

Fondements théoriques et classification des essais accélérés d'usure des outils

J.F. DEBONGNIE

Université de Liège
Laboratoire de Méthodes de Fabrication
Rue E. SOLVAY, 21, 4000 - Liège

1. Introduction

Les essais accélérés d'usure des outils ne sont certes pas nouveaux, puisqu'ils remontent à BRANDSMA [1] en 1936. Mais leur exposé habituel comporte généralement de nombreuses hypothèses superflues qui, finalement, ne font que semer le doute quant à l'applicabilité réelle de ces essais. La présente communication résume les résultats théoriques obtenus dans ce domaine au Laboratoire de Méthodes de Fabrication de l'Université de Liège [1].

L'analyse des justifications proposées montre qu'elles font toujours appel, consciemment ou non, au principe du dommage cumulatif. C'est en premier lieu sur l'approfondissement de ce principe que notre recherche a porté. En effet, nous ressentions la nécessité de l'exprimer d'une manière aussi précise que possible, afin d'en cerner les véritables implications. La comparaison avec d'autres phénomènes physiques nous a amené à définir l'équation d'état d'un outil qui, à notre connaissance, est une notion nouvelle dans le cadre des études d'usinabilité. Il se trouve que le principe du dommage cumulatif équivaut à une forme particulière d'équation d'état, qui semble assez plausible. Du reste, un certain nombre de développements théoriques se simplifient quand on fait usage de l'équation d'état.

Sur cette base, nous avons pu mettre en évidence que si certains essais ne demandent pas d'hypothèse supplémentaire, d'autres, au contraire, font explicitement appel

à une loi d'usure présumée, ce qui est beaucoup moins acceptable. Cette distinction, qui ne semble pas avoir son équivalent dans la littérature, mérite la plus grande attention de la part des expérimentateurs.

2. Définitions

Tout essai d'usure d'outil consiste à mesurer l'évolution d'un paramètre d'usure U en fonction du temps, pour une histoire donnée des conditions de coupe (largeur et épaisseur de coupe, vitesse, ...) que l'on peut représenter par un multiplet \mathbf{x} . On se fixe conventionnellement une certaine valeur U_{\max} pour laquelle l'outil est déclaré hors service. Dans le cas particulier où les conditions de coupe sont constantes, on appelle durée de vie de l'outil le temps d'usinage $T(\mathbf{x})$ qui a mené à l'usure maximale. C'est donc la solution de l'équation

$$(2.1) \quad \int_0^{T(\mathbf{x})} \frac{dU}{dt} dt = U_{\max}$$

3. Conditions de coupe variables

Lorsque les conditions de coupe varient, on fait appel plus ou moins explicitement au principe du dommage cumulatif dont la présentation naïve consiste à dire que pendant un temps élémentaire dt où les conditions de coupe sont \mathbf{x} , on consomme une portion $dt/T(\mathbf{x})$ de la durée de vie. On dit encore que l'on a provoqué un dommage élémentaire

$$(3.1) \quad dD = \frac{dt}{T(\mathbf{x})}$$

Pour une histoire de charge donnée, l'outil sera mis hors service après le temps t^* tel que

$$(3.2) \quad \mathcal{D}(t^*) = \int_0^{t^*} \frac{dt}{T(x(t))} = 1$$

Il est clair que pour $x = \text{constante}$, cette définition donne bien $t^* = T(x)$.

4. Outils DC

La présentation ci-dessus, ne constituant pas une véritable définition formelle du principe, ne permet pas d'en cerner les implications. Nous l'axiomatiserons en disant qu'un outil vérifie le principe du dommage cumulatif, ou que *c'est un outil DC* si sont remplies les conditions suivantes:

(4.1) *Il existe une fonction durée de vie*

$$x \longmapsto T(x)$$

(4.2) *Le dommage est défini par l'équation*

$$d\mathcal{D} = dt/T$$

et la condition $\mathcal{D} = 0$ lors de la première mise en service.

(4.3) *L'usure ne dépend que du dommage, suivant la loi d'usure*

$$U = G(\mathcal{D})$$

G étant une fonction croissante telle que

$$G(0) = 0 \quad \text{et} \quad G(1) = U_{\max}$$

Insistons sur le fait qu'il n'est nullement nécessaire que la loi d'usure soit linéaire, comme d'aucuns semblent le croire.

