

Modèle géométrique de frottement entre matériaux composites

O. SMERDOVA^{a,b}, A. LE BOT^a, J. CAYER-BARRIOZ^a, B. SARBAYEV^b

a. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (LTDS), UMR 5513, Ecole Centrale de Lyon, 36 avenue Guy de Collongue, 69134 ECULLY (FRANCE)

b. Université Technique d'Etat de Moscou Bauman, 5, 2nd Baumanskaya, 105005, MOSCOU (RUSSIE)

Résumé :

Dans cette étude, on propose un modèle géométrique de frottement sous faible charge normale entre deux matériaux composites. Le contact est présenté comme une multitude de microcontacts dont la nature peut être de trois types : fibre-fibre, fibre-matrice ou matrice-matrice. La force de frottement interfaciale est la somme des forces locales de frottement en ces microcontacts. Le calcul montre que le coefficient de frottement hybride ne dépend pas de l'orientation de fibres mais seulement de leur fraction surfacique. Ce modèle est testé expérimentalement.

Abstract :

In this study we propose a geometrical model of friction under low normal load between two composite materials. The contact is represented as a multitude of microcontacts of three types : fibre-fibre, fibre-matrix or matrix-matrix. The interfacial friction force is the sum of local friction forces in these microcontacts. Calculations shows an independence of composite friction coefficient on fiber orientation on the one hand, and its dependence on fiber surface fraction on the other hand. This model has been tested experimentally.

Mots clefs : CFRP, composite, coefficient de frottement, contact

Introduction

En général les propriétés des matériaux composites peuvent être estimées par les lois de mélange : la caractéristique du composite est calculée comme une somme de caractéristiques associées de ses composants, une matrice et des renforcements, en proportion de ses fractions volumiques dans le composite. Cette loi fonctionne pour les caractéristiques physiques (la masse volumique, etc) comme pour les caractéristiques mécaniques (les modules d'Young, le coefficient de Poisson, le module de cisaillement) [1, 2]. La littérature souligne également l'existence de telles lois pour le coefficient de frottement ou encore les taux d'usure (Khruschov's rule) [3].

Ainsi une formule semi-empirique pour le frottement de composites décrit le coefficient de frottement par une loi de mélange réciproque [4]:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{V_f}{\mu_f} + \frac{V_m}{\mu_m} \quad (i.1)$$

où V_f et V_m sont les fractions volumiques des fibres et de la matrice, μ_f et μ_m sont les coefficients de frottement des matériaux de fibres et de la matrice respectivement.

Une dépendance d'un autre type a été proposée par Axen et al. [5] pour le frottement abrasif de matériaux multiphasiques. Ils supposent que le coefficient de frottement est un mélange de deux régimes : des pressions égales sur les phases et des taux d'usure égaux des phases. Si on élimine la présence d'usure on obtient la formule suivante :

$$\mu = \sum_{i=1}^N \mu_i \alpha_i \quad (i.2)$$

où μ_i est le coefficient de frottement de phase i et α_i est la fraction surfacique de la phase i .

L'objectif de ce travail est de créer un modèle pour le contact et le frottement entre deux matériaux composites et d'apporter une des argumentations possibles pour les lois de mélange appliquées aux propriétés tribologiques. Ce modèle est basé sur une analyse de la géométrie de contact et testé sur les matériaux composites à matrice époxy renforcée par des fibres de carbone.

1 Analyse de contact entre matériaux composites

Dans ce travail le modèle proposé décrit le frottement des deux composites à partir de la géométrie du contact. On supposera :

1. une contribution au frottement découplée des fibres et de la matrice
2. un frottement des fibres et de la matrice isotrope, c'est-à-dire indépendant du sens de glissement
3. un frottement interfacial sans usure

