

MODÉLISATION DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX COMPOSITES

Conf. dr. ing. Catalina Maier
Sef lucr. dr. ing. Mihaela Banu
Universitatea Dunarea de Jos din Galati

RÉSUMÉ

Ce papier présente une méthode de modélisation du comportement mécanique des matériaux composites à partir du comportement de chaque composante. Une base de données expérimentales est réalisée à la suite des essais de traction et de cisaillement monotone et cyclique pour être utilisée à la simulation numérique. Les paramètres de calcul éléments finis ont été choisis en basant sur la simulation d'une traction simple du matériau composite.

1. Introduction

Différentes pièces d'automobiles sont fabriquées par mise en forme des matériaux composites.

A l'issue du processus de fabrication équivalent à des trajets de déformations complexes, des défauts d'aspect rhébitaires apparaissent dans les régions à forte sollicitation (striction localisées, fissurations, plis, ...), dont l'origine dépend à la fois du matériau (nature et état de l'alliage considéré) et des sollicitations imposées (conditions aux limites).

Compte tenu de l'enjeu économique, un étude approfondie des facteurs limitant la mise en forme des matériaux composites permettra de rationaliser la production et de surcroît conforter le lancement de produits innovants.

2. Comportement mécanique du matériau

L'étude du comportement d'un matériau composite suppose, au début, l'analyse du comportement mécanique de chaque composant et après, l'analyse de l'ensemble.

Cette analyse consiste en des essais mécaniques de traction et de cisaillement monotone et cycliques.

Les matériaux analysées ont été des feuillard d'aluminium revêtus de caoutchouc utilisées à la fabrication des coulisses de vitre d'automobile.

Comme renfort métallique nous avons étudié trois nuances d'aluminium les plus

employées dans la fabrication des coulisses armées.

Afin de tester l'anisotropie des matériaux, trois orientations de prélèvement ont été choisies: 0° , 45° , 90° par rapport au sens de laminage.

Les éprouvettes sont prélevées sur bandes pour les matériaux nues ou sur coulisses pour les matériaux revêtus de caoutchouc. En raison de la faible largeur des bandes et des coulisses, l'utilisation d'éprouvettes normalisées n'a pu être possible. Pour réaliser cet essai, les éprouvettes schématisées sur la figure 1 sont usinées et s'adaptent sur une micromachine de traction.

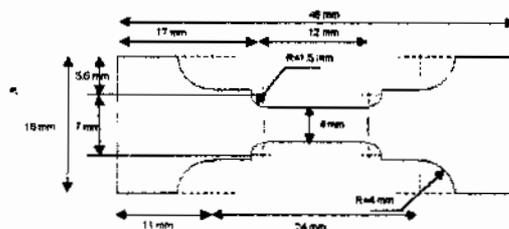


Figure 1

Les essais ont été réalisés avec des vitesses de $V=10 \mu\text{m/s}$ (soit une vitesse de déformation de 10^{-3} s^{-1}) et $V=5 \mu\text{m/s}$ (soit une vitesse de déformation de $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$).

L'essai de cisaillement simple, particulièrement adapté aux tôles, permet d'atteindre des déformations plastiques nettement plus élevées qu'en traction simple. Il

permet également d'effectuer des essais de cisaillement cyclique à grande amplitude, utiles dans l'identification de l'écrouissage du matériau. Des éprouvettes parallélépipédiques, de longueur $L=50$ mm et de largeur $l=19$ mm, sont prélevées sur les tôles d'épaisseur $e=1$ mm dans le sens de laminage. Après le serrage dans les mors du dispositif la largeur utile de l'éprouvette est de $h=3$ mm. Cette géométrie respecte les conditions $L/e > 10$ et $h/e < 10$ qui assure une bonne homogénéité de la déformation tout en minimisant les risques de flambage.

La figure 2 présent, pour une nuance d'aluminium, une comparaison du cisaillement monotone et de la déformation cumulée sur un cycle.

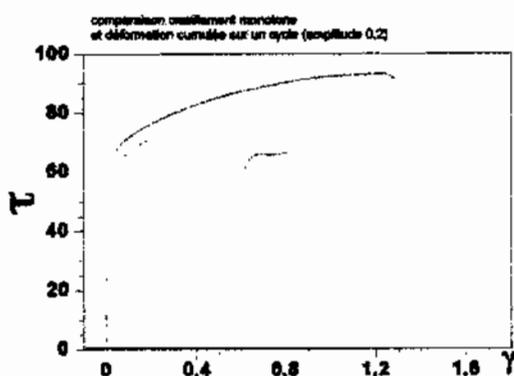


Figure 2

La comparaison du cisaillement monotone et de la déformation cumulée sur un cycle mettent en évidence une partie cinématique de l'écrouissage.

