Ohm :

$$U = IR$$

Où

U = Différence de tension sur la fissure (V)

I = force du courant (A)

R = résistance à la fissuration (Q)

En d'autres termes, la différence de tension placée et la résistance électrique apparue dans la fissure déterminent la force du courant. En effet est :

$$I = U / R \qquad [4].[9]$$

3.4 Résistance à la fissuration

La résistance aux fissures électriques dépend de divers facteurs :

a. la taille de la fissure
b. la concentration de l'électrolyte
c. la température de l'électrolyte
d. la sortie de l'électrolyte (important avec des trous profonds)
e. la vitesse d'alimentation

3.4.1 L'étendue de la fissure

La taille de la fissure est proportionnelle à la résistance à la fissure. Cela signifie que chaque fois que la fissure est deux fois plus grande, sa résistance sera également deux fois plus grande.

La fissure doit être suffisamment grande pour permettre l'évacuation de l'électrolyte, afin que le processus de l'E.C.D se déroule bien. Si la fissure est trop petite, la résistance du conducteur augmentera, ce qui entraînera une insuffisance d'électrolyte dans l'électrode.
Grâce à cela, l'électrode est moins refroidie, de sorte que la température sera trop élevée et qu'il y a un risque de brûlure de l'électrode.

En règle générale :

D (trou) = D (électrode) + 0,15 mm pour H_2SO_4
+ 0,10 pour HCL

3.4.2 La concentration de l'électrolyte

L'électrolyte est un liquide qui conduit l'écoulement. L'eau est déjà un conducteur de flux, mais si l'acide, la lessive ou le sel est résolu, la conductivité augmente. Dans le procédé E.C.D, on utilise principalement un électrolyte acide (acide sulfurique dilué, acide chlorhydrique dilué). La concentration de ces acides sera indiquée dans les instructions de travail.

La relation entre la conductivité (résistance) et la concentration d'une solution d'acide sulfurique. Il en ressort que si la concentration est réduite, la conductivité diminue.

En d'autres termes, la résistance électrique sera plus grande. Avec une différence de tension similaire, la force du flux diminue (U = IR) de sorte que la vitesse de résolution diminue. Ici, la fissure sera plus petite avec une vitesse d'alimentation constante, de sorte que la résistance deviendra inférieure et que la force du courant augmentera, de sorte que la force de résolution sera égale à la vitesse d'alimentation.

Conclusion : la réduction de la concentration entraîne une diminution de la fissure.

3.4.3 La température de l'électrolyte

La conductivité de l'électrolyte est fortement influencée par la température. La température est toujours indiquée dans les instructions de travail.

Il en ressort que chaque fois que la température augmente, la conductivité augmente. En d'autres termes, la résistance électrique diminue. Dans le processus E.C.D, la force du flux augmente (U = IR) à une différence de tension constante et à une vitesse d'alimentation constante, ce qui augmente la force de résolution et

augmente la fissure. Grâce à cela, la résistance augmente, ce qui augmente la force du flux et stabilise le processus.

Conclusion : L'augmentation de la température de l'électrolyte entraîne une augmentation de la fissure. [5].[13]

3.4.4 La vitesse d'alimentation

Lorsque la vitesse d'alimentation augmente, la force de résolution en premier lieu ne change pas, de sorte que la fissure se rétrécit, ce qui réduira la résistance électrique.

Selon la loi d'Ohm (U = IR), la force d'écoulement augmente, de sorte que la force de résolution augmente également. Après un certain temps, un nouvel équilibre entre la nouvelle vitesse d'alimentation en énergie et la nouvelle force de résolution apparaîtra à nouveau, mais avec une fissure plus petite et une force d'écoulement plus élevée.

Conclusion : l'augmentation de la vitesse d'alimentation entraîne la diminution de la fissure.

Différents paramètres influent sur la taille de la fissure et donc sur le paramètre du trou. En pratique, deux de ces paramètres sont utilisés pour contrôler le processus, à savoir :

a. la vitesse d'alimentation : vitesse d'alimentation plus grande = fissure plus petite.
b. la différence de tension : différence de tension plus grande = fissure plus grande.

Il va sans dire que les autres paramètres doivent être vérifiés régulièrement.

3.5 Modélisation physique du l'ECD.

La corrosion de la surface de l'anode résulte directement de l'électrolyse. Le foret est un cylindre conducteur avec un revêtement isolant à l'extérieur. Cette électrode est abaissée dans le matériau à une certaine vitesse, tandis qu'une tension lui est appliquée. On obtient ainsi un conduit de forme cylindrique, comme illustré à la figure 2.1. Pour décrire le processus d'électrolyse, nous utilisons la loi de Faraday. L'équivalent électrochimique est une propriété matérielle définie par

$$e_a := \frac{A}{zF}, \qquad \text{.....3.1}$$

Où A représente la masse molaire du métal de l'anode, z le nombre d'électrons échangés dans la réaction anodique et la constante de F. Faraday. Dans une formulation globale

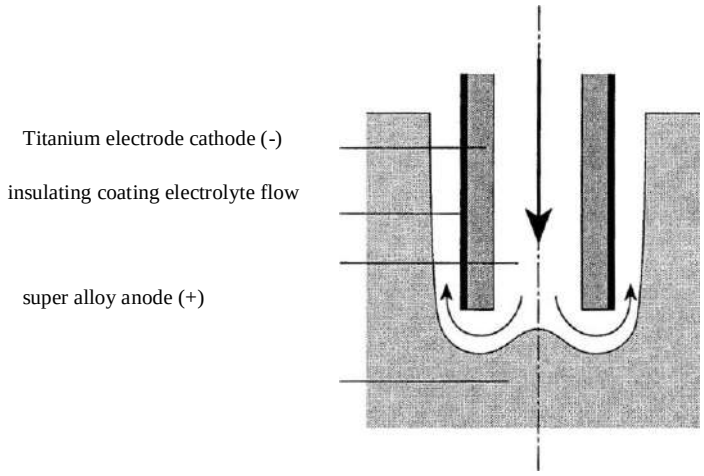


Figure 3.1. Processus de perçage électrochimique [1].[6]

