

I – Analyse

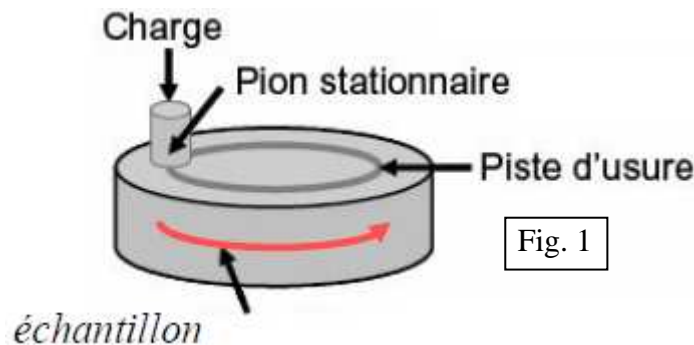
Si la plupart des systèmes aubes/disques de compresseur de réacteurs sont assemblés, certaines aubes sont directement usinées dans la masse. Cependant, l'usinage du titane qui compose ces pièces est réputé difficile et quelques précautions s'imposent. Afin de mieux cerner le problème, des essais de frottement ont été réalisés pour caractériser le comportement de l'alliage de titane. Les résultats serviront ensuite de guide pour l'usinage.

I.1. A votre avis, quelle nuance/famille d'alliage de titane a-t-on choisi pour ces pièces (justifier)

I.2. Pourquoi les aubes ne sont-elles pas soudées au disque rotor ?

II- Essais de frottement.

On utilise un essai de laboratoire type pion/disque présenté sur la Fig. 1 dans lequel un pion fixe terminé par une bille de diamètre 6mm vient frotter contre un disque en Alliage de titane qui est mis en rotation. La charge appliquée sur le pion est ajustable.



II.1. Choix du matériau de la bille : On dispose au laboratoire de bille en acier 100Cr6, en carbure WC et en céramique Al₂O₃. Quelle bille choisiriez vous et pourquoi ? Pourquoi ne doit-on pas choisir de bille en titane ?

II.2. On décide de réaliser les essais avec une bille en WC. Avant l'essai, on équilibre le système et on règle la charge à 2N. A cet instant (statique) quel est le diamètre de l'aire de contact, la pression moyenne et maximale appliquée et la contrainte de cisaillement maximale ? Quel est alors l'endroit du disque le plus sollicité ?

II.3. Considérant les propriétés du matériau, quelle charge minimale doit on appliquer pour avoir plastification complète de l'alliage de Titane dans le contact ?

II.4. On réalise ensuite un essai sous $F=2N$ et on observe un coefficient de frottement de 0.6. Quelle sont les conséquences de ce frottement sur les sollicitations dans le disque ?

II.5. Quelle (s) solution (s) pourriez-vous proposer pour améliorer le comportement en frottement du disque et optimiser sa durée de vie ? (Justifier)

On réalise alors un essai sous $F=120\text{N}$ et à une vitesse de 1m/s . Le coefficient de frottement observé est alors de $\mu=1,2$. Après essais, on constate au démontage que le disque et la bille sont chauds et que la largeur de la trace vaut $2a = 0.24 \text{ mm}$. Par une analyse thermique il est possible d'estimer la température « flash » qui se produit dans le contact avec la formule suivante :

$$T_{flash} = \left(\frac{2}{\pi}\right)^{3/2} \frac{Q}{\lambda \times a} \times \frac{1}{\sqrt{J}}$$

Avec :

$Q = \mu P_{moy} V_f$ = chaleur dégagée par le frottement

V_f = vitesse relative de frottement

λ = conductivité thermique du matériau (on admettra ici qu'elle est constante)

a = rayon du contact

J = coefficient de partage et diffusion de la chaleur.

II.6. Après avoir calculé la pression moyenne dans ce contact plastique (on rappelle $P_{moy} = F/\text{surface du contact}$) et tenant compte des propriétés de l'alliage de titane, estimer la température maximale de contact. On prendra ici $J=10$

II.7. Quels phénomènes peuvent alors être engendrés par cette élévation de température.

II.8. Quelles solutions (justification/explication) pourriez vous proposer pour réduire cet échauffement ?

