

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 105 (1979)
Heft: 13

Artikel: Comportement des meules corindon-polyimide
Autor: Stalder, Bernhard
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73838>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 22.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Comportement des meules corindon-polyimide

par Bernhard Stalder, ing. EPFL

Les exigences accrues demandées aux meules travaillant sans liquide de refroidissement incitent les industriels à étudier le remplacement des liants phénoliques habituels par des résines dont le comportement thermomécanique est meilleur. Parmi ces dernières figurent les polyimides. On a tenté dans ce travail de définir la mise en œuvre la plus favorable pour l'utilisation de ces matériaux.

Des hypothèses ont été faites et vérifiées qui permettent de calculer et de comparer les vitesses d'usure des divers échantillons de meules produits. On a obtenu deux facteurs qui, associés aux caractéristiques mécaniques, ont permis de définir les limites inférieures et supérieures de quantité de liant nécessaire. Il s'agit respectivement de la vitesse d'usure de la meule et de son efficacité de travail. La pression de moulage est limitée inférieurement par la réticulation de la résine et supérieurement par l'écrasement des grains d'abrasifs.

Introduction

Une meule est constituée principalement de grains abrasifs, tels le corindon Al_2O_3 , le carborundum SiC ou le diamant. On lie ces grains entre eux soit en réalisant une fusion partielle qui les agglutine, soit en ajoutant une « colle ». Plusieurs polymères thermodurcissables peuvent remplir ce rôle.

Lors du meulage, la tâche principale du liant est de tenir fermement les grains superficiels qui sont en contact avec le matériau meulé. Pendant cette opération, une meule de rectification peut atteindre une température moyenne voisine de 200°C. Certains points de la surface peuvent cependant dépasser 1000°C pendant un court instant, comme en témoignent les petites sphères d'acier fondu que l'on trouve dans les déchets de meulage.

Pendant le meulage à haute vitesse, le liant qui entoure les grains abrasifs superficiels est soumis à de très fortes sollicitations thermomécaniques [1].¹ Les résines phénoliques ne sont pas toujours capables de les supporter, d'où une usure rapide par défaut d'ancrage des grains abrasifs.

Les polyimides font partie des rares polymères qui peuvent supporter des températures supérieures à 300°C [2, 3]. C'est pourquoi, on commence à étudier leur emploi comme liants. Les problèmes causés par leur utilisation proviennent du fait qu'ils doivent être moulés — ce sont des matières thermodurcissables — à plus de 200°C sous une pression supérieure à 100 bars. Pour des raisons de coût, l'industrie cherche à réduire au

minimum les valeurs de la pression de moulage P_f et du pourcentage de résine K nécessaire pour lier les grains abrasifs. Il faut toutefois assurer une qualité suffisante. Cette dernière peut être caractérisée par exemple par la résistance à la compression et l'aptitude au meulage.

Le travail de meulage

Nous désirions mesurer expérimentalement une valeur caractéristique d'un échantillon de meule qui décrive la vitesse d'usure d'un échantillon de meule. Le dispositif expérimental schématisé en figure 1 a été utilisé.

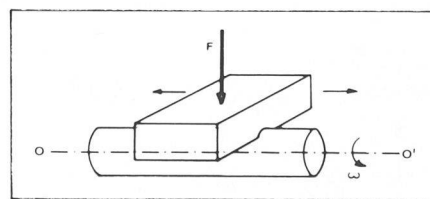


Fig. 1.

Un cylindre de métal tournant à une vitesse ω tours/min supporte une éprouvette de meule appuyée avec une charge F et subissant un mouvement latéral lent. L'empreinte marquée par le métal est cylindrique. Sa surface varie en fonction du temps. Des travaux expérimentaux antérieurs [4, 5] ainsi que nos propres expériences ont permis de faire les hypothèses suivantes :

- a) Le mécanisme d'usure est le même pour la meule que pour le métal.
- b) La perte de poids par unité de temps est constante si la vitesse de glissement, $2\pi\omega r$, la surface des contacts et la charge F ne varient pas.

- c) La perte de poids dépend linéairement de la distance de frottement indépendamment de la vitesse de rotation relative des pièces en contact.
- d) Le diamètre du cylindre de métal reste constant. En réalité, r varie jusqu'à environ -10 % de sa valeur initiale.
- e) La perte de poids par unité de temps dépend linéairement de la surface de contact.
- f) La perte de poids est aussi directement proportionnelle à la contrainte moyenne $\frac{F}{S}$.