Afin de comparer l'écrouissage en traction et en cisaillement, la contrainte et la déformation de cisaillement sont ramenées à des contraintes et déformations équivalentes (au sens von Mises). Dans l'hypothèse isotrope [1], la courbe équivalente/déformation équivalente en cisaillement se confond avec la courbe contrainte-déformation mesurée en traction.

La contrainte équivalente au sens von Mises est:

$$\sigma_{eq} = \left(\frac{3}{2} s_{ij} s_{ij} \right)^{1/2} \quad (1)$$

ou s est le déviateur des contraintes.

En traction σ_{eq} est égale à la contrainte de traction pendant qu'en cisaillement elle est:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{3} \cdot \tau \quad (2)$$

La déformation équivalente, au sens von Mises est:

$$\epsilon_{eq} = \left(\frac{2}{3} \epsilon_{ij} \epsilon_{ij} \right)^{1/2} \quad (3)$$

En traction elle est égale à la déformation axiale et en cisaillement elle devient:

$$\epsilon_{eq} = \Delta x / (\sqrt{3} \cdot h) \quad (4)$$

ou Δx est le déplacement relatif des deux parties fixes et mobile du dispositif de cisaillement;

h – la largeur utile de l'éprouvette.

La figure 3 compare les deux courbes pour une nuance d'aluminium.

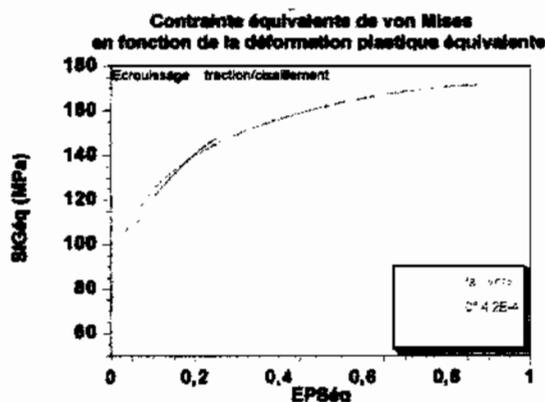


Figure 3

La comparaison traction/cisaillement donne de bons ordres de grandeur mais l'extrapolation aux grandes déformations plastiques de la courbe de traction surestime largement l'écrouissage réel constate en cisaillement.

La courbe de traction du bimatérial est comparée en figure 4 à la courbe de traction de l'alliage d'aluminium.

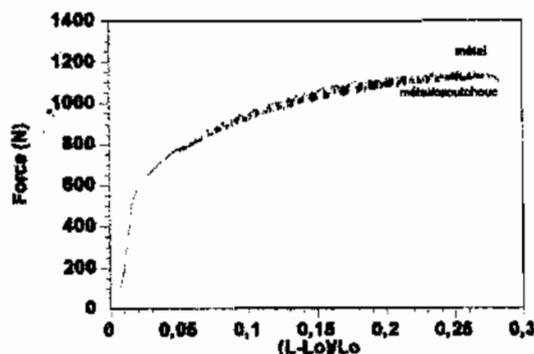


Figure 4

Dans le cas de la traction d'éprouvettes composites aluminium/caoutchouc, les courbes force-allongement sont très voisines de ceux de la traction du métal seul, ce qui est cohérent

avec les faibles niveaux de contraintes dans le caoutchouc. Il peut sembler étonnant que sur la figure 4 la courbe du métal soit plus élevée que celle du bimatériau, cependant la partie métallique des éprouvettes composites n'est pas forcement dans le même état thermomécanique que celui des éprouvettes métalliques.

Au cours de la fabrication d'une coulisse renforcée, les feuillets d'aluminium sont enrobés de caoutchouc. L'élastomère utilisé est le caoutchouc compact dont le comportement mécanique hyperélastique peut être modélisé par une loi du type Mooney [2].

A la suite des essais mécaniques une base de données expérimentales concernant le comportement des différents nuances d'aluminium a été établie.

4. Simulation numérique

Les calculs éléments finis ont été réalisés à l'aide du code MARC 7.1. Pour un calcul performant, il convient d'introduire dans le code des données pertinentes, tant au niveau des matériaux qu'au niveau des paramètres de calcul. Les données matériaux (contact, loi de comportement, ...) ont été fixées en s'inspirant de la littérature (E, ν , paramètres du modèle Mooney) ou à partir de tests réalisés en laboratoire (écrouissage en traction).

Dans le premier temps, le choix du type d'élément fini pour les matériaux, ainsi que le mode de représentation de l'interface du bimatériau sont choisis à partir de la simulation d'une traction simple.

Pour représenter l'aluminium, les éléments répertoriés dans les notices MARC [3] sous la référence 7 et 117 ont été retenus. Pour le caoutchouc, les éléments 120 et 84 ont été testés.