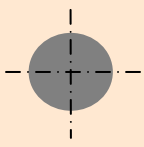
Propriétés de l'alliage de titane utilisé :

Masse volumique : 4410 kg.m^{-3}
 Dureté = 420 HV = 4200 MPa
 Module d'élasticité = 110 GPa
 Limite d'élasticité = 1100MPa
 Coefficient de poisson = 0.3
 Conductivité thermique : $\lambda = 19 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Priorités du carbure de Tungstène WC :

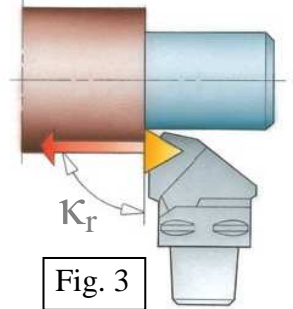
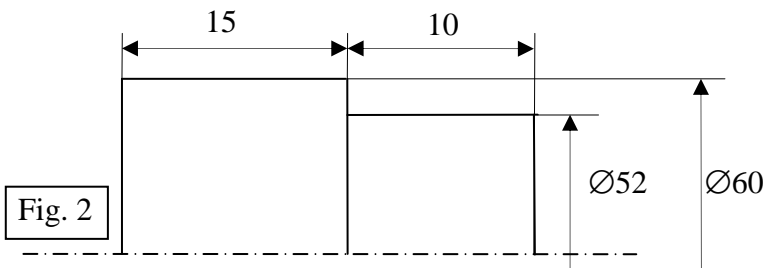
Module d'élasticité = 800 GPa
 Coefficient de poisson = 0.3

Formules du contact de Hertz :

Rayon de contact	Pressions	Déformation	Contrainte de cisaillement
 $a = \left(\frac{3FR^*}{2E^*} \right)^{1/3}$	$p_{\text{moy}} = \frac{F}{\pi a^2}$ $p_{\text{max}} = \frac{3F}{2\pi a^2}$	$\delta_{\text{max}} = \frac{a^2}{2R^*}$	$\tau_{\text{max}} = 0.31 p_{\text{max}}$ <p>Pour une profondeur</p> $z = 0.48a$

$$\frac{1}{E^*} = \left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right]$$

III - Maitrise des conditions de coupe pour l'usinage d'un alliage de Titane en tournage.



A partir de 800°C le titane se combine avec l'azote de l'air (N₂) pour créer un nitrure de titane (TiN) très résistant et réfractaire. Ce constituant provoque une dégradation de l'état de surface de la pièce. L'usinage en tournage du titane nécessite donc de maîtriser la température au niveau de l'outil. L'objectif de l'exercice est de modifier les conditions de coupe pour éviter d'atteindre la température critique de 800°C.

Données techniques :

Plaquette de tournage : Type TPUN (Triangulaire),

Porte plaquette orientant l'arête de coupe de $\kappa_r = 90^\circ$ (Fig. 3)

Profondeur de passe ou hauteur du copeau : $p = 1\text{ mm}$

Vitesse de coupe recommandé : $V_c = 20\text{ m/mn}$; avance par tour $f : 0,05\text{ mm}$

L'usinage est réalisé sur une machine à commande numérique permettant de garantir une vitesse de coupe constante (V_c en m/mn). La vitesse de rotation (N en tr/mn) est donc adaptée au diamètre usiné (D en mm). Rappel : $N = 1000 \cdot V_c / (\pi \cdot D)$

La pression spécifique de coupe ou énergie volumique de coupe $k_c = 2000\text{ Mpa}$ ou 2000 J/cm^3

Densité ou masse volumique : $\rho = 4,41\text{ kg/dm}^3$

Conductivité thermique de l'alliage de titane : $\lambda = 19\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Capacité calorifique : $c = 914\text{ J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Analyses thermiques

Analyse thermique simplifiée de la coupe :

Hypothèses simplificatrices :

- L'énergie consommée par la coupe est entièrement transformée en chaleur dans le copeau.
- Le copeau est isolé thermiquement.
- Le frottement est négligé.