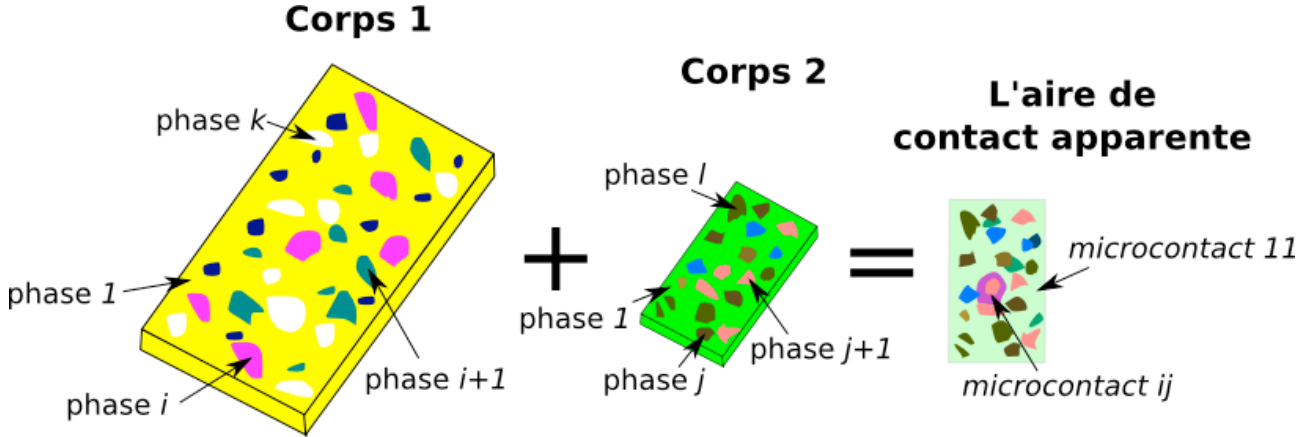


FIG. 1 — Contact de deux corps multiphases

Le principe est de séparer les contributions au frottement des différentes phases du matériau composite. Afin d'éviter l'usure, les composites sont soumis à de faibles charges normales. On suppose que le coefficient de frottement entre deux composites peut être décrit par la relation suivante :

$$\mu_{comp/comp} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l A_{ij} \mu_{ij} \quad (1)$$

où k et l sont les nombres de phases des corps 1 et 2 respectivement.

Le problème réside alors en la détermination des coefficients, A_{ij} , dit *coefficients de contribution*. On représente le contact des matériaux multiphasiques comme une somme des microcontacts entre chaque phase du composite 1 et du composite 2. On peut ainsi estimer la contribution de chaque type de microcontact au contact total. Dans ce cas on va chercher A_{ij} comme

$$A_{ij} = \frac{n_{ij} S_{ij}}{S} \quad (2)$$

n_{ij} est le nombre de microcontacts entre phase i du composite 1 et phase j du composite 2; S_{ij} est l'aire réelle moyenne d'un microcontact du même genre; S est l'aire totale de tous les microcontacts.

A priori, le nombre de microcontacts de chaque type est

$$n_{ij} = N_i N_j \quad (3)$$

où N_i et N_j sont les nombres de particules (fibres ou autre renforcement) des phases i du composite 1 et des phases j du composite 2 respectivement.

Basé sur le même principe de décomposition du contact total comme une somme de microcontacts, la formule pour l'aire de contact réelle est :

$$A_r = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l n_{ij} S_{ij} \quad (4)$$

1.1 Cas d'un contact entre une matière composite fibreuse et une matière uniphasique

Examinons maintenant le cas d'un contact entre un matériau composite constitué d'une matrice polymère et de fibres longues et un matériau uniphasique. Dans ce cas $k=2$ et $l=1$. Selon notre modèle, le coefficient de frottement devient :

$$\mu_{comp} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^1 A_{ij} \mu_{ij} = A_{11} \mu_{11} + A_{21} \mu_{21} \quad (5)$$

Désormais on peut présenter l'aire de contact réelle à partir des coefficients A_{ij}

$$A_r = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^1 n_{ij} S_{ij} = (A_{11} + A_{21}) S \quad (6)$$

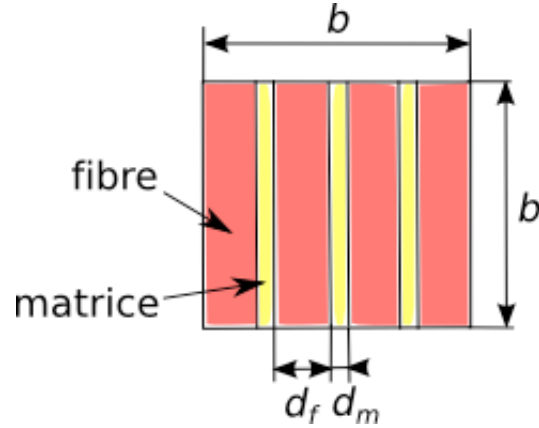


FIG. 2 — Zone de contact entre un matériau composite fibreux et un matériau uniphasique.

