

Mise en forme des céramiques techniques et perspectives de la fabrication additive

Senad Hasanovic, VP Innovation & Development

Gilles Robert, CEO

Ceramaret SA

Rue des Croix 43, CH - 2014 Bôle

sales-ch@ceramaret.com – www.ceramaret.com

Dans le monde de la conception des produits, la sélection des matériaux joue un rôle clé au début de leur cycle de vie. Cependant, ce choix est souvent complexe, nécessitant un équilibre délicat entre les exigences fonctionnelles et les contraintes de coût de fabrication. Ce dilemme est particulièrement pertinent dans le cas des céramiques techniques, des matériaux réputés pour leurs propriétés exceptionnelles mais également pour leur difficulté à être façonnés de manière conventionnelle.

Traditionnellement, la fabrication des céramiques techniques et autres pierres synthétiques impliquait des processus laborieux et coûteux, notamment en raison de la complexité de l'usinage de ces matériaux. Cependant, l'industrie céramique a rapidement adopté la technologie des poudres pour contourner ces défis. Cette approche consiste à former une pièce à partir d'une fine poudre céramique, puis à consolider cette forme par voie thermique. Parmi les méthodes les plus courantes, on trouve les voies dites sèches et thermoplastiques.

Aujourd'hui, une nouvelle ère dans la fabrication des céramiques techniques émerge avec la fabrication additive. Cette technologie, déjà bien établie dans les industries métallurgiques et plastiques, commence en effet à se faire une place dans le domaine des céramiques. Cependant, contrairement au frittage direct possible pour les métaux et les polymères, les céramiques requièrent encore une densification par traitement thermique. Parmi les méthodes additives, la stéréolithographie et l'impression par jet d'encre se démarquent pour la fabrication des céramiques techniques.

Cet article est proposé par Micronarc

Soutenue par les cantons de Fribourg, Vaud, Valais, Neuchâtel, Genève et Jura ainsi que par le SECO au titre de la NPR (Nouvelle politique régionale), cette plateforme sectorielle inter-connecte l'écosystème et les différents acteurs du domaine des micro et nanotechnologies et en promeut les compétences régionales (www.micronarc.ch)

Céramiques techniques

La céramique technique se réfère à une classe de matériaux céramiques avancés conçus pour répondre à des exigences élevées dans des applications industrielles et techniques. Ces céramiques se distinguent par leurs propriétés physiques et chimiques exceptionnelles, telles que leur haute résistance à la température, leur dureté, leur résistance à la corrosion, leur faible conductivité thermique ou électrique, et leur stabilité chimique. Elles sont souvent utilisées dans des environnements extrêmes où d'autres matériaux seraient inadaptés, tels que les turbines à haute température, les dispositifs électroniques à haute

fréquence, les implants médicaux, ou les composants soumis à des contraintes mécaniques élevées. Les céramiques techniques sont généralement fabriquées à partir de matériaux comme l'oxyde d'aluminium ou de zirconium, le carbure ou le nitrure de silicium, ou encore des composites céramiques. La production de pièces de ces compositions nécessite des techniques de fabrication avancées. Ces matériaux jouent un rôle décisif dans de nombreuses industries en raison de leur combinaison unique de propriétés, offrant des solutions technologiques innovantes et durables pour de nombreuses applications, également dans l'horlogerie pour des composants de mouvement ou d'habillage.

	Matériaux	Alumine 99.7%	ZTA 90%Al ₂ O ₃ / 10% 3Y-TZP	ATZ 80% 3Y-TZP / 20% Al ₂ O ₃	Zirconie 3Y-TZP	Zircone 1.5Y-TZP	Saphir / Rubis	Nitride de Silicium Si ₃ N ₄ -Y ₂ O ₃
	Unités							
Densité	g.cm ⁻³	3.85	4.13	5.40	6.06	6.10	3.99	3.21
Résistance en flexion	MPa	400	600	1000	1200	1100	200	850
Module de Weibull	-	14	17	15	10	15		16
Résistance en compression	MPa	3500	4000	2500	2200	2000	2000	3000
Ténacité	MPa.m ^{1/2}	4	5	5	8	15		7
Module de Young	GPa	400	380	250	210	210	400	300
Dureté Vickers	Hv	1700	1800	1400	1200	1200	2000	1600

Quelques propriétés types de céramiques techniques utilisées dans l'industrie. Une réduction de propriétés mécaniques d'environ 15 % est à prévoir pour la version imprimée des matériaux.

