

Les matrices métalliques et céramiques :

de nouveaux matériaux composites

Introduction

Dans le cas de matériaux soumis à des charges mécaniques, l'utilisation de matériaux composite a permis l'optimisation des propriétés par l'emploi de substances qui a priori, dans un matériau classique, ne seraient pas présentes en même temps ou du moins pas sous la forme souhaitée et ce, dans des conditions classiques de mise en œuvre par les lois de l'équilibre et de la cinétique chimique.

Cette augmentation du nombre de degrés de liberté pour le matériau implique de nouvelles possibilités (*e.g.* anisotropie, gradient de matière,...) mais aussi de nouveaux défis comme des questions liées à la compatibilité et à la stabilité des matières. Ces problématiques peuvent entraîner de nouvelles limitations des choix possibles mais cette barrière n'est pas immuable dans le temps au vu du développement de nouveaux moyens de mise en œuvre (techniques additives, friction-malaxage...).

En principe, le domaine d'application des matériaux composite ne se limite pas forcément à l'aéronautique ou au transport pour lesquels la maximisation du rapport rigidité/poids spécifique est fondamentale. Cependant, le coût élevé de ces matériaux réduit leur usage pour les applications où le prix des matières et de la mise en œuvre sont essentiels, comme dans le cas du génie civil et dans une moindre mesure, pour le génie mécanique.

Dans le secteur des composites, une évolution notable est en place, si les années 50 à 80 se sont portées sur le développement et l'utilisation de matrices à base de polymère renforcées de fibres de verre, de carbone ou d'aramide, des alternatives se développent de plus en plus. Celles-ci concernent le choix des matériaux et leur procédé de mise en œuvre, étroitement liés aux propriétés théoriques, réellement obtenues et leur dispersion.

Les composites à matrice non polymère

Cette section détaille les alternatives aux résines et aux thermoplastiques comme matériau de matrice dans les composites. En effet, les matrices métalliques et céramiques sont également susceptibles de voir leurs propriétés (résistance au fluage ou à l'usure, comportement thermique ou électrique modifié par l'adjonction de nano-charges...) améliorées par l'ajout d'une seconde phase.

L'utilisation de matrices métalliques et céramiques peut se justifier en outre au vu des limitations, bien qu'elles-mêmes toujours repoussées, des matrices polymères. Ce sont avant tout certaines propriétés mécaniques des résines combinées à l'emploi de renforts céramiques qui peuvent poser

question. Pour chacune de celles-ci, des matériaux composites à matrice métallique ou céramiques peuvent être une alternative.

Rigidité

Si pour les matrices polymères, des propriétés satisfaisantes de résistances et de ductilité sont atteintes, et que par essence, dans le matériau composite, c'est le renfort qui reprend la charge extérieure, le rapport de rigidité entre la matrice et le renfort peut poser question. En effet, il est démontré que les efforts de cisaillement aux interfaces sont clairement dépendants de ce rapport. Un rapport très faible ou très élevé est défavorable. Cela impose alors de travailler sur une mise en compatibilité très poussée entre les fibres et la matrice pour obtenir une énergie de liaison élevée aux interfaces. Cette amélioration engendre cependant un abaissement de la résilience de ces matériaux car la propagation des fissures est alors facilitée. Le matériau tend alors vers les propriétés du matériau céramique de taille macroscopique comportant des défauts et devient dès lors plus fragile.

