

Usinage par extrusion de pâte abrasive

par **Lawrence RHOADES**

Président d'Extrude Hone Corporation

Hilary CLOUSER

Conseiller scientifique d'Extrude Hone Corporation

et **Arnaud SCELLIER**

Responsable technique d'Extrude Hone France

1. Caractéristiques du procédé.....	B 7 235 - 2
2. Équipement.....	— 3
3. Possibilités du procédé	— 3
3.1 Exemple : finition d'une matrice d'extrusion d'aluminium.....	— 3
3.2 État de surface et enlèvement de matière	— 4
4. Applications	— 5
Pour en savoir plus.....	Doc. B 7 235

L'usinage par extrusion de pâte abrasive (en anglais : Abrasive Flow Machining, ou AFM) est utilisé pour finir les surfaces et arêtes en extrudant une pâte abrasive visqueuse à travers une pièce ou autour d'une pièce. L'abrasion a lieu uniquement dans les zones de restriction de l'écoulement ; les autres zones ne sont pas affectées. L'usinage par extrusion de pâte abrasive permet de façonner simultanément plusieurs cavités sur une même pièce ainsi que de traiter plusieurs dizaines de pièces dans un seul montage. L'outillage peut être conçu pour que son changement soit réalisé en quelques minutes pour des applications de production.

L'extrusion de pâte abrasive est utilisée pour ébavurer et polir des surfaces ou rayonner (arrondir) des arêtes. Une grande variété de résultats peut être obtenue par des changements des paramètres du procédé. Ce procédé embrasse un grand nombre d'applications, depuis les composants critiques de l'aérospatial et du médical jusqu'aux pièces en grande série : il peut tenir des cadences de production atteignant des centaines, voire des milliers, de pièces à l'heure.

1. Caractéristiques du procédé

Le procédé d'extrusion de pâte abrasive utilise deux cylindres opposés pour extruder une pâte abrasive semi-solide par des allers et retours à travers les passages formés par la pièce et le montage (figure 1). En répétant l'extrusion d'un cylindre à l'autre, la pâte produit une abrasion lorsqu'elle entre dans un passage restreint dans la pièce ou autour de la pièce. L'action d'usinage est similaire à une opération de rectification ou rôdage, la pâte abrasive polissant légèrement les surfaces et arêtes.

Le procédé est abrasif seulement dans les zones de restriction de l'écoulement. Quand on force la pâte dans une restriction, la viscosité du polymère porteur augmente temporairement, ce qui maintient rigidement les grains abrasifs en place. Ils abrasent les passages seulement lorsque le polymère est dans cet état de viscosité accrue. La viscosité reprend sa valeur normale quand la portion de pâte sort de la restriction.