Etapes de fabrication d'un composant en céramique par technologie des poudres

Pour minimiser les opérations d'usinage, la technologie des poudres est couramment utilisée dans la fabrication des composants céramiques. L'objectif principal est d'atteindre des dimensions et une forme précise du produit final dès les premières étapes de production, réduisant ainsi le besoin de finition supplémentaire après la fabrication initiale. Ce processus, appelé « Mise en forme net-aux-côtes », se déroule généralement en trois étapes distinctes.

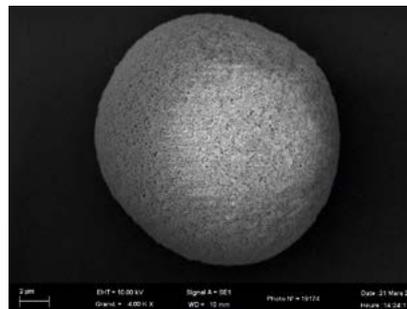
La première étape implique la préparation de la matière première, où différentes compositions sont définies, mélangées selon des exigences spécifiques, et préparées en matière première conformément au procédé technique choisi. Ensuite, la matière préparée est mise en forme à l'aide d'outils spécifiques, par pressage ou injection. Les traitements thermiques suivants ont pour premier objectif d'éliminer les constituants organiques résiduels présents dans les corps pressés ou injectés, puis de densifier la céramique pour former des corps solides et cohésifs lors de l'opération de frittage dont la densité relative avoisine les 100%. Pendant cette phase de densification, le composant perd jusqu'à 50% de son volume initial.

Selon les exigences de la pièce finale, il n'est pas exclu que les composants ainsi produits soient soumis à des opérations de rectification après le frittage afin de respecter les spécifications dimensionnelles ou fonctionnelles requises.

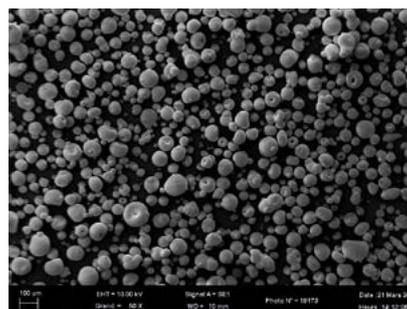
Mise en forme par pressage

Les méthodes de pressage des céramiques emploient en général une poudre composée de granules sphériques,

chacun constitué de particules fines de céramiques et jusqu'à 5% en masse de liant organique. La morphologie sphérique des granules offre une excellente coulabilité à la poudre; celle-ci se comporte quasiment comme un liquide en écoulement et permet un remplissage homogène des cavités de mise en forme. La part organique assure une tenue mécanique à l'ébauche pressée, suffisante pour une manipulation sans risque pour l'intégrité du produit.

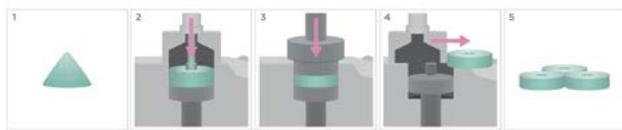


Granule de poudre céramique préparée pour le pressage. Elle est composée de nanoparticules agglomérées avec 3% de liant organique



Granules de poudre préparée pour le pressage. La distribution de taille varie de 20 microns à 200 microns

Dans ce processus de fabrication, le moment déterminant est celui où la matière première est transformée par l'application d'une pression de compaction uniaxiale. Une fois que le moule est chargé avec les granulés céramiques, cette pression induit une déformation plastique des particules, les poussant à s'agglomérer étroitement les unes aux autres. Ainsi, une structure légèrement solide commence à se former. Une fois que la pièce est suffisamment pressée, la pression est relâchée et le composant est extrait du moule. La pièce obtenue à la fin de cette opération a une densité dite verte d'environ 50% volumique, la porosité ouverte est donc relativement élevée. La densité finale sera obtenue après les opérations de traitement thermique.