Cette loi donne pour le taux d'élimination volumétrique

$$\frac{dV}{dt} = \frac{e_a}{\rho_a} I, \qquad \text{.....3.2}$$

Où V est le volume de l'anode. Dans cette formule, pa est la densité et e l'équivalent électrochimique de l'anode. Ces deux dernières quantités sont supposées constantes, ce qui est réaliste dans une situation pratique. Pour des raisons pratiques (5.2) est réécrit dans une formulation locale pour la limite d'anode comme suit :

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \frac{e_a}{\rho_a}(\mathbf{J}(\mathbf{x}), \mathbf{n})\mathbf{n}. \quad \text{.....3.3}$$

De cette manière, le taux de récession de l'anode est directement lié à la densité de courant J. Ainsi, on trouve une expression pour la vitesse instantanée à laquelle la surface de l'anode se déplace. Pour déterminer ce taux de récession, il faut connaître le flux de densité de courant. À cette fin, les différents processus physiques impliqués dans l'électrolyse sont maintenant considérés.

3.6 Transfert de charge électrique

Le courant qui traverse l'électrolyte est dû au mouvement des ions. Les ions dans la solution sont les porteurs de charge établissant le courant, en suivant le champ imposé par la différence de potentiel. Ainsi, le gradient de potentiel n'a pas besoin d'être égal à zéro, même si aucun courant ne circule dans la solution. La densité de courant J résulte des gradients du potentiel électrique et des concentrations en ions. Puisque nous avons la neutralité électrique, nous pouvons affirmer que le mouvement du fluide, qui est électriquement neutre, ne contribue pas à la densité de courant. Seul le moment um des ions pourrait éventuellement être affecté par le fort flux. On peut montrer que ce n'est pas le cas puisque la largeur de l'intervalle est petite et la densité de courant importante.

Pour un système sans gradients de concentration, J est le résultat de gradients dans seulement. Étant donné une conductivité électrolytique Ke nous trouvons

$$\mathbf{J} = -\kappa_e \operatorname{grad} \phi, \quad \text{.....3.4}$$

en utilisant la loi d'Ohm. Si nous avons des gradients de concentration considérables, la différence de potentiel entre deux points est donnée non seulement par la densité de courant et la conductivité, mais également par les gradients de concentration. Pour que la neutralité électrique de la solution soit préservée, il est nécessaire que la production totale de charge dans tout élément de volume soit égale à zéro. Ceci justifie l'hypothèse d'un champ électrique sans divergence, c'est-à-dire :

$$\operatorname{div} \mathbf{J} = 0. \qquad \text{.....3.5}$$

Pour les solutions électrolytiques isothermes à concentrations ioniques constantes, les équations (5.4) et (5.5) donnent l'équation de Laplace pour ϕ

$$\Delta\phi = 0. \qquad \text{.....3.6}$$

3.7 Distribution de densité de courant.

Pour le calcul du potentiel, deux effets sont importants. Tout d'abord, nous avons la goutte ohmique dans le corps de l'électrode et, en second lieu, la chute de potentiel entre le potentiel interne de l'électrode et le potentiel interne de l'électrolyte adhérent près de la surface de l'électrode, en raison de la réaction de l'électrode. Finalement, un état d'équilibre pour le potentiel d'électrode est atteint à un courant total donné. Cet effet est appelé polarisation d'électrode. Près de la pointe de la cathode, où la densité de courant est haute,

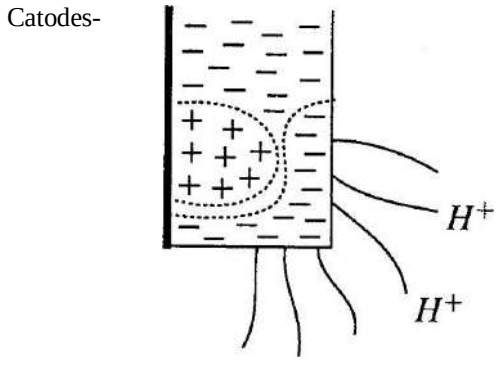


Figure 3.2. Champ induit par polarisation au sommet de la cathode.

L'électrode est polarisée. Dans cette zone, les lignes de courant sont très densément espacées en raison du transport des ions. En conséquence, il est difficile de choisir les conditions aux limites appropriées pour le potentiel. Par conséquent, nous supposons que les électrodes sont parfaitement conductrices et qu'elles sont à peu près non polarisables. Ensuite, nous pouvons imposer des conditions aux limites de Dirichlet à la surface de l'électrode.

3.8 Transfert de chaleur dans les solutions électrolytiques

Pour des gradients de concentration constants dans la solution, la mobilité ionique et donc la conductivité électrolytique dépendent fortement de la température (voir figure 2.3). Plutôt que d'utiliser la simple équation de Laplace (3.6),

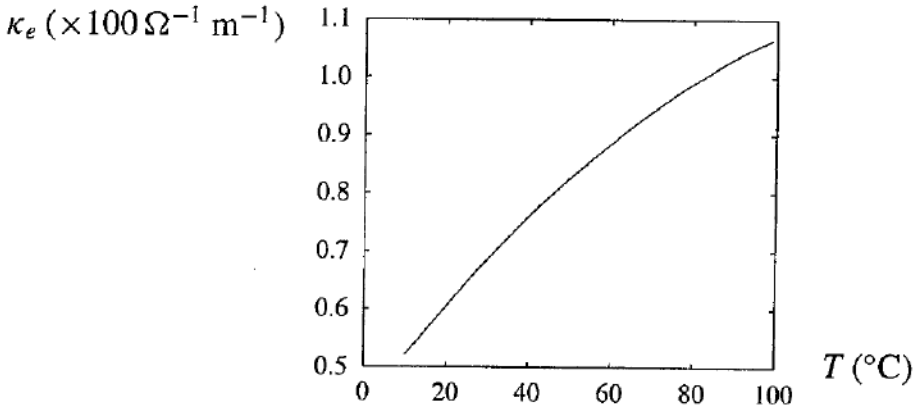


Figure 3.3. Conductivité de la solution H2S04 (17%)

le potentiel satisfait donc à l'équation suivante :

$$\operatorname{div}\left(-\kappa_e(T)\operatorname{grad}\phi\right) = 0. \qquad \text{.....3.7}$$