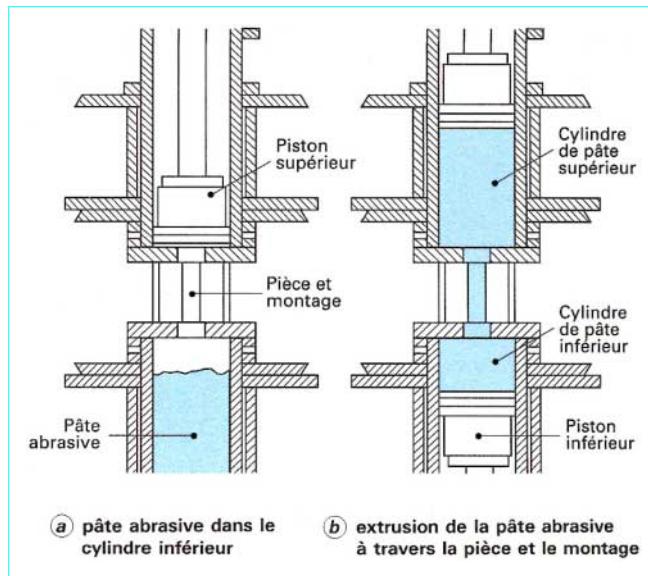


Figure 1 – Schématisation du procédé d'usinage par extrusion de pâte abrasive

La viscosité et le débit influent sur l'uniformité de l'enlèvement de matière et la taille des rayons d'arêtes. Si le but recherché est un polissage uniforme des surfaces des passages restreints, comme lors du polissage des matrices par exemple, la pâte doit être choisie pour maintenir un débit de pâte uniforme tout au long du passage (figure 2a). De faibles débits de pâte sont adaptés à un enlèvement de matière uniforme. Pour ébavurer et rayonner les arêtes d'un passage, un fort débit de pâte à basse viscosité permet d'abréger les arêtes plus que les parois (figure 2b). Le débit de pâte dépend des réglages de la machine, de la formulation de la pâte et de la configuration pièce-montage.

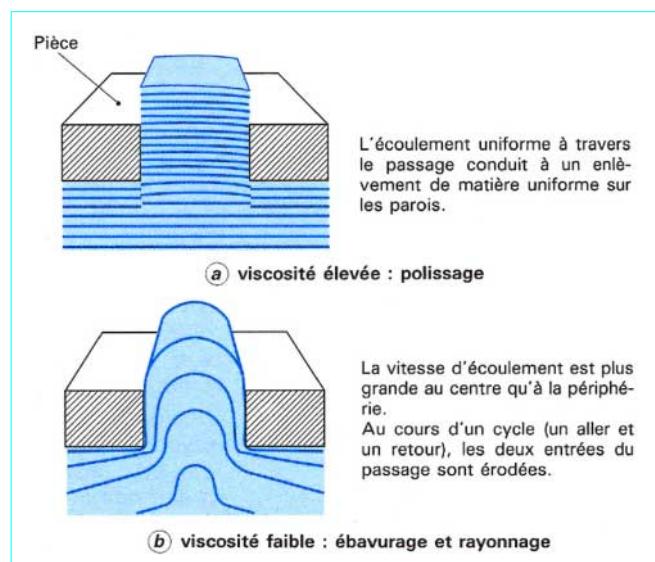


Figure 2 – Différents résultats suivant la viscosité et le débit de la pâte abrasive

2. Équipement

Les éléments principaux d'un système d'abrasion par extrusion de pâte abrasive comprennent la machine, l'outillage et la pâte abrasive. Chacun d'eux est présenté ci-après.

Les **machines** d'abrasion par extrusion de pâte abrasive sont disponibles avec des pressions d'extrusion allant de 700 à 22 000 kPa (7 à 220 bar) et des débits d'écoulement pouvant atteindre 380 L/min (les débits typiques vont de 1 à 50 L/min). Le débit de pâte dépend de la pression d'extrusion, de la viscosité de la pâte et de la configuration pièce-montage. La pression d'extrusion et le volume total de pâte extrudée (le déplacement de chaque cylindre multiplié par le nombre total de cycles aller-retour) sont réglables.

Des systèmes de régulation peuvent être ajoutés pour mesurer et régler des paramètres additionnels tels que température, viscosité, usure et vitesse d'écoulement de la pâte. Les systèmes d'extrusion conçus pour des applications de production de série comprennent des postes de nettoyage et de chargement-déchargement des pièces ainsi que des unités de maintenance et de refroidissement de la pâte. Les systèmes automatisés permettent de traiter des milliers de pièces par jour, avec des temps de traitement s'échelonnant de 1 à 3 minutes par palette chargée de pièces.

Le **montage** a pour fonctions de maintenir la pièce en place et de diriger la pâte abrasive vers les zones appropriées. De nombreuses applications se contentent d'un outillage très simple. Les matrices, par exemple, ne nécessitent aucun montage spécifique, car la matrice elle-même fournit la restriction pour l'écoulement.

Pour les surfaces et arêtes externes, le montage est utilisé pour restreindre l'écoulement entre l'extérieur de la pièce et l'intérieur du montage (figure 3), dans les zones où l'abrasion est désirée. Il peut aussi bloquer l'écoulement dans les zones qui doivent rester non affectées.

