

Procédé Hybride MachCeram® pour la fabrication de pièces horlogères en céramique

**Charles Duterte, Pierre Alexandre Maton,
Martial Marino, Alain Biernaux**

OPTEC SA

Av. des Nouvelles Technologies 53, B – 7080 Frameries

machceram@optec.be

www.optec-laser-systems.com/markets/micromechanics

Juin 2019

37

Bulletin SSC n° 87

En l'espace de quelques années, la céramique s'est imposée dans l'horlogerie comme matériau de choix et de prestige. Pourtant son exceptionnelle dureté, gage de son inaltérabilité est source de contraintes spécifiques considérables pour la mise en forme des articles horlogers. Nous présenterons dans cet article un nouveau procédé d'usinage non conventionnel appelé MachCeram® permettant de contourner les limites de l'injection et du fraisage mécanique. Par le biais de ce procédé, il sera possible de réaliser des pièces céramique, en petite ou grande série, avec une complexité géométrique encore jamais atteinte.

Limites et contraintes des procédés actuels

Les procédés les plus communément mis en œuvre sont le moulage par injection et l'usinage. Bien que ces technologies soient matures, leur maîtrise est complexe, onéreuse et les designs des pièces élaborées restent simples. Le moulage par injection souffre des coûts d'élaboration des matrices de moulage dont les bonnes dimensions sont souvent obtenues au prix d'un processus itératif long et prohibitif. Les formes obtenues restent généralement simples pour permettre un démoulage aisé. Si ce procédé est bien adapté à la fabrication de pièces en grande série, il ne peut s'imposer comme un choix raisonnable pour des petites séries ou la réalisation de prototypes. L'autre technologie couramment mise en œuvre est l'usinage qui peut être réalisé sur la pièce céramique dense ou sur la céramique pré-frittée dont l'usinabilité est bien meilleure. Si la première voie permet de garantir des usinages au micron elle génère également d'importantes contraintes mécaniques dans les pièces qui peuvent être la source de défauts voire de casse. L'usinage à l'état pré-fritté limite partiellement cet écueil mais reste limité en termes de précision et surtout restreint drastiquement la finesse des usinages en raison d'une tenue mécanique trop faible pour la réalisation de détails fins.

L'usinage par laser

En raison de sa nature « sans contact », l'usinage laser est pertinent pour les céramiques. Peu voire pas d'efforts mécaniques sont exercés sur la pièce ce qui réduit drastiquement les risques d'endommagement. La finesse des spots laser (de quelques μm à une centaine de μm) est également bien meilleure que le plus fin des outils de fraisage ce qui autorise des usinages immensément complexes. Il n'y a, en outre, aucun risque d'endommager l'outil lors du travail de la céramique ce qui limite les coûts d'usage. La diversité des sources laser est très grande aujourd'hui tant en termes de longueur d'onde que de durée d'impulsion. L'utilisation de lasers picosecondes puis plus récemment femto-secondes a permis d'améliorer très significativement le rendu des usinages en limitant l'occurrence et/ou les dimensions de la zone affectée thermiquement, siège de micro-dégradations de la matière. Malheureusement, ces technologies restent très onéreuses et surtout limitées dans leur capacité de réalisation : les taux d'ablation des lasers picosecondes et femto-secondes sont encore très insuffisants pour permettre d'envisager l'usinage complet de la moindre pièce horlogère céramique. Ces équipements sont donc exclusivement exploités pour des opérations de gravure (superficielle voire profonde) et du marquage.

Usinage des céramiques à l'état cru MachCeram®

Récemment un procédé d'usinage laser des céramiques à l'état cru a été développé permettant de résoudre la problématique des taux d'ablation limités de l'usinage laser tout en préservant les avantages propres à cet usinage (finesse, pas d'efforts mécanique sur la pièce...). Ce procédé exploite en outre des lasers nanosecondes dont le coût à l'achat reste environ 20 fois moins cher qu'un laser femto-secondes (pour une puissance moyenne équivalente).