La conductivité électrolytique dépend de la température T. Les gradients de température de la solution sont causés par la production de chaleur due au passage du courant électrique à travers la solution. Pour une distribution isotherme et homogène des concentrations, la chaleur dite Joule Q est définie par

$$Q := \frac{1}{\kappa_e}\|\mathbf{J}\|^2.$$ ……..……3.8

Cela ne donne une approximation acceptable pour Q que lorsque les gradients de température et de concentration sont relativement faibles. Si on ne prend pas en compte les réactions chimiques, la distribution de la température est décrite par une équation de convection-diffusion, c'est-à-dire

$$\rho_e c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u}, \operatorname{grad} T)\right) = -\lambda_e \Delta T + Q,$$ …….3.9

où u est le champ de vitesse de l'électrolyte selon une différence de pression imposée par une pompe.

Notez que les effets de la dissipation visqueuse dans l'électrolyte ont été négligés dans (5.9). Le transfert de chaleur est un effet important dans le processus d'E.C.D. Lorsque la densité de courant est élevée, en particulier près de la pointe de la cathode, la température de la solution augmente sous l'effet de la production de chaleur et les gradients de température entraînent la formation de gradients dans la conductivité électrolytique. La différence de pression produite par la pompe est toutefois si importante que la circulation de l'électrolyte se fait à des vitesses élevées (voir figure 4). De plus, la solution passe toujours par un grand réservoir de telle sorte que l'on puisse supposer que la température de la solution allant aux électrodes est pratiquement constante. L'apparence

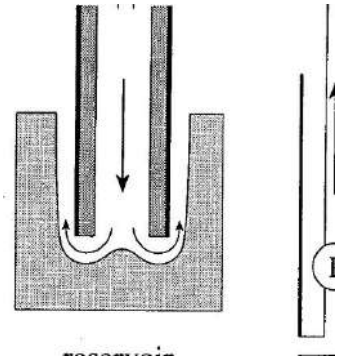


Figure 3.4. Recirculation de l'électrolyte.

Les forts gradients de conductivité sont donc limités aux couches limites de température. Ces effets de couche limite sont négligés dans notre modèle. Si nous

voulons modéliser le transfert de chaleur, nous devons donc également intégrer le mouvement du fluide, dans un souci de convection. L'influence de ce mouvement sur le transfert de charge électrique est négligeable.

3.9 Formation de gaz

Un autre effet, qui conduit à une conductivité non homogène, est la formation de gaz. Au niveau de la cathode est créé par réduction et à l'anode par oxydation. Le milieu consistera donc en un mélange de solution électrolytique et de bulles de gaz entraînant une diminution de la conductivité. Encore une fois, en raison du fort débit, ceci n'affectera que localement la conductivité et sera donc négligé. [2].[4]

CHAPITRE 4

Processus de l’E.C.D

4. Introduction du processus d'E.C.D

Le procédé de perçage E.C.D a été développé pour le perçage de petits trous profonds utilisant des électrolytes acides. L'électrode est alimentée par un petit tube résistant aux acides (généralement en titane) qui est isolé sur toute sa longueur sauf à la pointe du perçage. Le tube ou la cathode est soigneusement redressé et guidé dans le matériau de la pièce.

La tension entre 6 et 20 volts appliquée à la cathode provoque la dissolution anodique des ions métalliques positifs dans l'espace entre l'électrode et la pièce. Cette tension est périodiquement inversée pour éviter la formation d'ions métalliques non dissous sur la cathode.

L'électrolyte revient dans un espace étroit entre l'isolant du tube et la paroi du trou. L'électrolyte de retour est souvent filtré et remis en circulation. Plusieurs cathodes de différentes tailles et formes peuvent être utilisées simultanément. Le fédéré est constant et réglé de manière à ce que le taux d'avancement des cathodes soit en équilibre avec le taux d'élimination des ions métalliques.

La température de l'électrolyte est maintenue constante entre 30 et 35 degrés C.

Le flux d'électrolyte dans les tubes est étroitement surveillé afin d'empêcher les vibrations de la cathode et d'assurer un flux efficace.

Le **E** électro **C** CHIMIQUE processus de **D** perçage est principalement appliqué sur des pièces de turbine en raison de la surface du trou foré. (Pas de couche de refonte)

La température de l'entrée de la turbine influe sur l'efficacité d'un moteur à turbine à gaz. Afin de maintenir la température d'entrée aussi élevée que possible et de maintenir des normes de vie et de sécurité acceptables, ces composants

doivent être protégés contre l'environnement thermique sévère. L'une de ces protections est que les pales des turbines industrielles et aéronautiques sont munies d'orifices de refroidissement longitudinaux.

Le E lectro C CHIMIQUE processus de perçage est utilisé pour forer des trous dans ces coulées, ainsi que dans des surfaces portantes forgées.

Le processus d'ECD est basé sur la gravure électrochimique, où les ions du matériau de surface de l'anode sont dissous et éliminés par le flux d'électrolyte.

L'électrode, qui est en fait la cathode, est un cylindre conducteur recouvert d'un revêtement isolant à l'extérieur. De cette manière, un trou de forme cylindrique est obtenu comme illustré à la figure 4.1.