Les outillages de production de série sont conçus pour faciliter le chargement, le déchargement et le nettoyage des pièces. Souvent montés sur des tables rotatives indexables, ces montages peuvent tenir plusieurs pièces pour les traiter en une seule opération.

La **pâte** est composée d'un support polymère déformable et de grains abrasifs. La viscosité du support ainsi que la nature et la dimension des grains peuvent être modifiées pour produire des effets spécifiques. Les pâtes à haute viscosité sont presque solides et sont utilisées pour polir uniformément les parois des larges passages. Les pâtes à faible viscosité sont en général appropriées pour *rayonner* les arêtes et traiter les passages de faible section.

Le support est un mélange d'un polymère viscoélastique et d'un fluide de lubrification. En changeant les proportions entre le polymère et le fluide lubrifiant, on règle la viscosité du support entre très hautes et de très basses valeurs.

Le tableau 1 fournit les règles générales de sélection de la viscosité du support pour des passages dont le rapport longueur/largeur est de 2. Si la longueur du passage est nettement plus petite que 2 fois sa largeur, il faut utiliser une pâte plus visqueuse ou une pression d'extrusion plus faible. Inversement, si la longueur du passage est nettement supérieure à 2 fois sa largeur, il convient de travailler avec une pâte plus fluide ou une pression d'extrusion plus grande.

Tableau 1 – Sélection des types de pâtes abrasives pour des passages de rapport longueur/largeur égal à 2.

Dimension du passage (mm)	LV basse viscosité	LMV basse moyenne viscosité	MV moyenne viscosité	MHV moyenne haute viscosité	HV haute viscosité
minimale	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4
maximale	3,2	6,4	12,8	25	50

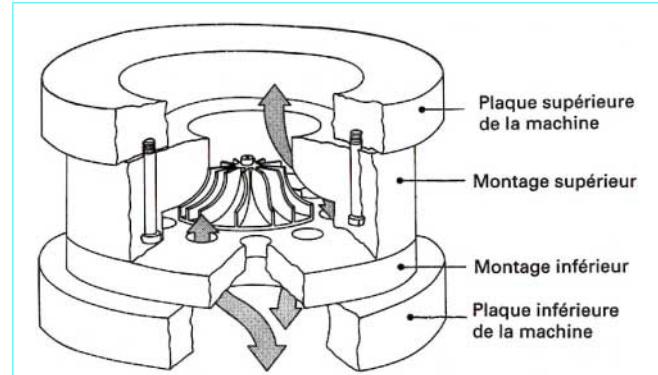


Figure 3 – Outilage pour traiter les arêtes externes

La valeur moyenne de la durée d'un passage pour une pâte donnée peut aussi être augmentée par un accroissement de la température de la pâte pendant le traitement. Une augmentation de la température diminue la viscosité de la pâte, et une diminution de la viscosité permet d'extruder à travers un passage plus étroit de longueur donnée.

L'**abrasif** le plus couramment utilisé pour l'abrasion par extrusion de pâte abrasive est le carbure de silicium, mais le carbure de bore, l'alumine et le diamant sont aussi employés. Les dimensions des particules vont de 5 µm à 1,5 mm. Plus l'état de surface initial est fin, plus les grains utilisés peuvent être petits. Les gros grains usinent plus rapidement, alors que les petits grains produisent un meilleur état de surface et permettent l'accès à des trous de petit diamètre. La profondeur de passe créée par les grains sur la surface dépend de l'acuité et de la dimension de ces grains, de la pression d'extrusion appliquée et de la souplesse de la pâte.

Lors du traitement par extrusion de pâte abrasive, les particules abrasives sont cassées et usées, et le matériau abrasié passe dans la pâte. La durée de vie effective de la pâte dépend de nombreux facteurs, comprenant la quantité initiale de pâte, la taille et la nature des grains, la vitesse d'écoulement et la forme de la pièce. Typiquement, une charge de pâte dans une machine peut être utilisée pendant plusieurs semaines et traiter plusieurs milliers de pièces avant d'être changée. On peut utiliser le soufflage par injection d'air ou aspiration pour évacuer la pâte des zones traitées. Les résidus sont enlevés à l'aide d'un solvant.