Ces hypothèses impliquent que la perte dP par temps dt est donnée par :

$$[dP_* = 2\pi\omega\rho_*w_*S(t)\frac{F}{S(t)}dt = 2\pi\omega\rho_*w_*Fdt] \quad (1)$$

$$* = \begin{cases} m = \text{meule} \\ a = \text{acier} \end{cases}$$

ω = vitesse de rotation du cylindre en [t/min]

$2\pi\omega r$ = vitesse périphérique du cylindre en [cm/min]

r = rayon initial du cylindre de métal en [cm]

ρ_* = poids volumique du matériau *

$S(t)$ = surface de contact en [cm²]

F = charge appliquée en [N]

w_* = facteur d'usure dépendant du matériau *, en [cm²/N]

Le facteur $\frac{1}{w_*}$ correspond à une « dureté »

du matériau *. Il est fonction des caractéristiques mécaniques et abrasives de l'autre matériau en contact.

En intégrant la relation (1), on trouve :

$$\frac{\Delta P_*}{\Delta t} = 2\pi\omega\rho_*w_*F = \text{constante.}$$

Pour chaque échantillon testé, nous avons constaté qu'il existe effectivement une relation expérimentale de la forme

$$\Delta P_* = a_{0*} + a_{1*}t.$$

En réduisant cette équation sous forme d'un graphe

$$t'_* = \frac{\Delta P_* - a_{0*}}{a_{1*}} \text{ en fonction de } t,$$

nous pouvons montrer que les hypothèses énoncées sont vérifiées (voir fig. 2).

La dispersion des points expérimentaux est toutefois plus grande pour la meule ($r_m^2 = 0,946$, $r_a^2 = 0,990$). L'équation utilisée implique l'homogénéité de structure des deux matériaux qui n'est qu'approximative dans le cas de la meule. Les écarts observés pour des temps proches de $t = 0$ sont dus à un processus d'initiation.

Les facteurs d'usure w_a et w_m sont donc caractéristiques de l'ensemble métal-

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

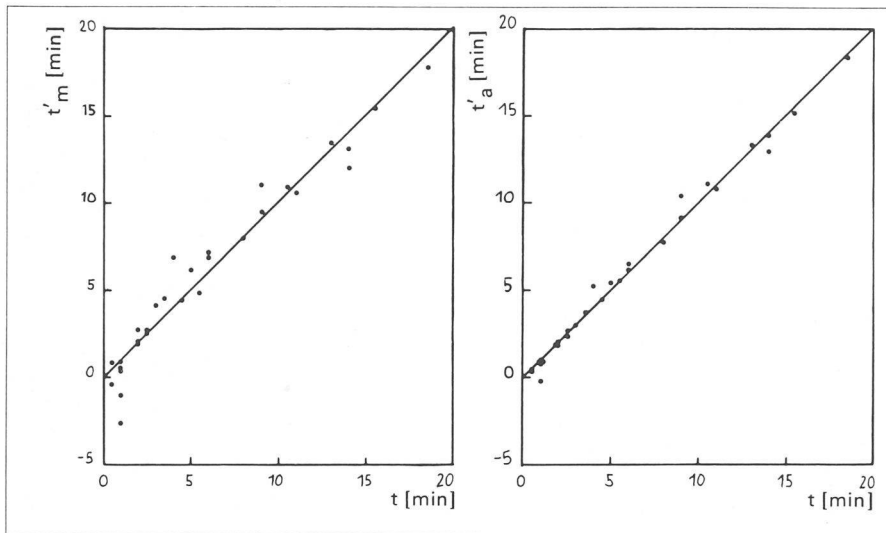


Fig. 2.

meule pour des matériaux donnés. Le facteur w_a ne sera pas utilisé puisqu'il dépend d'une manière inconnue des caractéristiques mécaniques variables des échantillons de meule.