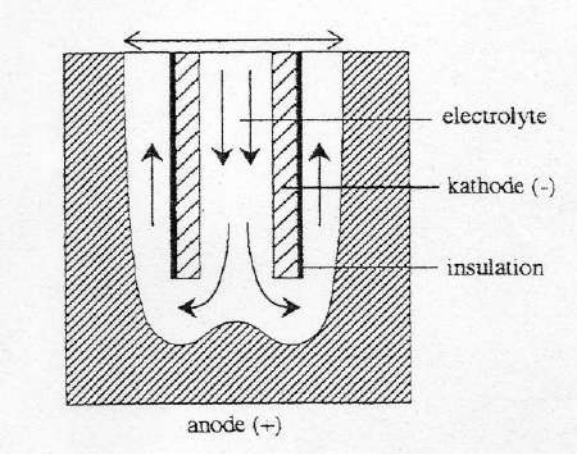


Figure 4.1

Les électrolytes utilisés avec ECD sont: Acide sulfurique (H2SO4, 19-25%), acide nitrique (HNO3) et acide chlorhydrique (HCl).

En tant que cathode, on utilise normalement un tube en titane (grade 2) avec un revêtement isolé à l'extérieur. [5].[13]

Un générateur pulsé est nécessaire pour contrôler le processus.

4.1 À propos de la machine ECD.

Ce processus de doit être effectué dans une machine spécialement conçue pour résister aux acides usés et au procédé électrochimique.

Le processus de l'E.C.D doit être effectué de manière sûre.



Figure 4.2 : Ecran de commande et d'affichage.

Une machine appropriée doit être utilisée pour fonctionner avec ce processus et elle devrait être résistante au processus et aux acides utilisés.

Plusieurs machines sur le marché sont à disponible pour cet usage.



Figure 4.5 : Machine ECD model LAZPIUR



Figure 4.6 : Machine ECD model EMAG CS800

4.2 Composants de base.

Les composants de base nécessaires sont les suivants:

- Réservoir d'acide
- Pompe de process
- Unité de filtration
- Chambre de travail
- RAM
- Générateur
- Manette

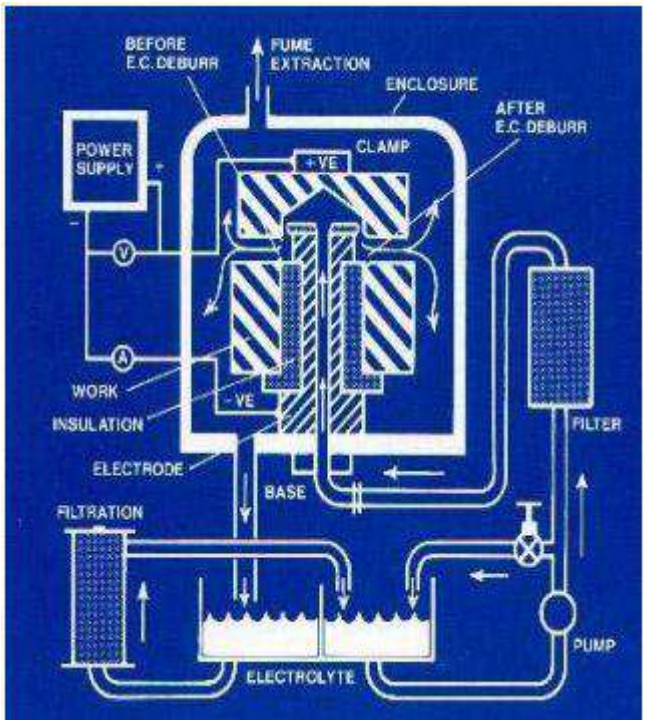


Figure4.7a : Composants de base



Figure 4.8b : Composants de base

4.3 Choix pour les matériaux

Tous les composants en contact avec Acid doivent être bien choisis.

Les matériaux utilisés sont;
- Titane
- Polypropylène (PP)
- PVC
- PVDF
- Acier inoxydable 316 *

* L'acier inoxydable ne peut être utilisé que comme matériau de base pour la machine avec de l'acide nitrique.

4.4 Outillage.

Pour percer des pièces de qualité reproductible, nous avons besoin d'un outillage durable et flexible.

L'outillage doit être conçu avec des points d'emplacement remplaçables. Donc, s'il ya trop d'usure sur ces pièces, elles peuvent être remplacées rapidement.

Aussi la variation dans les castings peut être régler de cette façon.



Figure 4.9 Outillage de perçage

4.5 Règles de base pour la conception.

Les règles de base pour concevoir des outils sont les suivantes:

- Utiliser le plus possible les points de localisation des dessins de pièces
- Prenez les points d'emplacement le plus près possible des arias critiques. (Épaisseur des parois)
- Utilisez des matériaux durables.
- Toutes les pièces d'usure seront des pièces standard ou en stock.
- Outil de conception pour un temps d'installation réduit.
- Rendre l'outillage facile pour l'opérateur.

4.6 Matériaux.

Les matériaux utilisés;

- Guider = Fil coupé titane grade 2
- Base d'outillage = Acier inoxydable 316
- Pièces sur socle = Acier inoxydable 316
- Vis et boulons = Acier inoxydable 316
- Collecteur = PVC
- Curseur (pince cathodique) = Titane grade 2
- Petites pièces dans le collecteur = Titane grade 2
- Tube sur collecteur = PVC
- Faders dans le collecteur = Acier inoxydable 316
- Pince en caoutchouc = Viton

4.7 Perçage des pales.

Avant de pouvoir commencer à percer les pales, nous devons vérifier leur état et leur outillage. Les résultats peuvent être collectés sur des formulaires spéciaux de CQ.

4.7.1 Conditions des pales.

Les pièces doivent être vérifiées visuellement sur une surface régulière.