3. Possibilités du procédé

Le procédé d'abrasion par extrusion de pâte est particulièrement utile pour polir, *rayonner* et finir les arêtes dans des passages internes inaccessibles. Des états de surface de 0,05 µm peuvent être obtenus, et il est possible de réaliser avec succès des micro-usinages sur des matériaux aussi tendres que l'aluminium ou aussi durs que les céramiques, les carbures et les alliages de nickel.

3.1 Exemple : finition d'une matrice d'extrusion d'aluminium

La matrice d'extrusion d'aluminium de la figure 4a a été traitée par extrusion de pâte abrasive pour améliorer l'état de surface de 1,9 µm à 0,18 µm en un temps de cycle de 5 min. La figure 4b montre les dents avant et après polissage.

La figure 5 montre l'action progressive du polissage sur la surface de la matrice de la figure 4 ; le temps entre les étapes successives est de 80 s. Le polissage manuel arrondit les pics de rugosité

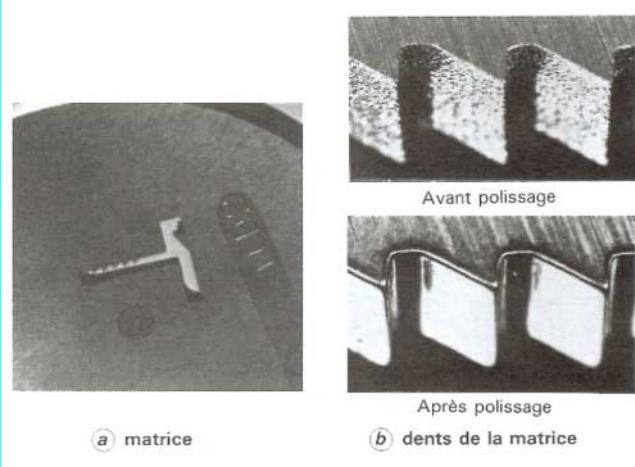
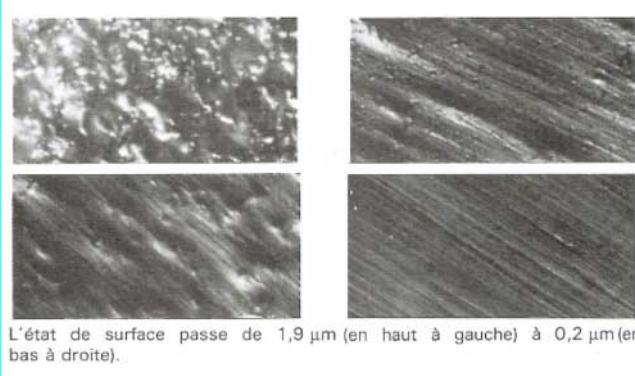


Figure 4 – Matrice multi-empreinte pour extrusion d'aluminium



L'état de surface passe de 1,9 µm (en haut à gauche) à 0,2 µm (en bas à droite).

