

Les céramiques : futurs développements

Gilbert Fantozzi et Jérôme Chevalier

Summary

New trends in ceramics

Ceramics exhibit very specific properties and therefore play an important role in the performance of numerous devices and equipments. In order to tailor their properties and functions in devices, a good knowledge of the relationships between properties and microstructure is required. But the microstructure depending on the processing route, the ceramic processing methods are a decisive factor for the development of ceramic market. Components must be realised with a complex shape, a minimum of machining, a high reliability and a low cost. New materials, devices and applications are considered: bioceramics, environment, nanomaterials, electroceramics. New processes are also discussed.

Mots-clés

Céramiques, élaboration, santé, environnement, électrocéramiques.

Key-words

Ceramics, processing, health, environment, electroceramics.

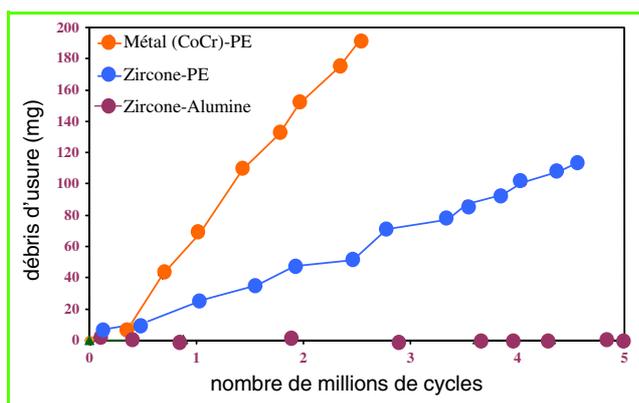


Figure 1 - Usure de différents systèmes prothétiques.

Les céramiques présentent des propriétés spécifiques qui les rendent indispensables dans de nombreux dispositifs. Il est évident que l'optimisation de leurs propriétés ou de leurs fonctions nécessite une bonne connaissance des relations microstructure-propriétés.

La microstructure dépendant du procédé d'élaboration, la maîtrise des procédés est un facteur déterminant pour le développement du marché des céramiques. Ce développement nécessite de pouvoir réaliser des pièces avec des formes complexes, un minimum d'usinage, une grande fiabilité et un coût aussi faible que possible.

L'objectif de cet article est de dégager les actions de recherche et développement qui nous paraissent prioritaires pour l'avenir.

Nouveaux matériaux et dispositifs, nouvelles applications

Biocéramiques : application à la santé

Les implants orthopédiques ont actuellement une durée de vie moyenne de l'ordre de 10 à 15 ans, limitée par l'ostéolyse

due à l'usure des cupules en polyéthylène contre les têtes fémorales en métal ou en céramique. Du fait du vieillissement des populations, une demande croissante apparaît pour que cette durée de vie approche les 30 ans.

Aussi de nouvelles générations de prothèses (de hanche ou de genou) avec des couples de frottement céramique-céramique peuvent être envisagées, l'usure de ces couples étant particulièrement faible comparée à celle des couples métal-polyéthylène ou céramique-polyéthylène comme le montre la *figure 1*. Cette faible usure est due à la très grande dureté des céramiques par rapport aux autres matériaux.

Les céramiques utilisées jusqu'à maintenant sont essentiellement l'alumine et la zircone. Les propriétés de ces céramiques sont indiquées dans le *tableau 1*. La durée de vie de ces matériaux est également conditionnée par la vitesse de propagation lente de fissures qui est donnée par la *figure 2*. Les courbes montrent que cette propagation disparaît pour des facteurs d'intensité de contraintes inférieures à un seuil K_{I0} . La connaissance de ce seuil ainsi que de l'ensemble de la courbe est très importante pour prévoir la durée de vie des prothèses, la rupture ayant lieu quand le facteur d'intensité de contrainte atteint la valeur critique K_{IC} . On peut d'ailleurs observer que les composites alumine-zircone sont potentiellement des biomatériaux tout à fait intéressants car ils semblent présenter un bon comportement à la propagation.

Un autre aspect important est la stabilité de la zircone qui peut être très nettement améliorée par des ajouts appropriés.

Tableau 1.

	Seuil K_{I0} (MPa m ^{1/2})	Ténacité K_{IC} (MPa m ^{1/2})	Dureté H (Vickers)
Alumine (Al ₂ O ₃)	2,5	4,2	1600
Zircone (ZrO ₂)	3,1	5,5	1290
Al ₂ O ₃ - 10 % vol. ZrO ₂	4,0	5,9	1530

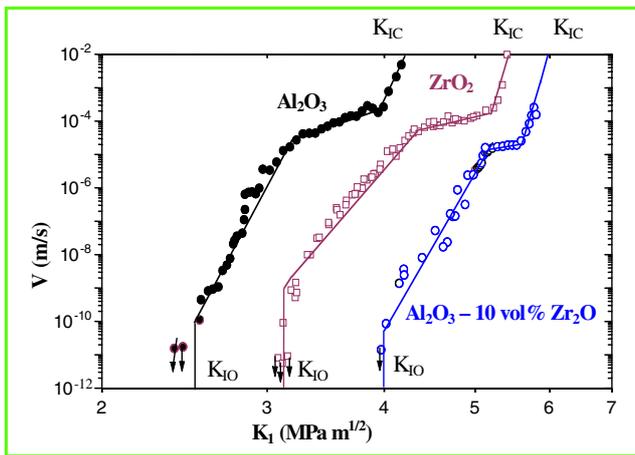


Figure 2 - Lois de propagation des fissures obtenues sur trois céramiques biomédicales.