4.7.2 Contrôle CMM.

Pour savoir comment les contours des pales sont les uns par rapport aux autres, nous devons contrôler les aubes sur les points d'épaisseur de paroi critiques.

Pour mesurer les pales, un outil de production normal peut être utilisé.
Tous les résultats doivent être archivés et contrôlés dans une pièce maîtresse percée afin que les résultats puissent nous indiquer les paramètres de perçage (point de localisation) des pièces.



Figure 4.10: Une pale sur machine de contrôle CMM [7].[8]

4.8 Processus.

Pour démarrer le processus, nous devons remplir un nouvel acide et vérifier le%. Dans cet acide, il faut un vieil acide (10% en volume) pour avoir une bonne base pour commencer la première utilisation.

Parfois, il est nécessaire de faire un essai sur une pale de ferraille. De cette façon, le diamètre du trou peut donner l'information nécessaire pour régler la bonne vitesse du tube électrode.

4.9 Contrôle des acides.

Pour vérifier le pourcentage d’acide, il faut du petit matériel d’essai.

Une burette de 50 ml, une pipette Erlenmeyer de 25 ml, 10 ml, une solution indicatrice de phénolphtaléine à 1% dans de l'éthanol et de l'hydroxyde de sodium à 1 mol / l.

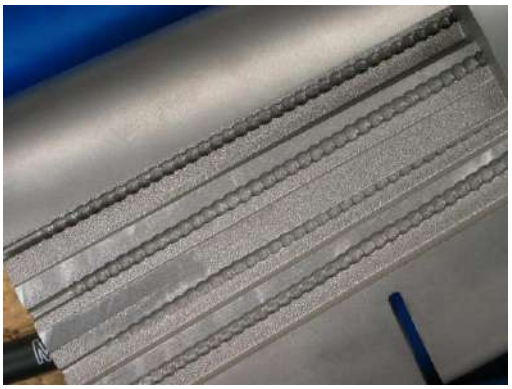
On Prend 10 ml d'acide et mettons-le dans l'erlenmeyer, avec l’ajoute 3 gouttes de solution de phénolphtaléine et on commence à mélanger.

Pendant le mélange, on ajoute Natronlye jusqu'à ce que la couleur du mélange devienne violette. Le volume auquel on ajoute est le pourcentage de l'acide.



Figure 4.11 Coin de contrôle d’acide.

4.10 Contrôle des Trous.



Pour avoir un bon processus, il est nécessaire de laisser un espace entre 0,15 mm et 0,20 mm sur le diamètre de la cathode. En changeant la vitesse, les diamètres peuvent être ajustés à la bonne taille. Nous pouvons également modifier la tension pour modifier la taille du trou.

4.11 Tubulaire

Pour fabriquer des tubulateurs, nous devons créer un programme spécial. Pour obtenir la taille et les dimensions sous contrôle de la vitesse, nous pouvons ajuster la tension et l'espace sur la pointe. (Voir fiche programme du tubulateur)

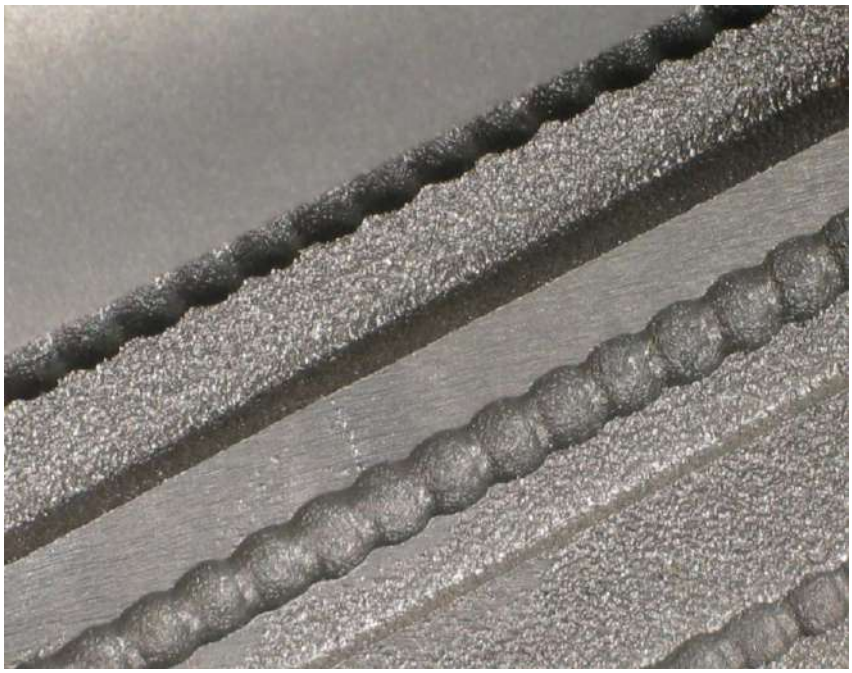


Figure 4.12: Trous tubulaires par procédé ECD. [1].[7]

4.12 Contrôle des cathodes.

Les cathodes utilisées doivent être en bon état.

Ils devraient être droits et plats sur le bout. Le revêtement à la pointe doit être intact. Cette condition peut être atteinte en effectuant une remise à neuf sur une machine à papier abrasif imperméable. Après le meulage, toutes les bavures intérieures doivent être enlevées. Redresser ensuite à la main sur le moteur électrique avec le mandrin.