Etapes de pressage de composant en céramique : 1) Préparation et sélection de la poudre 2) Remplissage de la cavité de pressage 3) Pressage 4) Extraction du corps pressé 5) Inspection

Mise en forme par injection

La matière première utilisée dans le processus d'injection céramique (CIM) comprend trois composants essentiels: la poudre céramique, le liant organique et les additifs. La poudre céramique constitue la base de la matière première, et elle est sélectionnée en fonction des propriétés désirées de la pièce finale. Le liant organique, généralement un polymère thermoplastique, est mélangé à hauteur de 50% volumique à la poudre céramique pour former une pâte suffisamment fluide à la température de moulage, facilitant ainsi le processus d'injection dans le moule tout en assurant la cohésion de la matière première. Enfin, des additifs peuvent être inclus pour améliorer certaines propriétés de la matière première ou faciliter le processus de fabrication, tels que des agents de frittage, des agents de démoulage ou des agents de stabilisation. En combinant judicieusement ces composants, la matière première est préparée pour l'injection, permettant ainsi la fabrication de pièces céramiques dans des géométries plus complexes allant au-delà de la capacité du procédé de pressage.

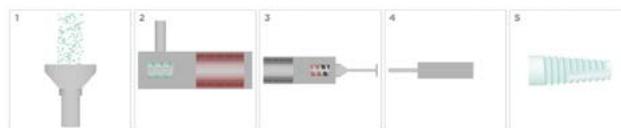


Implant dentaire en céramique entièrement moulé par injection.



Coupe sur un implant injecté, le filet intérieur est entièrement moulé par injection.

L'injection céramique est un procédé de fabrication utilisé pour produire des pièces de formes complexes avec une grande précision et en quantité importante. Dans ce processus, la matière première est chauffée pour former une pâte fluide, puis injectée dans un moule sous haute pression à l'aide d'une machine d'injection similaire à celle utilisée pour l'injection plastique. Le moule utilisé pour l'opération d'injection est maintenu à une température légèrement inférieure à la température de transition vitreuse du liant thermoplastique utilisé dans la matière première. Une fois injectée dans le moule, la pâte est compactée pour obtenir la forme souhaitée, refroidie par le moule, puis la pièce est éjectée à l'état solide. Ce processus offre des avantages tels que des temps de production rapides, une grande liberté de conception et la possibilité de produire des pièces de grande précision, tout en permettant la fabrication de pièces complexes qui seraient difficiles ou impossibles à obtenir par d'autres méthodes de fabrication céramique traditionnelles, comme le pressage. C'est cependant un procédé qui nécessite un effort conséquent de mise en route, notamment pour la conception et la réalisation du moule.



Etapes d'injection de composant en céramique: 1) Préparation et sélection de la matière première 2) Chauffe et mixage de la matière 3) Injection 4) Refroidissement / Durcissement de la matière 5) Ejection.

Après l'opération d'injection, le composant obtenu est constitué d'environ 20% de liant organique en poids, le reste est de la céramique sous forme de poudre. Avant de densifier la poudre céramique, la partie organique doit être éliminée par traitement thermique. Cette étape est particulièrement délicate et peut générer des défauts dans les pièces, justement à cause de la grande quantité de polymères à éliminer.

Fabrication additive des céramiques

La fabrication additive des céramiques techniques s'impose comme une nouvelle voie prometteuse de mise en forme. Elle suit les tendances observées dans l'industrie métallique et des polymères avec un certain décalage dans le temps, probablement dû à la taille des marchés, mais aussi à une différence notable dans les propriétés intrinsèques du matériau exploitables pour la fabrication additive.

Ainsi, le frittage direct par laser par exemple est possible pour les métaux et les polymères, mais reste un défi pour les céramiques, une densification par traitement thermique restant aujourd'hui nécessaire. Parmi les différentes façons de fabriquer les céramiques de manière additive, deux méthodes se distinguent particulièrement pour la céramique technique.



Le procédé additif est particulièrement intéressant pour la réalisation de composants avec des structures internes, notamment dans le domaine de la gestion des fluides.

Ici, un composant présentant des canaux d'un diamètre de 1 mm.

La stéréolithographie

La matière première pour l'impression 3D par stéréolithographie est généralement une résine photopolymère liquide spécialement formulée pour ce processus. Cette résine contient des polymères sensibles à la lumière UV, ainsi que des photo-initiateurs qui déclenchent la polymérisation de la résine lorsque celle-ci est exposée à une lumière ultraviolette. La résine photopolymère est conçue pour durcir rapidement et de manière précise lorsqu'elle est exposée à des sources lumineuses appropriées, ce qui permet de créer successivement des couches solides de matériau.