A partir des caractéristiques du composite, le diamètre de fibre d_f , et la fraction de fibre surfacique A_f , on peut déterminer le nombre de fibre en contact

$$N_f = \frac{A_f b}{d_f} \quad (7)$$

L'aire de chaque microcontact vaut

$$S_{ij} = d_i d_j \quad (8)$$

où d_i et d_j sont les largeurs moyennes des phases i et j .

Pour le composite fibreux d_i est le diamètre d'une fibre d_f et d_j se trouve comme

$$d_m = \frac{d_f}{A_f} (1 - A_f) \quad (9)$$

L'aire de zone équivalente au contact réel est $S=b^2$. La géométrie du contact, présentée à la fig.2, nous permet d'estimer les coefficients A_{ij} en utilisant eq. 2

$$A_{ij} = \frac{n_{ij} S_{ij}}{S} = N_i \frac{d_i b}{b^2} = \frac{A_f b}{d_f} \frac{d_i}{b} = \frac{A_f d_i}{d_f} \quad (10)$$

$d_i = d_f$ pour $i=1$ et $d_i = d_m$ (eq. 9) pour $i=2$. Alors

$$\begin{cases} A_{11} = A_f \\ A_{21} = 1 - A_f \end{cases} \quad (11)$$

Et finalement pour le coefficient de frottement on obtient

$$\mu_{comp} = A_f \mu_{11} + (1 - A_f) \mu_{21} \quad (12)$$

On doit remarquer que l'équation 12 a la forme d'une loi de mélange, présentée en introduction, avec μ_{11} et μ_{21} représentant les coefficients de frottement du matériau uniphasique/fibre et matériau uniphasique/matrice respectivement. Le coefficient A_f est fonction de la fraction volumique des fibres. Un calcul supplémentaire montre que dans le cas de matériau composite fibreux $A_f = V_f$.

Pour vérifier les coefficients de contribution obtenus on regardera le rapport entre A_r et S , qui logiquement doit être égal à 1 :

$$\frac{A_r}{S} = A_f + (1 - A_f) \equiv 1$$

1.2 Cas d'un contact entre deux matériaux composites fibreux

Le prochain cas d'application du modèle est un contact entre deux matériaux composites fibreux. C'est un contact entre deux corps biphasiques, i.e. $k=l=2$. Si les deux composites sont identiques, en désignant les phases 1 et 2 comme f (fibres) et m (matrice), le coefficient de frottement et l'aire de contact deviennent :

$$\mu_{comp/comp} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \mu_{ij} A_{ij} = \mu_{ff} A_{ff} + 2\mu_{fm} A_{fm} + \mu_{mm} A_{mm} \quad (13)$$

$$A_r = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 n_{ij} S_{ij} = (A_{ff} + 2A_{fm} + A_{mm}) S \quad (14)$$

L'aire de contact réelle résulte de microcontacts de trois types : fibre-fibre, fibre-matrice et matrice-matrice. Si on rassemble tous ces microcontacts, on peut décrire l'aire réelle de contact, $S=b^2/\sin \phi$, par le schéma présenté à la fig. 3.

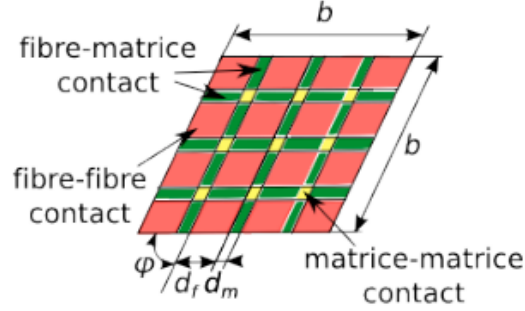


FIG. 3 — Zone de contact représentatif entre deux matériaux composites fibreux

L'aire réelle de chaque microcontact vaut

$$S_{ij} = \frac{d_i d_j}{\sin \phi} \quad (15)$$

où ϕ est l'angle d'orientation entre les fibres de deux composites, d_i et d_j sont les largeurs moyennes des phases i et j .