Figure 4.13 Machine à papier abrasif imperméable



Figure 4.14 Redressement des électrodes

4.13 Feuille de programme trous droits.

N° de série	
Date	N° d'usinage
programmeur	Liste

Line	Discription	Action	Speed	Distance
1	Movement ram	Go to 0	112 mm/min	nvt
2	Pomp	On	nvt	nvt
3	Pause	Acide ok	nvt	nvt
3	Movement ram	Start pos.	**Variable 1**	**Variable 8**
4	Générateur	On	nvt	nvt
5	Movement ram	ECD drilling	**Variable 2**	**Variable 9**
6	Movement ram	ECD drilling	**Variable 3**	**Variable 10**
7	Movement ram	ECD drilling	**Variable 4**	**Variable 11**
8	Movement ram	ECD drilling	**Variable 5**	**Variable 12**
9	Movement ram	ECD drilling	**Variable 6**	**Variable 13**
10	Movement ram	ECD drilling	**Variable 7**	**Variable 14**
11	Générateur	Off	nvt	nvt
12	Pomp	Off	nvt	nvt
13	Pause	Leak out time	35 sec	nvt
14	Washing	Wash cycle	60 / 60 / 60 / 60	nvt
15	Movement ram	Go to 0	112 mm/min	nvt

Variable 1	**Variable 8**
Variable 2	**Variable 9**
Variable 3	**Variable 10**
Variable 4	**Variable 11**
Variable 5	**Variable12**
Variable 6	**Variable13**
Variable 7	**Variable 14**

4.14 Fiche de programme Trous de turbulateurs

N° de série	
Date	N° d'usinage
programmeur	Liste

Line	Discription	Action	Speed	Distance
1	Movement ram	Go to 0	112mm/min	nvt
2	Pomp	On	nvt	nvt
3	Pause	Acid ok	nvt	nvt
4	Movement ram	Start pos.	**Variable 1**	**Variable 8**
5	Generator	On	nvt	nvt
6	Movement ram	ECD drilling	**Variable 2**	**Variable 9**
7	Generator	Off	nvt	nvt
8	Movement ram	Go to	**Variable 4**	**Variable10**
Sub program				
9		Repeat	**Variable 3**	
10	Generator	On	nvt	nvt
11	Movement ram	ECDdrilling	**Variable4**	**Variabe11**
12	Movement ram	ECD drilling	**Variable 5**	**Variable12**
12	Movement ram	ECD drilling	**Variable 6**	**Variable 13**
13	Generator	Off	nvt	nvt
14	Movement ram	Go to	**Variable 4**	**Variable 12**
16	Generator	On	nvt	nvt
17	Movement ram	ECDdrilling	**Variable7**	**Variable14**
18	Generator	Off	nvt	nvt
19	Pomp	Off	nvt	nvt
20	Pause	Leak out time	60 sec	nvt
21	Washing	Wash cycle	60 / 60 / 60 / 60	nvt
22	Movement ram	Go to 0	112 mm/min	nvt

Variable 1	**Variable 8**
Variable 2	**Variable 9**
Variable 3	**Variable 10**
Variable 4	**Variable 11**
Variable 5	**Variable 12**
Variable 6	**Variable 13**
Variable 7	**Variable 14**

4.15 Qualification.

4.15.1 Première étape.

CMM concernant le dessin de pièce et le résultat final du fichier.
Ensuite, nous pouvons commencer par le premier passage en perçant des trous supérieurs et inférieurs.

Contrôle à 100% des trous: diamètre, raccordement, rayons X et mesure de l'épaisseur de paroi.

Après ces inspections, nous allons toutes les autres pièces sur des points d'épaisseur de paroi critiques. De cette façon, nous aurons tous les varus sur le contour concernant les points de localisation nominaux et une pièce maîtresse.

4.15.2 Deuxième étape.

On commence à faire un rapport de mise en page avec les positions d'entrée, de sortie et de connexion.

Une coupe d'une partie sur le point de référence du dessin pour vérifier l'épaisseur de la paroi avec un vernier.

Coupe des petits morceaux en haut et en bas pour les microéchantillons afin de vérifier l'attaque inter granulaire.