Le facteur w_m dépend de ρ_m , le poids volumique de l'échantillon de meule

$$w_m = \frac{1}{2\pi\omega r F} \cdot \frac{dP_m}{dt} \cdot \frac{1}{\rho_m} \quad (2)$$

Cette formule est donc d'un emploi peu commode. Il est par contre facile de mesurer l'empreinte laissée dans la meule par le cylindre après un certain temps (voir fig. 3). On peut calculer la relation $S(t)$.

$$dP_m = 2\pi\omega r \rho_m w_m F dt \quad (3)$$

$$dP_m \simeq S \cdot dh \cdot \rho_m$$

$$\text{et } dh = \frac{1}{2} r \sin \frac{\alpha}{2} d$$

$$S = br\alpha \rightarrow \alpha = \frac{S}{br} \rightarrow \sin \frac{\alpha}{2} = \sin \frac{S}{2br}$$

Il vient :

$$dP_m \simeq \frac{\rho_m}{2b} \cdot S \cdot \sin \frac{S}{2br} \cdot dS \quad (4)$$

en égalant (3) et (4)

$$2\pi\omega w_m F dt = \frac{S}{2br} \cdot \sin \frac{S}{2br} \cdot dS,$$

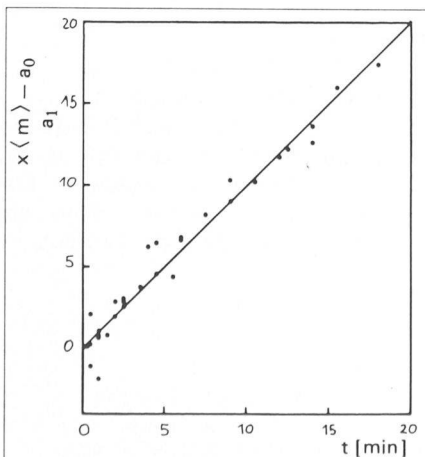


Fig. 4.

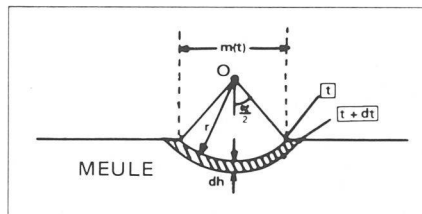


Fig. 3.

en intégrant avec $S = 0$ en $t = 0$:

$$\frac{\pi\omega w_m F}{br} \cdot t = \sin \frac{S}{2br} - \frac{S}{2br} \cdot \cos \frac{S}{2br},$$

en posant

$$x = \frac{\pi\omega w_m F}{br} \cdot t$$

et

$$y = \frac{S}{2br} = \frac{\alpha}{2}, \alpha \text{ et } y \text{ en radians}$$

on trouve

$$x = \sin y - y \cos y \quad (5)$$

Le facteur d'usure devient :

$$w_m = \frac{br}{\pi\omega F} \cdot \frac{dx}{dy} \quad (6)$$

Cette relation est indépendante de ρ_m , et $\frac{dx}{dy}$ peut être calculé facilement grâce aux résultats expérimentaux.

La figure 4 montre les résultats que nous avons trouvés en mesurant la largeur de l'empreinte m en fonction de t . On peut noter que le coefficient de détermination, r^2 , est meilleur ($r^2 = 0,963$) que celui obtenu par mesure de la perte de poids. En fonction de la largeur de l'empreinte m , on peut calculer que

$$y = \arcsin \left(\frac{m}{2r} \right)$$

$$\text{ou } S = 2br \arcsin \left(\frac{m}{2r} \right) \quad (7)$$

En admettant que $S = 0$ en $t = 0$, on a :

$$\Delta P_a = 2\pi\omega r \rho_a w_a F t$$

$$\Delta P_m = 2\pi\omega r \rho_m w_m F t$$

$$\text{Le rapport } \gamma = \frac{\Delta P_a}{\Delta P_m} = \frac{\rho_a w_a}{\rho_m w_m} \quad (8)$$

décrit le comportement de l'ensemble métal-meule. En plus de w_m , γ contient encore un terme dépendant du pouvoir abrasif de la meule (contenu dans le facteur d'usure w_a).

En résumé, w_m décrit la vitesse d'usure de la meule et γ l'efficacité du travail. Une bonne meule est caractérisée par des

valeurs élevées de $\frac{1}{w_m}$ et de γ .

Expériences réalisées

Ces expériences avaient pour but de mesurer l'évolution des paramètres γ et w_m ainsi que la résistance mécanique en fonction de la pression de moulage du composite et de sa composition. Cette étude permet de définir les conditions de mise en œuvre optimales.