Le principe général de cette technologie brevetée (Brevet Suisse n°706791) est assez simple: plutôt que de chercher à usiner la céramique à l'état dense ce qui requiert des puissances laser et des énergies incidentes très élevées, il est plus judicieux de l'usiner à l'état cru. Sous cette forme, la céramique est constituée de grains individuels (de dimension de l'ordre de 1 µm) maintenus entre eux et formant un bloc cohésif par l'intermédiaire d'un liant (c.-à-d. une colle) organique. Pour usiner de tels blocs, les énergies incidentes requises sont beaucoup plus faibles dans la mesure où c'est le liant organique et non la céramique qui doit être ablaté. Les taux d'ablation de l'usinage laser sont considérablement plus élevés que pour un usinage sur une céramique dense (jusqu'à 100 fois plus importants). Malheureusement, ce type d'usinage n'élimine pas totalement la zone affectée thermiquement et la chaleur dégagée dans la céramique lors de l'usinage engendre, soit la fusion des grains céramiques soit leur frittage. Ces zones fondues ou consolidées génèrent au mieux des défauts au pire empêchent définitivement l'usinage. L'incorporation par mélange d'une faible teneur de graphite colloïdal permet de résoudre élégamment ces problèmes. Ces grains de carbone uniformément répartis dans le cru absorbent préférentiellement le rayonnement laser et en se vaporisant disloquent localement le cru en générant un micro-cratère d'usinage. En outre, le carbone joue le rôle d'une barrière entre grains céramique qui limite la diffusion de la matière entre les grains céramique et prévient le frittage. L'usinage en devient «athermique» et ce sans requérir de sources à très courte durée d'impulsion!

Cette technologie prend tout son sens lorsqu'elle est combinée au fraisage conventionnel. Dans ce cas, le fraisage est utilisé pour les opérations de dégrossissage pour lesquelles l'usinage n'a pas à être fin mais implique au contraire des volumes de matière enlevée importants. Le laser est exploité a posteriori pour les opérations de finition impliquant la réalisation de détails difficiles ou longs à usiner par fraisage et pour lesquels les risques d'endommager la pièce sont grands.

De la poudre céramique aux bruts d'usinage

Le procédé est applicable à toutes les poudres céramiques quelles que soient leurs caractéristiques. Toutefois

il a surtout fait l'objet de développements importants sur la zircone (blanche ou noire), matériau de choix de l'horlogerie céramique. Un mélange intime entre la poudre céramique et du graphite colloïdal est réalisé en milieu aqueux. Les constituants sont finement dispersés par broyage en présence de différents additifs puis la suspension ainsi obtenue est séchée. Le brut d'usinage (Fig. 1, bloc dans lequel l'usinage va être réalisé) peut être obtenu de différentes manières impliquant des procédés céramiques conventionnels. Il peut s'agir de coulage, de moulage ou plus classiquement de pressage. Dans ce cas, les bruts sont mis en forme par pressage uniaxial de la poudre carbonée suivi ou non d'un post-compactage isostatique; Cette dernière opération permet d'homogénéiser le cru céramique et prévient les distorsions géométriques qui peuvent survenir lors du frittage. C'est le liant contenu dans le cru qui va permettre à la matière de résister à l'usinage par fraisage sans s'endommager et c'est le carbone qui assurera un usinage laser de qualité. Globalement les pièces pressées ont des densités de l'ordre de 99% de la densité théorique et des teneurs en phase volatile qui ne dépassent pas 5%.

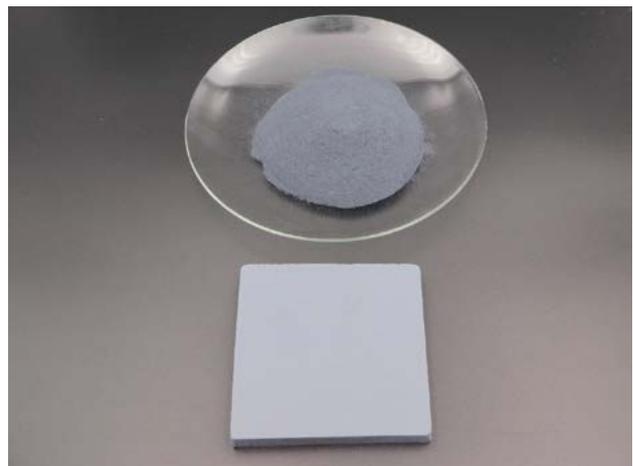


Fig. 1 : De la poudre au brut usinable.