5. Equation d'état

En admettant que la mémoire de l'outil est correctement représentée par le seul paramètre U , on est amené à écrire

$$(5.1) \quad \frac{dU}{dt} = F(U, x)$$

C'est ce que nous appellerons *l'équation d'état* de l'outil. La

fonction $F(U, x)$ doit être *positive*, car l'usure va toujours croissant. On peut alors démontrer le théorème suivant [1,2]: *Un outil est DC si et seulement si son équation d'état est séparée, c'est-à-dire de la forme*

$$(5.2) \quad \frac{dU}{dt} = A(U).B(x)$$

avec

$$(5.3) \quad A(U) > 0 \quad \text{et} \quad B(U) > 0$$

On notera que cette dernière hypothèse est assez plausible dans bien des cas.

6. Loi de Taylor - outils DCT

Il est généralement admis que, pour une gamme raisonnable de vitesses de coupe, la durée de vie peut être approchée par une expression de la forme

$$(6.1) \quad T = C(h, b, \dots) v^{-m}$$

où C dépend notablement de l'épaisseur de coupe h et à un moindre degré des autres paramètres géométriques. C'est la *loi de Taylor*. Nous qualifierons de DCT un outil qui vérifie à la fois le principe du dommage cumulatif et la loi de Taylor. On peut montrer [1] que l'équation d'état d'un tel outil est de la forme

$$(6.2) \quad \frac{dU}{dt} = A(U) \cdot \frac{\mathcal{F}}{C(h, b, \dots)} v^m$$

avec

$$(6.3) \quad \mathcal{F} = \int_0^{U_{\max}} \frac{dU}{A(U)}$$

L'hypothèse d'un outil DCT permet d'envisager des essais à *vitesse variable* conduisant rapidement et à peu de frais à la détermination des deux constantes C et m de la loi de Taylor. Ces *essais accélérés de coupe* (*Kürzprüfverfahren* [7]), introduits par BRANDSMA [6] en 1936, sont d'un grand intérêt économique.

7. Classification des essais de coupe accélérés

Tous les essais de coupe accélérés reposent sur l'hypothèse d'un outil DCT. Mais certains font en outre une hypothèse *a priori* sur la loi d'usure, le plus souvent choisie linéaire, bien que l'on puisse en imaginer d'autres, plus proches de la réalité. Nous passerons rapidement en revue les principales méthodes proposées.

a) *L'essai de JANSSEN* [3] consiste à dresser une surface plane au tour, en partant du voisinage du centre préalablement percé d'un trou. Comme paramètre U , on adopte la *dérive de la cote* (Il est à noter que ce paramètre, qui est une conséquence de l'usure, a une grande importance technologique, car la précision dimensionnelle des pièces en dépend). Après avoir poursuivi l'essai suffisamment loin, on repère le diamètre où cette dérive atteint son maximum U_{\max} . En ce point, par définition, le dommage vaut l'unité. A partir de deux essais au moins, à des fréquences de rotation différentes, il est possible de déterminer les deux constantes C et m de la loi de Taylor par les formules suivantes: si, lors de deux essais 1 et 2, l'usure de référence a été obtenue en des points où les vitesses valaient v_1 et v_2 et si les accélérations des deux essais sont a_1 et a_2 , on a

$$(7.1) \quad m \cong \frac{\log(a_1/a_2)}{\log(v_2/v_1)} + 1$$

$$(7.2) \quad C \cong \frac{1}{a_1} \frac{v_2^{m+1}}{m+1}$$

Cet essai ne nécessite aucune hypothèse sur la loi d'usure et est donc de la classe la plus générale, s'appliquant à tout outil DCT.

b) *L'essai de MATHON* [4], utilisé à la Régie Renault, est une variante

du précédent, la seule différence se situant dans la méthode de calcul. Nous n'en donnerons pas les détails, que l'on peut trouver ailleurs [1,5]. Cet essai a donc le même champ d'application que celui de JANSSEN.