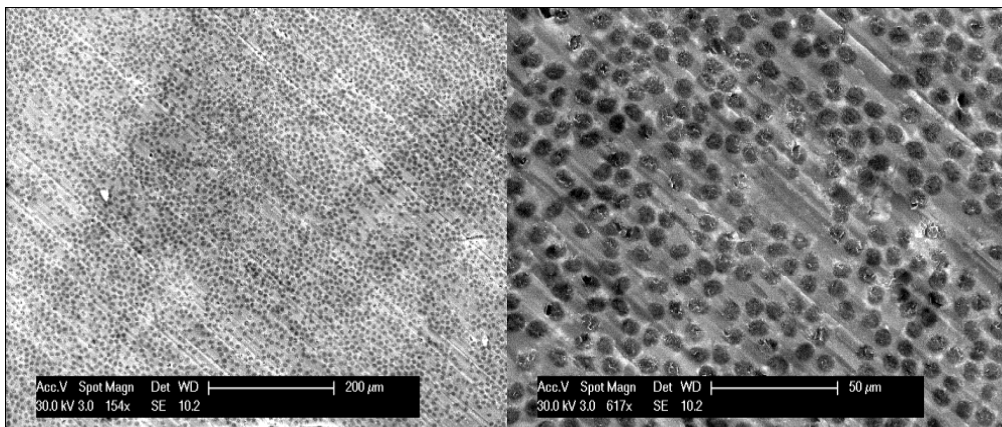


Figure : Microstructure d'un composite à matrice Mg (9% Al, 1%Zn) renforcée de 35% de fibres de carbone UD (vue de la tranche) à haute résistance réalisé par injection sous pression (Projet Winnomat C-Mg MMC, ULg, UCL, Sirris).

L'emploi d'une matrice métallique, 10 à 50 fois plus rigide, permet de donner une solution à ce problème. Ainsi, par exemple, dans le cas de structures, des matrices légères en aluminium ou en magnésium ont été combinées à des fibres de carbone. Ces matériaux, dont la mise en œuvre est complexe comportent de l'ordre de 30 à 60 % vol. de fibres et ont des propriétés mécaniques supérieures aux équivalents à matrice polymère tout en offrant une résilience élevée. Dans le cas de l'utilisation d'une matrice en magnésium, le tableau suivant montre que le rapport rigidité-poids et résistance-poids est plus favorable qu'un composite équivalent à matrice epoxy.

Tableau : Comparaison des moyennes de propriétés mécaniques spécifiques de matériaux composites équivalents (60% en volume de fibres de carbone à haute résistance) avec une matrice epoxy ou métallique (Mg + 1wt.% Al), référence année 2009

	CFRP (Epoxy 60% vol. UD f C HS)	CFRMg1%Al (60% vol. UD f C HS)
Rapport $\frac{E}{\rho}$	$\frac{111}{1.6} = 69.37$	$\frac{140}{1.8} = 77.77$
Rapport $\frac{\sigma_r}{\rho}$	$\frac{1225}{1.6} = 765.6$	$\frac{1450}{1.8} = 805.5$
Prix (€/kg)	~30	~120

Il subsiste cependant deux difficultés pour l'emploi de tels matériaux, la cohésion limitée entre les fibres et la matrice réduit significativement la limite de traction par rapport aux valeurs théoriques. Par exemple, dans le cas de l'élaboration par voie liquide et sous pression du composite aluminium – fibres de carbone, le problème est surmonté par l'emploi d'additifs permettant l'éviction des oxydes et ainsi, un contact réactif direct avec les fibres de carbone a lieu en cours d'infiltration. La cohésion des interfaces est alors renforcée tout en conservant la résilience du métal pour la matrice. Un bon contrôle des réactions interfaciales est cependant crucial, afin d'éviter un endommagement trop important et la consommation des fibres par ces réactions pendant l'infiltration.

Dureté

Typiquement, l'emploi de renforts céramiques particulières permet d'augmenter la dureté macroscopique du matériau et donc sa résistance à l'usure. Cependant, dans le cas de matrices dont la dureté relative est faible, l'application combinée d'une charge normale et d'un glissement provoque la dégradation des interfaces et la déformation de la matrice. Sans capacité d'écrouissage ou de durcissement, la matrice polymère constitue souvent le point faible dans le système tribologique et la dégradation du matériau dans son ensemble est accélérée.