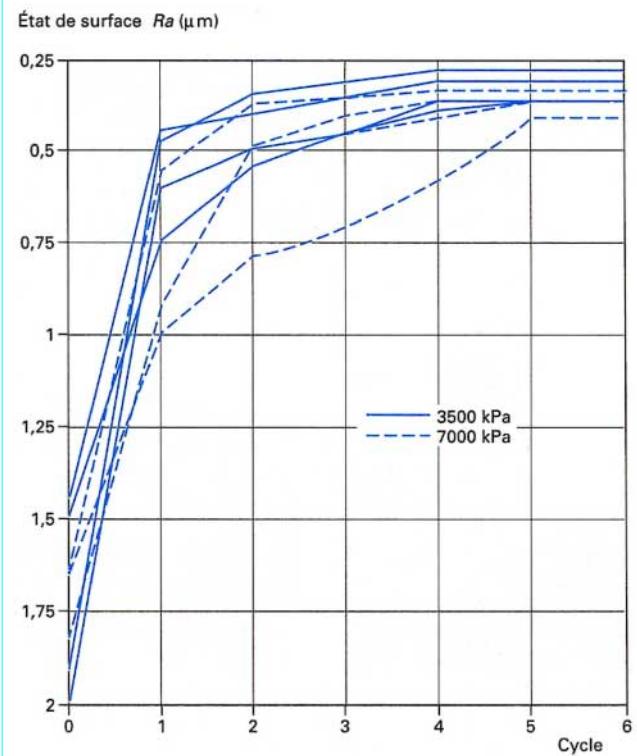
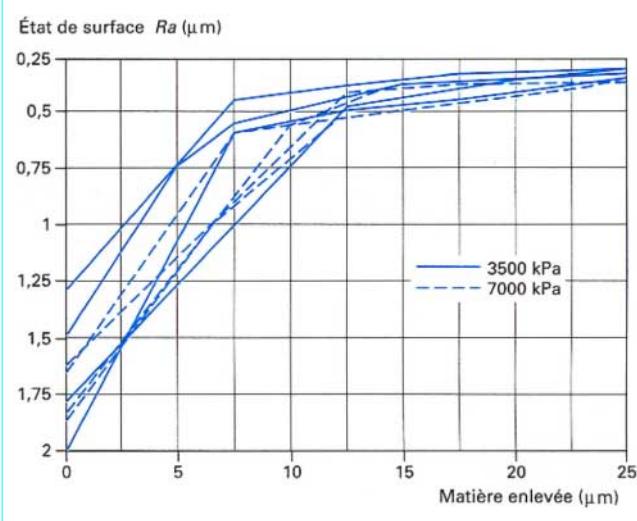
Figure 5 – Progression de l'abrasion

et provoque un état de surface irrégulier avec des arêtes couchées, cependant que le polissage par extrusion de pâte abrasive érode la matière, fournissant une surface plus uniforme, avec de fines rayures dans le sens d'écoulement. Dans beaucoup de cas, cela fournit une pièce plus fiable et de plus grande durée de vie.

3.2 État de surface et enlèvement de matière

La figure 6 montre l'influence du nombre de cycles sur l'état de surface final dans un passage de section 160 mm² usiné au préalable par électroérosion avec un état de surface initial moyen $R_a = 2 \mu\text{m}$, et ce pour différentes natures de pâte abrasive. Quels que soient les paramètres de la pâte, une amélioration de 60 à 75 % est obtenue dès le premier cycle, avec un volume de pâte extrudée de 2 L.

La figure 7 illustre la relation qui existe entre l'état de surface et l'enlèvement de matière. Pour un état de surface de départ de 1,3 à 2 µm, une amélioration de 50 à 70 % est obtenue pour un enlèvement de matière de seulement 7,5 µm. Un enlèvement de matière de 12,5 µm apporte une amélioration de 70 à 80 % ; un enlèvement additionnel de 12,5 µm fournit un gain complémentaire de 5 à 10 %. Ainsi, quelles que soient la viscosité de la pâte et la dimension des grains, un enlèvement de matière de 0,025 mm conduit à un gain de 85 à 90 % par rapport à l'état de surface initial électroérodé.

Figure 6 – Gain en état de surface en fonction du nombre de cycles, pour diverses formulations de pâtes abrasives pour un passage de section 160 mm², dans un acier à outil usiné par électroérosionFigure 7 – Relation entre état de surface et enlèvement de matière pour une surface électroérodée avec un R_a initial de 2 µm, pour diverses formulations de pâtes abrasives

La non-uniformité de l'enlèvement de matière est inférieure à 20 % de celui-ci.

4. Applications

L'usinage par extrusion de pâte abrasive est une méthode flexible pour finir les surfaces avec précision et uniformité. Le procédé est utilisé pour ébavurer, calibrer et polir des pièces, et il peut être employé pour des pièces et passages divers – depuis des pignons de diamètre 1,5 mm et des orifices aussi petits que 0,15 mm, à des passages de matrices de 50 mm et jusqu'à des disques de turbine de diamètre 1,2 m.