c) *L'essai de KASINCZY* [5], en apparence très voisin des précédents, en diffère cependant par le fait qu'au lieu de repérer le diamètre où se produit l'usure de référence, on mesure l'usure réalisée en un diamètre donné. Il faut alors en déduire la valeur du dommage en ce point, ce qui n'est possible qu'en faisant appel à une loi d'usure déterminée d'avance. On a alors, si N_1 et N_2 sont les fréquences de rotation et D_0 et D les diamètres de départ et d'arrivée,

$$(7.3) \quad \frac{D_2}{D_1} = \frac{G^{-1}(U_2)}{G^{-1}(U_1)} = \left[\frac{N_2}{N_1} \right]^{m-1}$$

d'où

$$(7.4) \quad m = 1 + \frac{\log(D_2/D_1)}{\log(N_2/N_1)}$$

et en introduisant la nouvelle grandeur

$$(7.5) \quad K = \frac{D_1}{N_1^{m-1}}$$

on obtient

$$(7.6) \quad C = \frac{\pi^m}{2(m+1)fK} (D^{m+1} - D_0^{m+1})$$

où f est l'avance par tour. La difficulté de cette méthode est que l'on ne connaît pas la loi d'usure $U = G(D)$. KASINCZY la suppose linéaire, $U = U_{\max} D$, ce qui constitue une hypothèse très restrictive et rarement vérifiée en pratique. Cet essai est donc d'une validité très discutable.

d) L'essai de *KLANG-BARROW* [5] consiste à charioter une succession de n cylindres de longueur identique et de diamètres étagés en progression géométrique de raison r . On mesure alors l'usure en fin de processus. On peut montrer que pour deux essais réalisés à des fréquences de rotation N_1 et N_2 , on a successivement

$$(7.7) \quad \frac{D_1}{D_2} = \frac{G^{-1}(U_1)}{G^{-1}(U_2)}$$

$$(7.8) \quad m = 1 + \frac{\log(D_1/D_2)}{\log(N_1/N_2)}$$

et, en introduisant la grandeur auxiliaire

$$(7.9) \quad K = \frac{D_1}{N_1^{m-1}}$$

on peut déduire C de

$$(7.10) \quad C = \frac{\pi^m D_1 \ell}{K f} \frac{r^{nm-1}}{r^m - 1}$$

où ℓ est la longueur d'une portée cylindrique et f , l'avance. Ici encore, on a besoin de la loi d'usure et, à défaut de mieux, on pose généralement

$$U = G(D) = U_{\max} D$$

comme dans l'essai de *KASINCZY*. Les résultats de cet essai sont donc tout aussi discutables. Bien plus, on ne voit pas comment le modifier simplement car, à supposer que l'on détermine le point où l'usure atteint sa valeur de référence, ce point sera généralement situé au beau milieu d'une portée cylindrique, ce qui complique singulièrement les calculs.

8. Conclusions

Les essais accélérés d'usure d'outil

supposent donc tous l'outil DCT. Mais il faut bien distinguer les essais consistant à chercher quand s'obtient l'usure de référence (*JANSSEN, MATHON*) des essais où l'on mesure l'usure après un processus donné (*KASINCZY, KLANG-BARROW*). Ces derniers, en effet, se fondent sur l'adoption *a priori* d'une loi d'usure particulière et sont donc moins généraux que les premiers. Cette distinction, fondamentale pour les applications, ne semble pas avoir été relevée jusqu'ici. Il faut sans doute en chercher la raison dans la confusion fréquente entre principe du dommage cumulatif et loi d'usure linéaire.

8. Bibliographie

1. J.F. DEBONGNIE - "Fondements théoriques des essais accélérés d'usure des outils" - Université de Liège, Rapport LMF/D25, Mai 1993
2. J. LEMAITRE, J.L. CHABOCHE - *Mécanique des matériaux solides* - 2e éd., Dunod, Paris, 1988
3. W.G. JANSSEN - *Polytechnisch Tijdschrift*, 17.11.61, pp. 1038 sqq.
4. P. MATHON - "Essais de coupe accélérés" - *Revue Mécanique, Matériaux, Electricité du GAMI*, n°321, oct. 1976
5. P. PADILLA, B. ANSELMETTI, L. MATHIEU, M. RABOYEAU - *Production mécanique* - Collection Génie mécanique, Dunod, Paris, 1986
6. W.F. BRANDSMA - "Het onderzoek van de beitelpunt" - *Metaalbewerking*, 2, 1936, pp 541 sqq.
7. H. SCHALLBRÖCH, H. BETHMANN - *Kürzprüfverfahren der Zerspanbarkeit* - Teubner, Leipzig, 1950