Figure 4.15 Pale sans coupe



Figure 4.16 1er coupe contrôle de diamètres

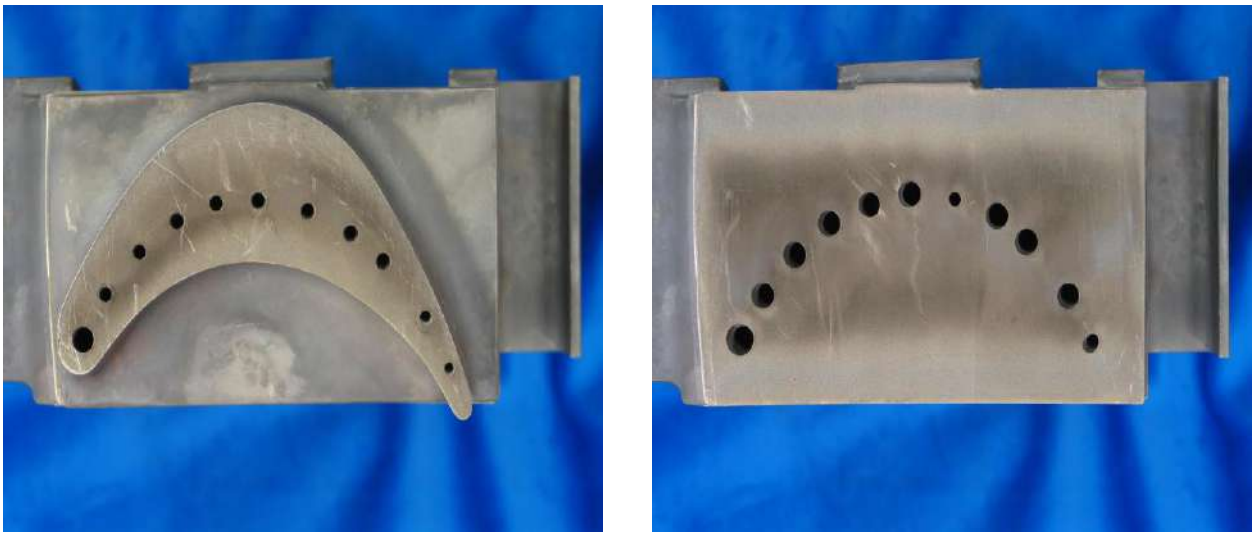


Figure 4.17 2eme coupe contrôle de connexion

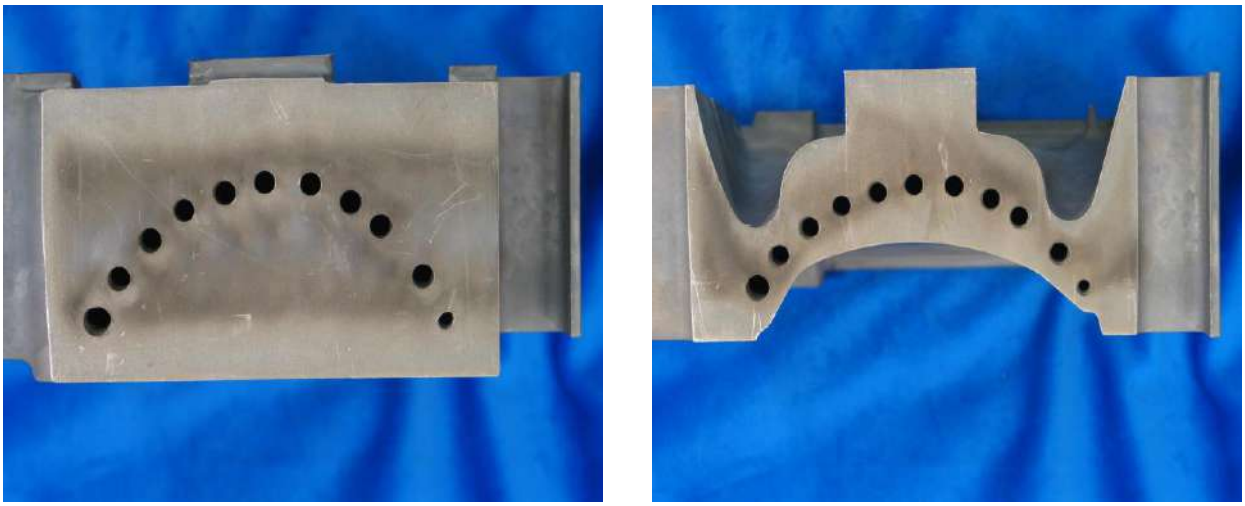


Figure 4.18 3eme coupe contrôle du coté opposé. [12]

4.15.3 Troisième étape.

Premier contrôle d'article sur chaque pièce. Épaisseur de paroi, connexion, diamètre et rayons X.

4.16 Inspection.

L'inspection des pales perforées est très importante pour la qualité des pièces et le contrôle du processus.

L'inspection du premier article peut être une méthode destructive, mais pendant la production, une autre inspection est nécessaire. Un contrôle est déjà mentionné dans le paragraphe 4.10.

4.16.1 Radiographie.

Pour vérifier la qualité des trous et la connexion des trous supérieurs et les trous inferieurs, les rayons X sont indispensables. Cela peut être fait par rayons X à film normal ou par un appareil à rayons X en temps réel.

4.16.2 Épaisseur de la paroi.

L'épaisseur de la paroi peut être contrôlée par une jauge de champ magnétique (Magne Mick)

Une sonde à l'extérieur et un bal à l'intérieur du trou.

Les autres méthodes sont les courants de Foucault, les mesures thermiques ou les ultrasons.

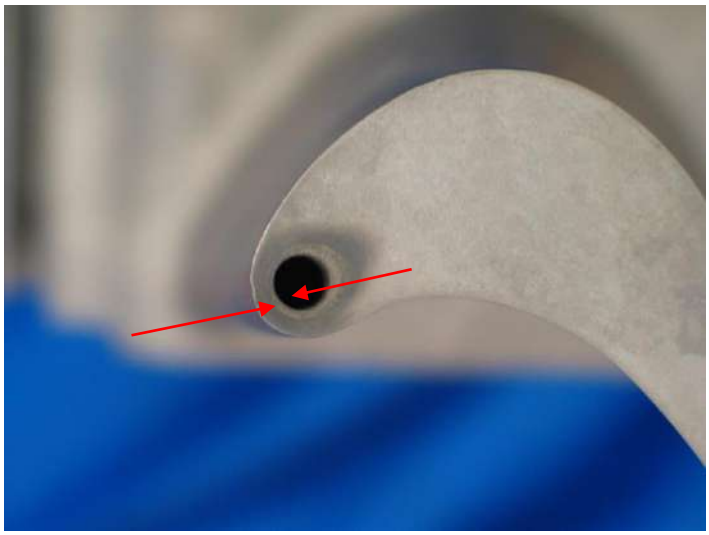


Figure 4.19 Épaisseur de la paroi est bonne

4.16.3 Dimension du trou.

La dimension du trou peut être vérifiée avec une broche calibrée. Une broche GO et NO GO est requise.

4.16.4 Connexion des trous supérieur et inférieur.

Pour vérifier la connexion, on utilise une balle ayant un diamètre de 80% du diamètre du trou supérieur.

4.17 Feuilles de fabrication d'inspection.

Ref: Dessin N° Oper no. : 110

Machine : ..... Equipes : 1 OF 2

Description des opérations: (Quality control ECD top and bottom holes)		Op. Seq.	Tool name/ descr. of oper.	Tool Number
(Diameter Inspection ECD top hole 1)		1	(Pen caliber)	GO ØMM NO GO ØMM
(Diameter Inspection ECD top holes 2 - 10)		2	(Pen caliber)	GO ØMM NO GO ØMM
(Diameter Inspection ECD top hole 11)		3	(Pen caliber)	G ØMM NO GO ØMM
(Diameter Inspection ECD bottom hole 1)		4	(Pen caliber)	GO ØMM NO GO ØMM
(Diameter Inspection ECD bottom holes 2 - 10)		5	(Pen caliber)	GO ØMM NO GO ØMM
(Diameter Inspection ECD bottom hole 11)		6	(Pen caliber)	GO ØMM NO GO ØMM

Ref: Dessin N°

Machine : .....