Le Digital Light Printing (DLP) et la stéréolithographie (SLA) sont deux technologies d'impression 3D qui utilisent des résines photopolymères liquides pour créer des objets en 3D couche par couche. Dans le processus SLA, un laser UV est dirigé point par point pour durcir la résine, couche par couche. En revanche dans le DLP, un projecteur numérique est utilisé pour projeter une image complète de chaque couche sur la résine, ce qui permet de durcir la couche entière simultanément. Bien que les deux méthodes utilisent des résines photopolymères similaires, le DLP est

souvent considéré comme offrant des vitesses d'impression plus rapides que le SLA en raison de sa capacité à durcir une couche entière en une seule étape. Cependant, le SLA est généralement reconnu pour offrir une résolution de détail légèrement supérieure en raison de l'utilisation d'un laser pour durcir chaque point individuel avec une grande précision.

La stéréolithographie offre une certaine liberté dans le choix des matériaux, mais l'opération de nettoyage post-impression peut s'avérer laborieuse. La pâte, matériau de départ, est encore très présente sur les pièces une fois l'opération terminée et nécessite un important effort de nettoyage en surface. Cela limite la réalisation de structures internes et augmente le risque d'endommager les pièces dont l'état est encore relativement fragile à ce stade du procédé.

L'impression par jet d'encre

L'impression additive à jet d'encre implique l'utilisation d'une encre céramique, une suspension liquide de particules céramiques fines dispersées dans un solvant et des liants appropriés. Les particules céramiques, sélectionnées pour leurs propriétés spécifiques en fonction des exigences de la pièce finale, sont réduites à une taille nanométrique ou micrométrique afin de garantir une distribution homogène dans la suspension. Le choix du solvant est important, car il influe sur la viscosité et les propriétés de mouillage de l'encre, déterminant ainsi son aptitude à être déposée avec précision lors de l'impression. Des additifs tels que des agents de suspension, des dispersants et des agents de mouillage peuvent être intégrés à la formulation pour améliorer la stabilité de l'encre et optimiser ses performances d'impression. Cette formulation complexe est essentielle pour assurer une reproduction fidèle des modèles numériques et pour obtenir des pièces céramiques de haute qualité avec une résolution et une précision optimale.



Boîtier de montre en zircone noire polie

En complément de l'encre céramique, le processus d'impression par jet d'encre de céramique intègre une encre de support dédiée. Conçue pour maintenir la géométrie de l'objet en cours d'impression, cette encre de support est précisément formulée afin de fournir un soutien structurel aux parties en surplomb ou aux configurations complexes pendant le processus d'impression. Habituellement composée d'un matériau soluble dans l'eau ou dans un solvant spécifique, cette encre de support est sélectionnée pour sa capacité à être facilement éliminée une fois l'impression achevée.

Après avoir segmenté le fichier 3D en couches et les avoir disposées dans le logiciel de fabrication, chaque couche est imprimée séquentiellement à l'aide de têtes d'impression par jet d'encre spécifiquement adaptées aux matériaux céramiques. Pendant cette opération, le plateau de base sur lequel les pièces sont imprimées est chauffé pour permettre l'évaporation des solvants contenus dans l'encre, laissant ainsi une couche composée de particules céramiques et de matériaux de support aux endroits nécessaires. Conformément aux pratiques standards des procédés de mise en forme céramique, la pièce imprimée est légèrement surdimensionnée pour compenser le retrait du matériau qui surviendra lors du traitement thermique ultérieur de frittage. Une fois l'impression achevée, le matériau de support est éliminé par dissolution dans l'eau afin de libérer les composants en céramique. Ce processus est suivi d'un traitement thermique permettant la densification finale de la pièce, garantissant ainsi des propriétés mécaniques et structurelles optimales.