Des grains de corindon d'une taille moyenne de 0,8 mm ont été mélangés à de la résine polyimide KERIMID 1050 de Rhône-Poulenc dans des proportions de 4, 6, 8, 10 et 13 % du poids total. Ce mélange a été moulé en éprouvettes de $50 \times 25 \times 25$ mm à une température de 250°C et sous une pression P_f égale à 90, 270, 540 ou 1090 bars. Des recuits ont été effectués respectivement à 190°C et à 245°C pendant 24 heures. L'ensemble des éprouvettes a été soumis à deux essais :

- un essai de compression, effectué sur des demi-éprouvettes de $25 \times 25 \times 25$ mm afin de mesurer la contrainte maximum avant la rupture, σ_m . L'essai a été réalisé à 160°C et 215°C . La vitesse de déformation a été fixée à $0,004 \text{ min}^{-1}$.
- un essai de simulation de meulage, basé sur le principe décrit précédemment, a permis de mesurer les caractéristiques $\log \frac{1}{w_m}$ et γ .

Résultats

L'examen des valeurs de $\frac{1}{w_m}$ en fonction

de P_f et K a montré qu'il existe une zone de transition où ce facteur chute brutalement si P_f ou K diminuent (voir fig. 5). Cette même zone de transition apparaît dans les résultats des essais de compression. Au-dessous de cette zone, σ_m ne dépasse pas 30 MPa . L'augmentation de la température de recuit de 190 à 245°C

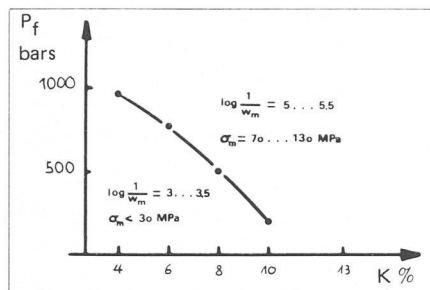


Fig. 5.

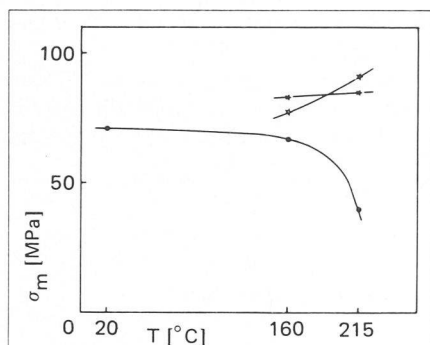


Fig. 6.

- meule à liant phénolique
- meules à liant polyimide ($P_f = 540$ bars, $K = 10\%$), T_{recuit} égale resp. à 190°C et 245°C

est néfaste. La résistance baisse aussi avec la température d'essais.

Au-dessus de la zone de transition, σ_m est voisin de 100 MPa . Un recuit effectué à 245°C devient favorable par rapport à un autre effectué à 190°C . La contrainte σ_m est plus élevée à 215°C qu'à 160°C . Cet effet n'a pas pu être expliqué de façon certaine. Une des conséquences pratiques est qu'une augmentation de la température de la meule n'affaiblit pas cette dernière comme dans le cas d'une meule à liant phénolique (voir fig. 6).

L'existence d'une zone de transition provient de la résine. Lorsqu'elle est moulée pure, il est nécessaire de comprimer le prépolymère à plus de 100 bars pour assurer une réticulation optimale des chaînes. Des essais ont montré que si P_f est inférieur à cette limite, la résine se fissure fortement lors du recuit ce qui provoque une baisse importante de la résistance mécanique.

Dans les meules, les interstices présents entre les grains de corindon contiennent de la résine. S'il y en a plus que 13 %, le composite obtenu est totalement dense. La pression est intégralement transmise à la résine. Une valeur de 100 bars est suffisante pour obtenir la réticulation de la résine. Par contre, si K est plus faible que 13 %, il faut augmenter la pression pour favoriser le réarrangement des grains, diminuer le volume des interstices et assurer la pression minimale effective de 100 bars sur la résine. Cette augmentation de pression provoque aussi un écrasement des grains. La taille moyenne des grains passe ainsi de 0,8 mm à 0,4 mm. Les grains de très petite taille contribuent encore à réduire la porosité.