Usinage

L'usinage hybride combine le fraisage et l'ablation laser. Dans la majorité des cas la séquence d'usinage comprend trois phases: le dégrossissage, le lissage et la finition laser. Les trajectoires d'usinage sont préalablement calculées grâce à un logiciel de CFAO classique (ex: Mastercam, Rhinocam...) et ce en considérant le laser comme un outil mécanique virtuel. Un post-processeur capable de convertir les trajectoires d'usinage G-code en processus intelligible par la tête galvanométrique laser doit être utilisé.

Étape 1 – Dégrossissage: Le brut d'usinage est placé sur un support adapté dans une machine de fraisage 5 axes incorporant un laser nanoseconde.

Les trajectoires de dégrossissage («Roughing») sont calculées avec le logiciel CFAO puis envoyées à la machine de fraisage de manière à reproduire une forme «Near net shape» de la pièce à élaborer. Les détails fins (non accessibles avec une mèche ronde de 2mm) ne sont pas usinés. Une surépaisseur minimale d'environ 100µm est laissée en tout point de l'objet (Fig. 2).

Étape 2 – Lissage: La pièce dégrossie est lissée avec le même outil que précédemment de manière à éliminer les défauts induits lors de l'étape précédente (Fig. 2).

Étape 3 – Finition laser: Sur base du volume restant calculé, le laser usine les détails fins résiduels dans les différentes orientations préalablement considérées pour le fraisage (Fig. 2)

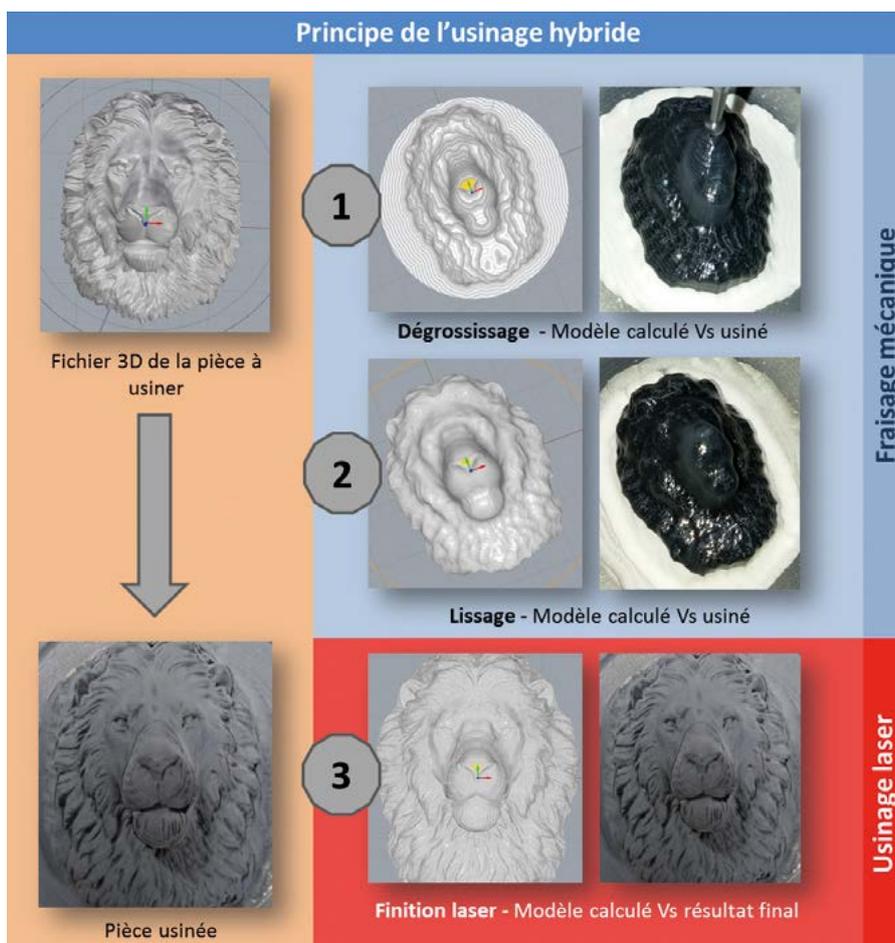


Fig. 2: De la conception à l'usinage laser.