Le procédé a été inventé et mis au point pour l'ébavurage délicat de corps de valves des systèmes hydrauliques et d'injection de carburant des avions. La méthode fournit des arêtes exemptes de bavures qui satisfont aux contrôles au microscope (grossissement 20). Les autres applications comprennent :

- ébavurage, *rayonnage* et polissage en une opération de cages de roulements, d'écrous pour vis à billes (figure 8) ;
- ébavurage et polissage de corps d'injecteurs à une cadence de 30 000 pièces par jour avec un système automatisé ;
- finition de canules pour applications en chirurgie ;
- enlèvement de couches thermiquement affectées par des opérations d'usinage au laser ou par électroérosion sur des pièces fragiles ;
- ébavurage de buses d'injection ;
- finition de matrices pour extrusion, filage, forgeage, frappe à froid et frittage ;
- finition de ventilateurs, rotors aubagés monoblocs (figure 9), roues de compresseurs, disques de turbines et engrenages ;
- polissage de vannes et corps de vannes pour l'industrie des semiconducteurs.

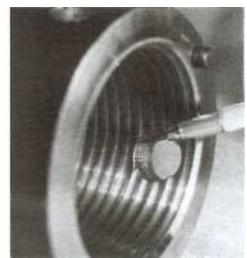


Figure 8 – Ébavurage d'intersections de trous, exemple d'un écran pour vis à billes

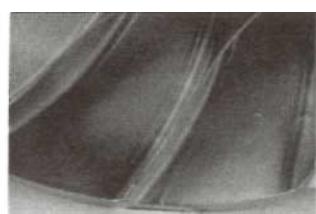
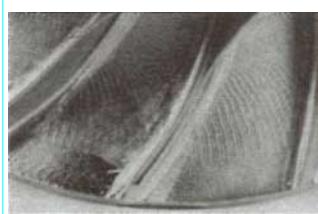


Figure 9 – Rotor aubagé monobloc de moteur d'avion avant et après polissage

Usinage par extrusion de pâte abrasive

par **Lawrence RHOADES**

Président d'Extrude Hone Corporation

Hilary CLOUSER

Conseiller scientifique d'Extrude Hone Corporation

et **Arnaud SCELLIER**

Responsable technique d'Extrude Hone France

Bibliographie

BENEDICT (G.F.). – *Nontraditional manufacturing processes*, Vol. 19, Manufacturing engineering and materials processing series, Marcel Dekker (1987).

KOHUT (T.). – *Surface finish with abrasive flow machining*, Proceedings of the 4th international aluminium extrusion technology seminar, Vol. 2, The Aluminium Association, avril 1988.

RHOADES (L.J.), éd. – *Cost guide for automatic finishing processes*, Society of Manufacturing Engineers (1981).

RHOADES (L.J.). – *Automation of the nontraditional processes*, SME technical paper MR85-475, Society of Manufacturing Engineers (1985).

RHOADES (L.J.). – *Abrasive flow machining with not-so-silly putty*, Met. Finish., juil. 1987.

RHOADES (L.J.). – *Abrasive flow machining*, Final Finish Technol., hiver (1988).

WELLER (E.J.), éd. – *Nontraditional machining processes*, 2^e éd., Society of Manufacturing Engineers (1984).

WICK (C.) et WEILLEUX (R.F.), éd. – *Materials, finishing and coating*, Vol. 3, 4^e éd., Tool and manufacturing engineers handbook, Society of Manufacturing Engineers (1985).

RHOADES (L.J.). – *Abrasive flow machining in a new era of manufacturing*, Nontraditional machining symposium, Orlando, Floride, nov. 1991.

SCELLIER (A.). – *Finition de pièces par extrusion de pâte abrasive*, Procédé Extrude Hone, Journées Procédés modernes de transformation, ENI Belfort, mars 1992.