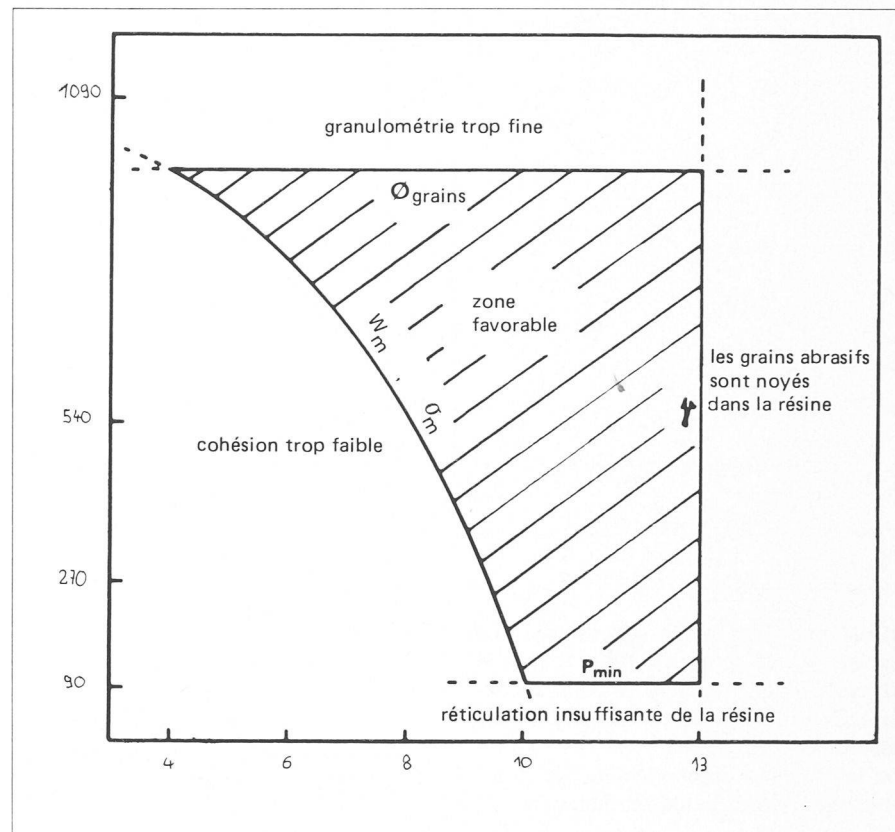


Fig. 7.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] DESRUISSEAU, N., ZERKLE, R. D.: *Thermal analysis of the grinding process*, Trans. ASME, 428-433 (1970).
- [2] HENSEL, J. D.: *When and how to use polyimides*, Plast. Eng. 10 (33), 20-30 (1977).
- [3] SROOG, C. E.: *Polyimides*, Macromol. Rev. 161 (11), 161-208 (1976).
- [4] BUTTERY, T. C., ARCHARD, J. F.: *Grinding and abrasive wear*, Proc. Inst. Mech. Engrs 185 (43), 537-551 (1970-71).
- [5] LAL, G. K., MATSUO, T., SHAW, M. C.: *An investigation of the wear of abrasive grains by rubbing on ferrous and non-ferrous surfaces*, Wear 24, 279-293 (1973).

Cet effet, s'il permet d'améliorer la résistance mécanique, défavorise le travail d'abrasion. La meule ne permet plus une rectification, mais seulement un polissage. Il existe donc une limite supérieure de pression admissible.

Le facteur γ est influencé par la même transition. De plus, il existe un maximum pour environ 10 % de résine. Au-dessus de 13 %, la cohésion de la meule n'est pas modifiée, par contre la diminution de la densité superficielle des grains de corindon diminue l'efficacité γ du meulage. Autrement dit, on travaille avec moins d'aspérités abrasives. On peut donc enlever moins de métal dans un

temps donné. W_m restant à peu près constant, le rapport γ est diminué.

La zone de mise en œuvre optimale est délimitée par les critères que nous avons examinés, à savoir :

- la contrainte maximale σ_m ainsi que le facteur W_m qui limite inférieurement les valeurs de P_f et K à la zone de transition,
- le facteur γ qui limite supérieurement la quantité de résine à environ 13 % du poids total,
- la modification de la granulométrie par le moulage qui limite supérieurement la pression à une valeur comprise entre 800 à 1000 bars, suivant les exigences.

La figure 7 met cette zone en évidence.

Remerciements

Je tiens à remercier vivement ici le Professeur Kausch, qui a assuré la direction de ce travail, M. Dettenmaier, Dr sc. et M. Jud de leurs suggestions et leur collaboration ainsi que M. Fleury qui a réalisé les montages expérimentaux.

Adresse de l'auteur :
Bernhard Stalder, ing. EPFL
Laboratoire de polymères
Ecole polytechnique fédérale
de Lausanne