A partir des eq. 3 et 15 on peut ainsi identifier les coefficients de contribution A_{ij}

$$A_{ij} = \frac{n_{ij} S_{ij}}{S} = N_i N_j \frac{d_i d_j}{b^2} \quad (16)$$

Les calculs fournissent, en cas de deux composites identiques, les coefficients de contribution suivants :

$$\begin{cases} A_{ff} = A_f^2 \\ A_{fm} = A_f(1 - A_f) \\ A_{mm} = (1 - A_f)^2 \end{cases} \quad (17)$$

Le coefficient de frottement entre deux composites est alors égal à

$$\mu_{comp/comp} = \mu_{ff} A_f^2 + 2\mu_{fm} A_f(1 - A_f) + \mu_{mm} (1 - A_f)^2 \quad (18)$$

Pour appliquer cette équation il est nécessaire de connaître μ_{ff} , μ_{fm} , μ_{mm} . Ce sont les caractéristiques des matériaux de matrices et fibres déterminées expérimentalement.

On vérifie l'égalité entre A_r et S pour valider les coefficients de contribution obtenus :

$$\frac{A_r}{S} = A_f^2 + 2A_f(1 - A_f) + (1 - A_f)^2 \equiv 1$$

2 Résultats et discussion

Si les coefficient de contribution sont initialement fonction de plusieurs paramètres, tels que la fraction de fibres, l'orientation des fibres ou leur diamètre, il semble finalement que le paramètre prépondérant est la fraction surfacique de fibres. Afin d'illustrer sa contribution sur la réponse au frottement, l'évolution schématique du frottement composite avec la fraction de fibres est tracée fig. 4 dans le cas d'un contact composite/composite. Le coefficient de frottement des composites se situe dans un intervalle entre le coefficient de frottement entre fibres (la frontière inférieure) et celui d'un contact matrice/matrice.

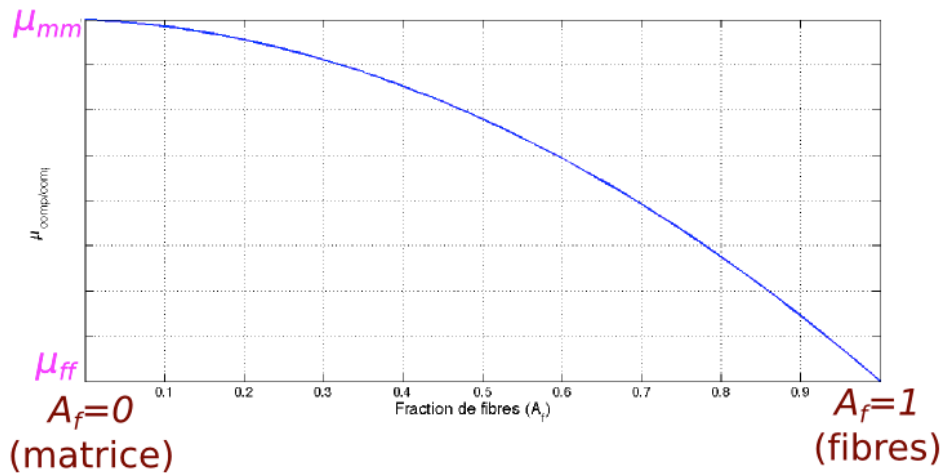


FIG. 4 – Contribution de la fraction des fibres au frottement des composites

2.1 Validation expérimentale

Ces modèles sont testés par des expériences réalisées sur trois types de contact : époxy/époxy, époxy/composite, composite/composite. En effet, il est nécessaire de connaître les coefficients de frottement μ_{ff} , μ_{fm} et μ_{mm} ainsi que les coefficients de contribution, issus quant-à-eux de considérations géométriques.

Le coefficient μ_{mm} est trouvé directement à partir de l'essai de frottement entre deux échantillons en époxy : la valeur moyenne de μ_{mm} est égale à 0.5 pour une charge normale de 2 N et une vitesse de 10 mm/s.