L'élaboration des prothèses nécessite de mettre en œuvre des formes complexes (par exemple, la prothèse de genou) avec une forte fiabilité et un contrôle rigoureux de la microstructure. Les différentes voies permettant d'obtenir ces formes doivent être étudiées, qu'il s'agisse du pressage isostatique à chaud, du coulage, des procédés colloïdaux ou sol-gel...

Les biocéramiques actives, essentiellement les hydroxyapatites, sont utilisées actuellement comme revêtement des tiges fémorales et des cupules acétabulaires pour les prothèses de hanche et de genou. Leur utilisation comme substitut osseux est en cours de développement, mais ceci nécessite de mieux maîtriser la microstructure et leur composition (notamment le rapport hydroxyapatite/phosphate tricalcique) afin d'adapter leur biofonctionnalité. De plus, une collaboration entre biologistes, chirurgiens, physiciens et chimistes est nécessaire pour mieux comprendre les mécanismes d'ostéo-conduction afin de choisir les microstructures adaptées.

Une nouvelle génération de substituts osseux est également en cours de développement avec l'incorporation de médicaments (antibiotiques, chimiothérapie...) qui peuvent agir localement en cas de maladie. Enfin, l'utilisation de l'os hybride, où la céramique sert de support à la culture de cellules humaines, est très sérieusement envisagée.

Ainsi, les biocéramiques constituent un domaine de recherche important et prometteur, avec des applications dans de nombreux domaines autres que ceux que nous avons cités.

Céramiques et environnement

La réduction de la pollution nécessite des travaux de recherche et développement dans les domaines suivants :

- Filtres à particules : le comportement à la corrosion doit être amélioré soit en agissant sur la microstructure (notamment la présence de phases vitreuses), soit en utilisant d'autres céramiques (non oxydes). De plus, le comportement thermomécanique des céramiques utilisées pour les filtres doit être amélioré.
- Catalyse : il faut développer la réduction catalytique basse température pour la décomposition des NO_x et SO_x .
- Réfractaires : utilisés dans le traitement des déchets et des cendres volantes.

- Membranes : développement de nouvelles membranes pour l'hyperfiltration et la nanofiltration pour les liquides ou les gaz (souvent très agressifs) et pour le dessalement de l'eau de mer.
- Déchets nucléaires : traitement, vitrification, ciments.
- Recyclage des céramiques.
- Développement de tuiles antibactériennes, de céramiques sanitaires intelligentes.

Nanomatériaux et matériaux à gradient de fonction

Les nanocomposites peuvent présenter des propriétés particulières. Leur utilisation peut améliorer la résistance au fluage, le comportement thermomécanique et l'usure. Les nanocomposites ou nanocéramiques présentent un comportement superplastique qui peut être utilisé pour la mise en forme.

Les revêtements nanostructurés sur substrats permettent d'augmenter la résistance à l'usure et à la corrosion et la durabilité des outils de coupe.

Les nanotubes de carbone présentent des propriétés mécaniques et électroniques exceptionnelles et peuvent donc conduire à des matériaux à très haute performance.

Les matériaux à gradient de fonction permettent de réduire les contraintes thermiques des barrières thermiques et peuvent être utilisés dans de nombreux domaines : isolation thermique, fatigue thermique, résistance à l'oxydation et à la corrosion, applications électriques, optiques, magnétiques. L'activité de recherche sur les matériaux à gradient de fonction concernant à la fois l'élaboration et les propriétés nécessite d'être encouragée. Les céramiques superdures sont des matériaux intéressants mais dont le développement est insuffisant.

Enfin, l'étude de la liaison céramique-céramique ou céramique-métal est importante pour la réalisation de pièces complexes.

Électrocéramiques

Un effort particulier mériterait d'être fait en ce qui concerne les actionneurs piézoélectriques, capteurs hybrides, dispositifs électro-optiques, ferrites, résistors, matériaux pour batteries, piles à combustible, condensateurs...

Ces développements nécessitent des recherches dans de nombreux domaines tels que :

- nanopoudres, nanoélectrocéramiques,
- diminution de la température de frittage,
- multicouches : réduction d'épaisseur, substitution des métaux nobles,
- diminution des pertes mécaniques et diélectriques à très haute fréquence,
- développement de la technologie sol-gel pour les couches minces,
- nouvelles céramiques avec des propriétés améliorées,
- nouvelles méthodes d'élaboration,
- miniaturisation des composants et dispositifs pour les technologies de la communication.