Oper no. : 110

Equipes : 1 OF 2

Description des opérations: (Quality control ECD top and bottom holes)	Op. Seq.	Tool name/ descr. of oper.	Tool Number
(Connection control hole 1)	7	(Bal caliber)	Ø mm
(Connection control hole 2 - 10)	8	(Bal caliber)	Ø mm
(Connection control hole 11)	8	(Bal caliber)	Ø mm
(Wall thickness airfoil hole 1 – 11)	9		MIN WD LE mm MIN WD TE mm
(Wall thickness shank and root hole 1 – 11)	109	MAGNE MIKE	MIN WD
(Wall thickness shank and root hole 1 – 11)	11	jauge de champ magnétique	MIN WD
(X-ray inspection airfoil, root and connection)	12	X-Ray film	Lichtbak.

4.18 Fiche qualité :

La fiche de qualité et une fiche nécessaire pour le processus ECD, contiens des informations concernant la pièce a usiné, le mode de travaille et les résultats de contrôle.

FICHE QUALITE

N° de série	Fiche N°	
Pièce N°	Date.	QC

N° de série	Opérateur	Date	Øsup	Øinf	Connexion	épaisseur	X-Ray

Conclusion Générale

Les turbines à gaz jouent un rôle important dans les applications aéronautiques et industrielles. Il existe une tendance croissante à utiliser des températures plus élevées à l'entrée de la turbine pour améliorer l'efficacité du moteur à turbine à gaz.

L’air de refroidissement circule à l’intérieur de l’aube par un réseau complexe de canaux. Les méthodes d’usinages conventionnels sont souvent inefficaces de ce type des trous complexe, Surtout pour les matériaux durs, de telles techniques ne conviennent pas. Il faut donc recourir à d'autres moyens. L'un d'eux est de "percer" par électrolyse. C’est une application spécifique de l'ECM (Eletro chemical machining). Par conséquent, nous utilisons l’abréviation E.C.D, dérivée du terme anglais Electro Chemical Drilling. À l'instar des autres processus ECM de la technique ECD, la pièce à usiner est anodisée et une électrode spécialement formée est cathodique.

L'électrode est un tube creux dans lequel l'électrolyte traversant est comprimé. L'électrolyte est fabriqué à partir de Titan et possède une barrière d'isolation au niveau de la couche externe. La barrière d'isolement est retirée uniquement sur les côtés inférieur et supérieur du tube.

Dans ce mémoire, nous avons utilisé le procédé ECD sur une pale de turbine à gaz en superalliage (à base de Nickel) pour usiner des trous complexes de refroidissement.

L’analyse, nous a permet de constaté que la réduction de la concentration entraîne une diminution de la fissure. En plus, l'augmentation de la température de l'électrolyte entraîne une augmentation de la fissure. Finalement, l'augmentation de la vitesse d'alimentation entraîne la diminution de la fissure.

En perspective, on peut essayer ce procédé pour la fabrication des trous de refroidissement des moules à injection plastique.

Références

[1]. Rajurkar, K. P., Wei, B., Schnacker, C. L., (1993). Monitoring and Control of Electrochemical Machining (ECM). Journal of Engineering for Industry, 115-217.

[2]. S. Dangra and S. Dangra, International Journal of Engineering Development and Research, 5 (2017) 1621.

[3]. Hocheng, H.; Sun, Y.H.; Lin, S.C.; and Kao, P.S. (2003). A material removal analysis of electrochemical machining using flat-end cathode. Journal of Materials Processing Technology, 140(1-3), 264-268.

[4]. Bhattacharyya, B.; Malapati, M.; and Munda, J. (2005). Experimental study on electrochemical micromachining. Journal of Materials Processing Technology, 169(3), 485-492

[5]. Hewidy, M. S., (2005) Controlling of metal removal thickness in ECM process. Journal of Materials Processing Technology, 348–353.

[6]. Jo aoCirilo da Silva Neto, EvaldoMalaquias da Silva ,MarcioBacci da Silva, (2006). Intervening variables in electrochemical machining, Journal of Materials Processing Technology, 179, 92–96.

[7]. Stofesky, D.B. (2006). Manufacturing with microECM." Proc. of 2006 ASME Intl. Conf. On Manufacturing Science and Engineering.

[8]. Rajurkar, K.P., Levy, G., Malshe, A., Sundaram, M.M., McGeough, J., Hu, X., Resnick, R., and DeSilva, A. (2006). Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes, Annals of the CIRP, 55(2), 643-666.

[9]. Bhattacharyya, B., Malapati, M., Munda, J., and Sarkar, A. (2007). Influence of tool vibration on machining performance in electrochemical micro-machining of copper. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 47(2), 335-342.

[10]. Sekar T, Marappan R., (2008). Experimental investigations into the influencing parameters of electrochemical machining of AISI 202, Journal of Advanced Manufacturing Systems, 7(2), 337-43.

[11]. Mukherjee, S.K., Kumar, S., Srivastava, P.K., Kumar, Arbind, (2008). Effect of valance on material removal rate in electrochemical machining of aluminum, Journal of Materials Processing Technology, 202, 398–401.

[12]. McGeough, J. (2005). Theory of Electrochemical Machining. http://www.electrochem.cwru.edu/ed/encycl/.

[13]. Wilson, J. F., (1971). Practice and Theory of Electrochemical Machining. Wiley, New York.

[14]. K. Xu, Y.B. Zeng, P. Li, D. Zhu, Journal of Materials Processing, 222 (2015) 103

Int. J. Electrochem. Sci., Vol. 14, 2019 2013.