Afin d'identifier μ_{fm} une série d'essais entre un époxy pur et un composite à matrice époxy renforcé par 62% volumique de fibres de carbone (CFRP) est réalisée. Dans ce cas la valeur de μ_{comp} obtenue est égale à 0.49. L'équation (12) fournit alors la valeur de ce coefficient μ_{fm} :

$$\mu_{fm} = \frac{\mu_{comp} - (1 - A_f)\mu_{mm}}{A_f} = 0.48$$

Le coefficient μ_{ff} décrit le frottement entre des fibres de carbone. Comme la réalisation d'essais fibre/fibre pose certaines difficultés, on choisit une valeur issue de la littérature pour le frottement de graphite/graphite $\mu_{ff}=0.1$.

L'application de ces trois valeurs $\mu_{ff}=0.1$, $\mu_{fm}=0.48$, $\mu_{mm}=0.5$ de frottement dans l'équation (18) fournit la valeur théorique du frottement de composites à 62% : $\mu_{comp/comp}=0.34$.

En parallèle, des essais de frottement entre deux CFRP à 62% permettent d'obtenir une valeur expérimentale de $\mu_{comp/comp}=0.2$.

2.2 Discussion

On observe une différence entre les résultats expérimentaux et le modèle, pour la valeur de coefficient de frottement composite/composite. Cela peut s'expliquer par des imperfections du modèle, et/ou par celles lors de la réalisation des expériences.

La première approximation peut être causée par l'hypothèse que la distribution de contacts est considérée égale entre tous les types de microcontacts : c'est-à-dire qu'il y a autant de contacts fibre-fibre, fibre-matrice que matrice-matrice et ce, au niveau de l'aire réelle de contact. Le contact réel schématisé fig.5 montre que cette hypothèse n'est pas valide. La rugosité des surfaces n'est pas prise en compte. Pour améliorer le modèle il est nécessaire d'identifier les phases en contact et le type de contact qui prédomine. Afin d'évaluer ce paramètre on propose introduire des coefficients, ν_{ij} , analogues aux coefficients de contribution, mais tenant compte de la probabilité de distribution de contacts entre les phases. En conséquence le coefficient de frottement de composites deviendrait alors

$$\mu_{comp/comp} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^l A_{ij} \nu_{ij} \mu_{ij} \quad (19)$$

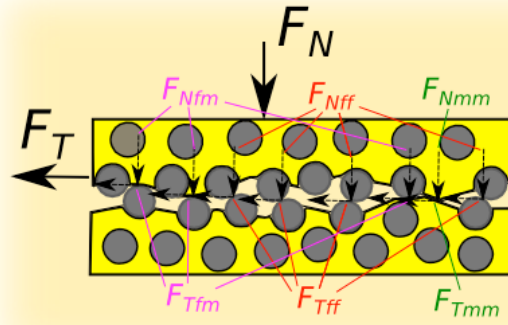


FIG. 5 — Coupe de contact entre deux FRP.

La deuxième hypothèse du modèle est l'isotropie des propriétés tribologiques des fibres et de la matrice. Bien que la matrice polymère soit isotrope, les fibres de carbone relèvent une anisotropie forte au moins en termes de propriétés mécaniques et on peut s'attendre à un frottement parallèle au sens des fibres différent de celui perpendiculaire.

Conclusions

Un modèle de frottement entre matériaux composites à plusieurs phases a été présenté. Selon ce modèle le cas de contact entre le composite fibreux et un matériau homogène et le cas de contact entre deux tels composites ont été étudiés plus précisément. Les équations pour le coefficient de frottement ont été obtenues dans deux cas. Dans le premier cas cette équation révèle une coïncidence avec la loi de mélange trouvée dans la littérature. Ensuite le modèle a été testé expérimentalement sur des matériaux composites à matrice époxy renforcée par des fibres de carbone longues. Les résultats des essais ont montré un certain décalage par rapport aux prédictions du modèle. Les raisons possibles de ces dissonances ont été discutées et permettent d'identifier des pistes d'amélioration du modèle.

References

- [1] D. Gay, Matériaux composites. Paris-Londre-Lausanne: Hermes, 1987
- [2] K. Friedrich, Friction and wear of polymer composites, Elsevier Science Ltd, 1986
- [3] W.M. Garrison Jr, Khrushov's rule and the abrasive wear resistance of multiphase solids, *Wear*, 82, 213-220, 1982.
- [4] G. Stachowiak, A W Batchelor, Engineering tribology. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005
- [5] N. Axén, I. M. Hutchings, S. Jacobson, A model for the friction of multiphase materials in abrasion, *Tribology International*, 29, 6, 467-475, 1996.