Perspectives pour la céramique par fabrication additive

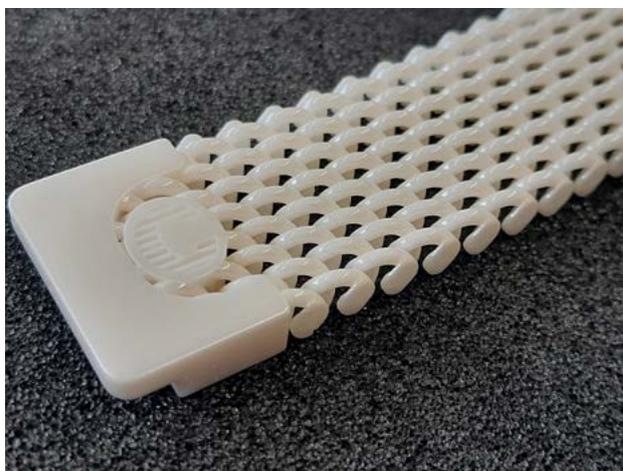
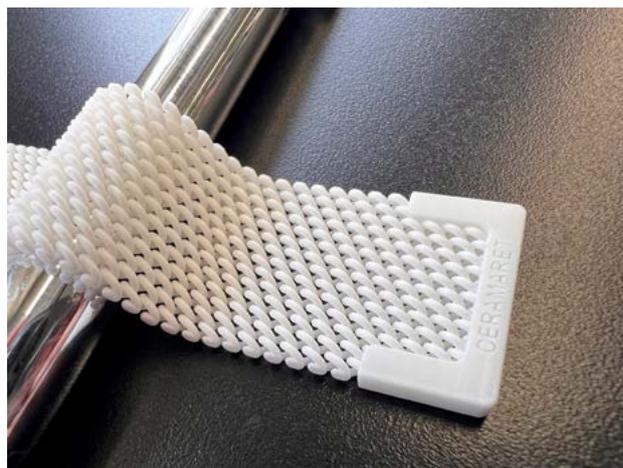
Avec l'avancée continue des techniques de fabrication additives et l'amélioration constante des propriétés des produits, la fabrication additive commence à s'établir comme une méthode attrayante dans le domaine exigeant des céramiques. Cette évolution revêt une importance significative compte tenu de la nature intrinsèquement complexe de la fabrication céramique, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives stimulantes en termes de conception des composants et d'exploitation de ce matériau.

Malgré la similitude des propriétés physiques ou chimiques entre les pièces produites par les différents procédés de fabrication, des variations dans les propriétés mécaniques peuvent être observées, notamment pour les pièces fabriquées de manière additive. La construction par couches peut induire une fragilisation des composants dans le sens perpendiculaire à la direction d'impression. Chaque interface entre les couches représente potentiellement une zone de faiblesse susceptible d'influencer la résistance mécanique. Ce phénomène doit être pris en compte au moment de la

conception du produit et de la définition de la stratégie de fabrication pour garantir la performance mécanique optimale du composant.

Pour les grandes séries, les méthodes conventionnelles restent souvent privilégiées. Bien que le coût initial de développement d'un outillage puisse être élevé, le volume de production important compense généralement cet investissement à long terme.

L'absence de besoin en outillage dans le processus de mise en forme rend la fabrication additive particulièrement attractive pour les séries de taille moyenne, où les coûts associés au développement et à la fabrication d'outils de pressage ou injection peuvent être prohibitifs. Cette caractéristique réduit également les délais de mise en œuvre et de développement, conférant ainsi au processus une agilité et une compétitivité accrues. Avec l'évolution continue de la technologie des machines et des matériaux, on peut prévoir non seulement des réductions de coûts supplémentaires, mais aussi des économies d'échelle pour rendre ce procédé encore plus attractif. ■



Bracelet à maille milanaise en céramique réalisé par fabrication additive.

SOLUTIONS FLEXIBLES ET ÉCORESPONSABLES

K5-4 / K5-4W / K5-5

PRECI
TRAME



- Fraisage UGV 4 ou 5 axes pour pièces inscrites dans un cube de 50 mm de côté
- Changeur d'outils automatique jusqu'à 50 positions
- Broche d'usinage à fourreau 60'000 tr/min
- Répétabilité de positionnement inférieure à 1 µm
- Axe C pour opérations de tournage jusqu'à 5'000 tr/min
- Nouvelle IHM «Precitrane Machine Manager»
- 90% d'énergie économisée et 1 m² suffisent
- Charge automatique en option

Precitrane Machines SA

Grand-Rue 5

CH-2720 Tramelan

T +41 32 486 88 50

precitrane.com



ROBERT
LAMINAGE

ENGINEERED METALS FOR PRECISION INDUSTRIES

COILED STRIP | CUT TO LENGTH | DIAL BLANKS | DISCS

WWW.ROBERTLAMINAGE.CH

Robert Laminage SA | La Jaluse | CH-2400 Le Locle | T. +41 [0]32 933 91 91 | info@robertlaminage.ch