Pour cette raison, les applications d'usure des composites sont essentiellement faites à partir de matrices métalliques ou céramiques.

Au stade industriel, on peut citer les dépôts nickel-diamant ou nickel-carbure de tungstène. La dureté de la matrice en nickel est comprise entre 30 et 65 HRC, ce qui limite la fatigue à l'interface entre la particule céramique dure et la matrice. Le matériau est le plus réalisé sous forme de dépôt à froid par électrolyse ou par Laser Cladding à chaud.

Résilience

Comme évoqué plus haut, l'optimisation des interfaces dans les matériaux composite à matrice polymère se traduit par une diminution de la résilience. Cela constitue une limite importante. Par ailleurs, la résistance aux chocs du matériau composite à matrice polymère est assurée par l'augmentation de la longueur du chemin de fissuration car ni le renfort (à l'exception des fibres aramides) ni la matrice seuls n'ont une résilience et une ténacité élevée.

Pratiquement, pour l'optimisation de la durée de vie d'outils de coupe, on emploie des matériaux composites particuliers dits cermets. Etant donné que l'on souhaite une grande dureté pour la résistance à l'usure, la quantité de renfort à base de carbure de tungstène est supérieure à 90 vol.%. Bien que ne représentant 10 vol.%, la matrice qui peut être à base de cobalt ou de nickel relie les

particules entre elles. Elle est bénéfique au niveau de la dissipation thermique et la résistance aux chocs.

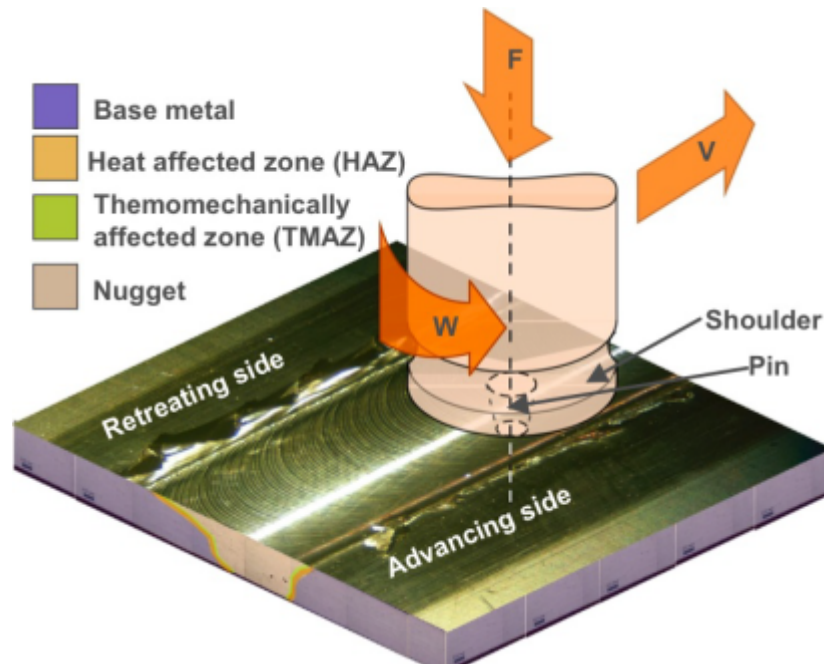
Température maximale d'utilisation

Comme pour la plupart des matériaux polymères, sauf polymères techniques particuliers (e.g. PEEK), la température maximale d'utilisation des matériaux polymères est limitée dans les meilleurs cas à 250-300 °C. Aux environs de cette température maximale, la dégradation du polymère se produit généralement par activation thermique. Il convient alors de prendre une marge de sécurité dans la température d'utilisation, ce qui réduit encore la plage d'utilisation.