Il est évident que pour les deux derniers thèmes, la science des interfaces joue un rôle fondamental et nécessite un effort tout particulier, avec une approche pluridisciplinaire.

Nouveaux procédés d'élaboration

Toutes les actions précédentes nécessitent un effort particulier au niveau des procédés d'élaboration.

Un challenge important en céramiques concerne la fabrication de pièces de forme complexe sans défauts (pores, inclusions, inhomogénéités... qui augmentent les risques de rupture), avec une grande fiabilité et à aussi faible coût que possible. L'usinage étant onéreux, il est intéressant de développer et d'optimiser la mise en forme presque finale (« near net shape forming ») qui minimise le temps de fabrication, facteur économique primordial.

Les différents procédés d'élaboration intéressants à développer sont :

- le moulage par injection qui nécessite une grande quantité de liant organique devant être éliminé sans laisser de défauts,
- les techniques colloïdales,
- la mise en forme par consolidation à chaud : elle a lieu dans un moule non poreux et la consolidation est obtenue par une montée en température,
- l'oxydation d'un métal fondu,
- la synthèse par auto-combustion permettant d'obtenir des poudres fines à faible coût,
- l'élaboration des nanomatériaux et des nanocomposites.

L'usinage des céramiques frittées est relativement onéreux et peut représenter jusqu'à 80 % du coût d'une pièce. Les coûts d'usinage peuvent être réduits sensiblement si ce dernier est réalisé sur les pièces à cru. Toutefois, une bonne maîtrise de l'usinage à cru nécessite de mieux connaître les propriétés mécaniques à cru ainsi que le rôle des liants, et de développer des essais mécaniques spécifiques permettant d'obtenir une corrélation entre propriétés mécaniques du cru et son usinabilité.

Autres applications

Composites à matrice céramique renforcés par des fibres

Un certain nombre de propriétés de ces matériaux doivent être améliorées : il s'agit notamment de la résistance à l'oxydation, du comportement au fluage et à la fatigue. De plus, le coût des fibres et des procédés d'élaboration reste relativement élevé.

Concernant les fibres, leur résistance au fluage doit être améliorée, aussi bien pour les fibres oxyde que carbure de silicium. La résistance à l'oxydation ou la protection contre l'oxydation des fibres non oxydes n'est pas encore suffisante. La protection contre l'oxydation de la matrice nécessite le développement de matrices ou de revêtements multicouches qui permettent une guérison des fissures par formation de verres protecteurs.

Il est également important de développer des méthodes de densification ou de revêtements plus rapides et moins onéreuses (dépôt CVI rapide, précurseurs liquides...).

Des méthodes de contrôle non destructives spécifiques aux matériaux composites ainsi que des indicateurs d'endommagement méritent d'être développés.

Réfractaires

Les réfractaires sont largement utilisés dans l'industrie sidérurgique, la fonderie, les cimenteries, l'industrie du verre, la chimie, les centrales thermiques...

Ces matériaux sont donc importants du point de vue économique et l'amélioration de leurs performances doit être une préoccupation majeure dans le futur. Jusqu'à présent, une approche plutôt empirique avait été adoptée, et il est nécessaire de prévoir et de modéliser les relations entre microstructure (formulation) et les propriétés thermomécaniques ou physico-chimiques (notamment le comportement à la corrosion).

Matériaux de construction

La maniabilité des bétons doit être améliorée sensiblement si l'on veut diminuer de manière sensible la consommation d'eau, problème crucial dans de nombreux pays. Les ciments sans macro défaut avec des additifs organiques présentent un intérêt du fait de leur meilleure résistance mécanique et de leur plus faible porosité.

La résistance mécanique peut également être augmentée par renforcement avec des fibres.

Le recyclage des cendres volantes ou d'autres agrégats légers dans les ciments doit être développé.

D'autre part, l'utilisation du ciment pour la réparation ou la reconstruction doit être prise en compte.

Enfin, le comportement en température du ciment et des bétons nécessite d'être mieux appréhendé afin d'améliorer la sécurité des tunnels et des bâtiments.

En conclusion, les nouveaux développements dans le domaine des céramiques nécessitent de mener simultanément des travaux de recherche de base et finalisée au niveau des procédés d'élaboration, de la maîtrise des microstructures, de la modélisation des matériaux et des dispositifs.

Gilbert Fantozzi

est professeur à l'INSA de Lyon*.

Jérôme Chevalier

est maître de conférences.

* GEMPPM, UMR CNRS 5510, INSA de Lyon, bât. 502, 20 avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex.
Tél. : 04 72 43 84 43. Fax : 04 72 43 85 28.
E-mails : Gilbert.Fantozzi@insa-lyon.fr
Jerome.Chevalier@insa-lyon.fr