Déliantage & frittage

Après usinage, les pièces usinées subissent un traitement thermique de déliantage et de frittage à (1450°C pour la zircone blanche et 1430°C pour la zircone noire) afin de développer leurs caractéristiques finales. Lors de cette opération, le volume se rétracte de l'ordre de 20%. En raison de la faible teneur en phase volatile contenue dans les pièces et le recours au pressage isostatique, les densités sont très proches de la densité théorique (>99%) et les propriétés mécaniques sont conformes aux caractéristiques attendues (dureté >1250HV1 et résistance à la rupture supérieure à 1 GPa). Les pièces denses peuvent si nécessaire faire l'objet

de traitements usuels de finition céramique (sablage, polissage, tribofinition...).

Quelques exemples de réalisation (bruts d'usinage/ frittage)

Le procédé MachCeram est applicable dans les domaines de l'habillement et du mécanisme. Le lecteur trouvera ci-après quelques exemples représentatifs de géométries accessibles par le procédé hybride. ■



Fig. 3: Lunette en zircone noire.

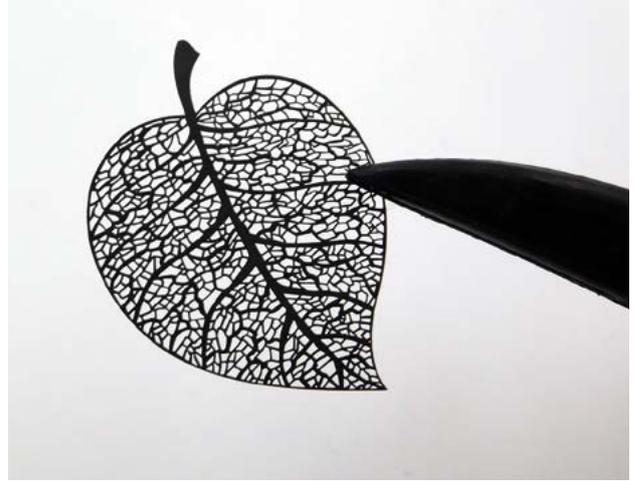


Fig. 4: Feuille en zircone noire.

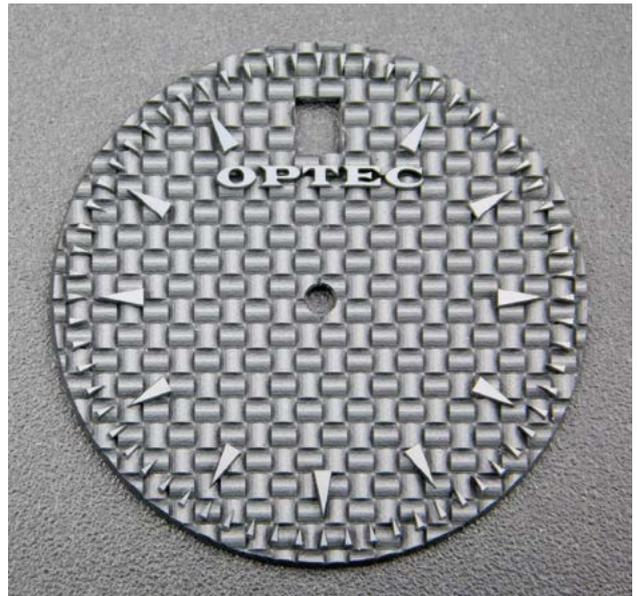


Fig. 5: Cadrans structurés en zircone noire.