Ce sont les matériaux composites à matrice céramique (CMC) qui présentent la plus haute température d'utilisation. Ils présentent également d'autres avantages tels que la résistance aux chocs thermiques et une ténacité améliorée. Actuellement, les matériaux industrialisés sont les composites carbone-carbone (matrice carbone avec fibres de carbone), SiC-fSiC ou encore C-fSiC. Les procédés de fabrication sont divers et on cite notamment le frittage en deux étapes. La première étape consiste à lier le renfort dans une matrice polymère contenant les éléments céramiques à y incorporer (e.g. C ou Si) via une opération de frittage à température modérée. La seconde étape est réalisée par pyrolyse à plus haute température (1000-1200 °C). Le polymère est alors dégradé et le matériau fritté se densifie.

Nouvelles méthodes de production

Comme mentionné plus haut, les techniques classiques de fabrication des composites à matrice céramique/métallique soulèvent des difficultés importantes. On peut citer notamment l'obtention d'un bon mouillage des préformes de renfort par le métal fondu et le contrôle des réactions interfaciales lors de l'élaboration de composites à matrice métallique par des procédés en phase (semi-)liquide tels que le forgeage liquide ou le thixomoulage. La bonne dispersion de la phase de renfort au sein de la matrice – ou au contraire son insertion localisée par exemple en vue d'obtenir un matériau composite à gradient de matières et de propriétés - peut aussi se révéler problématique, en particulier dans le cas de nano-particules qui ont fortement tendance à s'agglomérer. De nouvelles méthodes de production ont donc été développées ces dernières années pour tenter de pallier à ces problèmes.



[Commin, 2008]

Friction stirprocessing

Le Friction stirprocessing, procédé dérivé du soudage par friction-malaxage (friction stirwelding), est une technique permettant de modifier la microstructure d'un matériau métallique (en particulier des alliages à base d'aluminium ou de magnésium) et/ou de fabriquer une pièce composite tout en restant toujours à l'état solide. Le principe de cette technique est le suivant : un outil présentant un pion et un épaulement est plongé dans la pièce à travailler et est mis en mouvement (rotation + déplacement latéral) (cfr schéma). Sous l'effet des frottements générés entre la matière et l'outil, la matière s'échauffe et se déforme plastiquement ce qui permet, selon le cas, de réaliser une soudure ou d'incorporer un renfort dans une matrice métallique. Cette technique permet donc de s'affranchir des problématiques de mouillage et de réactions interfaciales. Elle convient très bien à l'incorporation de nano-charges car on peut répéter le processus jusqu'à obtenir une bonne dispersion des charges au sein de la matrice, et elle se prête aussi à l'insertion d'un renfort localisé ou à la réalisation de pièce à gradient de matières et de propriétés.

Techniques additives

Les techniques d'« additive manufacturing » sont des techniques permettant la production « near net shape » de pièces denses par dépôt de couches de poudre successives qui sont fondues/frittées sous l'effet d'un laser ou d'un faisceau d'électrons. Ces procédés impliquant un passage de la matière à l'état liquide, et à des températures élevées, ils ne permettent pas de s'affranchir totalement des problèmes de mouillage ou de réactions interfaciales. Cependant, ils permettent la fabrication en petite série de pièces à géométrie complexe et elles offrent une très grande flexibilité. Selon le dispositif envisagé (« electronbeammelting », « laser beammelting », « selective laser sintering », « laser cladding »...), les techniques additives se prêtent en effet aussi bien à la mise en œuvre de

poudres métalliques que céramiques, et à la réalisation de pièces à gradients de matières et de propriétés.

Article rédigé par le Service de Sciences des Matériaux Métalliques (Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, www.metaux.ulg.ac.be) avec la participation de J. Lecomte-Beckers (Professeur), A. Mertens (Chercheur Post-Doctorant) et H.-M. Montrieux (Doctorant).

*Cet article fait partie d'une série de chroniques techniques s'adressant aux industriels souhaitant renforcer leurs connaissances dans le domaine des matériaux composites. Il a été rédigé dans le cadre du projet +Composites (www.pluscomposites.eu).
Copyright partenaires du consortium +Composites.*