L'énergie nécessaire pour élever la température d'un volume V de matière de ΔT s'exprime sous la forme :

$$E = \rho \cdot V \cdot c \cdot \Delta T$$

L'énergie de déformation pour former le copeau s'exprime sous la forme :

$$E = k_c \cdot V$$

III.1. Déterminer l'expression de l'élévation de température ΔT dans le copeau.

$$\Delta T = T_f - T_i =$$

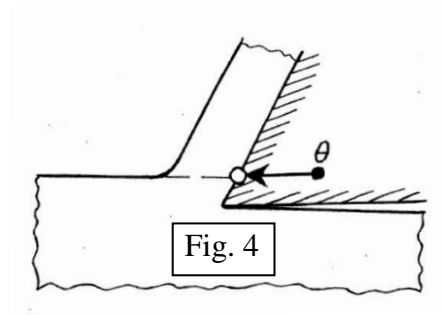
III.2. Calculer la valeur théorique de la température T_f si la température ambiante $T_i = 20^\circ\text{C}$.

$$T_f =$$

Analyse thermique de la coupe :

La température du copeau n'est pas la température critique pour notre problème. Il s'agit de la température θ (Fig. 4) au niveau du contact avec le copeau. Les paramètres influant sont :

- h la hauteur de coupe (ou profondeur de passe)
- V_c la vitesse de coupe
- λ la conductivité thermique au niveau de l'arête de coupe
- $\rho.c$ la capacité thermique volumique



D'où une relation du type :

$$\Delta \theta = f(h, V_c, k_c, \lambda, \rho.c)$$

Expérimentalement, il a été trouvé la relation suivante :

$$\Delta \theta = 0,4 \cdot \left(\frac{V_c \cdot h \cdot \rho \cdot c}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{k_c}{\rho \cdot c}$$

III.3. En se basant sur vos connaissances de l'usinage, et en analysant la relation trouvée expérimentalement, quelles sont, selon vous les phénomènes physiques apportant de l'énergie au point de contact (Fig. 4).

III.4. Calculer l'élévation de température $\Delta\theta$.

$\Delta\theta =$

III.5. Quelle est la vitesse de coupe limite pour laquelle le point de contact serait à 800°C ?

$V_c (\text{lim } 800^\circ\text{C}) =$

IV- Impact environnemental de l'usinage

Pour usiner la pièce souhaitée, l'atelier propose 2 gammes à réaliser sur la même machine.

Gamme 1 sur CN1: outils carbure avec lubrification composée d'huile à 5% et d'eau (4 litre/mn), $V_{c1} = 15$ m/mn. On considère la durée de vie de ce lubrifiant à environ 400h d'utilisation.

Gamme 2 sur CN2: outils carbure revêtu avec lubrification par pulvérisation d'huile ($5\text{cm}^3/\text{mn}$), $V_{c2} = 20$ m/mn. Le lubrifiant n'est pas réutilisable pour d'autres usinages.

IV.1. Calculer les vitesse de rotation N_i pour chaque passe dans l'opération de cylindrage (passage du diamètre 60mm au diamètre 52mm sur une longueur $L=10\text{mm}$)

$N_1 =$
 $N_2 =$
 $N_3 =$
 $N_4 =$

IV.2. Donner l'expression du temps total d'usinage en fonction des diamètres de chaque passe D_i , de L (la longueur usinée), V_c (la vitesse de coupe) et de f (l'avance par tour).

$T_u =$

IV.3. Calculer le temps d'usinage total pour chaque gamme.

$T_{u1} =$ $T_{u2} =$

IV.4. Calculer la quantité de fluide de coupe utilisé pour chaque gamme.

$V_{l1} =$ $V_{l2} =$

A partir des différentes informations (calculs précédents + données en annexe), proposer un calcul comparatif de l'impact écologique des différents usinages proposés. Pour cela vous détaillerez

- vos hypothèses de comparaison (unité fonctionnelle, éléments identiques pouvant être mis hors des frontières du calcul...).

- les principaux flux entrants (matières, ressources...) et sortants pour chaque gamme.

Commenter et critiquer les hypothèses faites et les résultats obtenus

Eco-Indicateurs (extraits Eco99) :

	Millipoint/kg		Millipoint/kg
Ressources		Fin de vie	
Titane 0% recyclé	1230 (chiffre Al)	Recyclage fabrication Titane	-720 (chiffre Al)
Lubrifiant (moyenne)	310	Incineration huile	-12
Eau robinet (France)	0.03	Traitement fluide coupe (eau/huile)	20
Electricité (France)	12 mpt/KWh		

On rappelle que $P_c = K_c \cdot f \cdot h \cdot V_c$ et on admettra un rendement de 80% des machines CN.