L'élément 7 est un élément hexaédral à huit points de Gauss, dont les fonctions d'interpolation trilineaires induisent une représentation assez pauvre en cisaillement.

L'élément 117 se marie a priori bien avec l'élément 120 pour décrire des problèmes bimatériaux avec plasticité. C'est un élément hexaédral à huit noeuds avec un point d'intégration au centre. Cet élément est conseillé pour des problèmes avec contacts.

L'élément 120 est particulièrement recommandé pour le modèle de Mooney; cet élément hexaédral possède huit noeuds et un point d'intégration au centre.

L'élément 84 est similaire au 7 mais possède un noeud supplémentaire pour la pression.

Pour tester l'efficacité de ces éléments, la traction uniaxiale de 50% d'une éprouvette parallépipédique maillée avec huit éléments a été

simulée. Les déplacements aux noeuds de deux faces opposées sont imposés suivant x et fixés pour y et z. L'élongation de 50% est réalisée en 100 secondes.

Dans ces simulations, la loi de comportement de l'aluminium est introduite point par point (à partir de la courbe expérimentale d'écrouissage en traction) et une description de Mooney est utilisée pour le caoutchouc ($C_{10}=0.95$, $C_{01}=0.093$, $C_{20}=0.008$).

Des simulations mono-matériau (les 8 éléments sont occupés par le même matériau) et bimatériau (4 éléments pour l'un et 4 pour l'autre) ont été exécutées.

Le calcul est exécuté en plasticité finie (large displacement) par la procédure de Lagrange réactualisée.

Pour les calculs sur bimatériaux, l'interface a été décrite soit avec des noeuds simples soit avec des noeuds doubles. Afin d'obtenir des noeuds dédoublés à l'interface, les corps sont initialement éloignés puis rapprochés et collés (option Glue) avant la traction.

Le graphique de la figure 5 présente pour des monomatériaux ou bimatériaux la contrainte dans l'axe de traction pour la section centrale de l'éprouvette qui peut être visualisée sur la figure 6.

Pour l'aluminium l'élément 7 semble donner des niveaux de contraintes plus raisonnables (250 Mpa) que celles obtenues avec l'élément 117 (450 Mpa).

L'utilisation de l'élément 84 pour le caoutchouc conduit à des contraintes plus élevées qu'avec une description en éléments 120. En outre, les contraintes calculées avec les éléments 84 sont également plus élevées que celles calculées sur l'aluminium avec les éléments 7; la conjonction des éléments 7 pour le métal et 84 pour le caoutchouc semble aberrante.

Ainsi, le couple d'éléments qui semble le plus approprié pour décrire le bimatériau métal/élastomère est l'élément 7 pour le métal joint au 120 pour le caoutchouc.

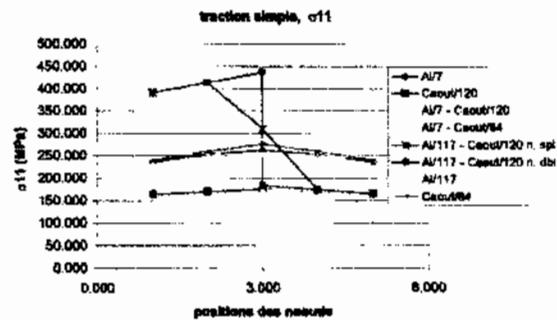


Figure 5

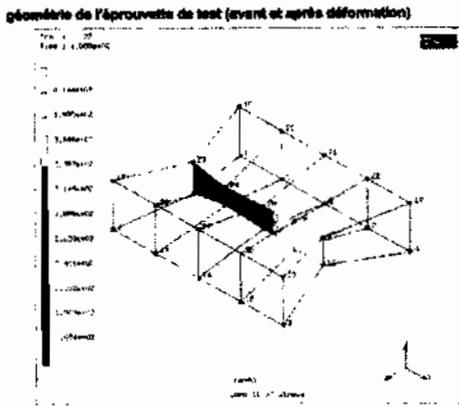


Figure 6

De plus, l'utilisation des noeuds simples pour décrire l'interface entre les deux matériaux ne traduit pas la discontinuité des contraintes σ et τ qui doit exister à travers l'épaisseur. L'utilisation de noeuds doubles à l'interface est plus correcte, mais plus délicate à mettre en oeuvre dans des géométries complexes.

4. Conclusions

Les essais mécaniques ont fourni des données indispensables à la simulation numérique. Elles doivent être encore exploitées en vue d'obtenir l'identification des lois de comportement, et enrichies de résultats

complémentaires (sensibilité à la vitesse et à la température).

Les paramètres de calcul comme le type d'éléments, la description de l'interface métal/caoutchouc, ont été choisis en basant sur la simulation d'une traction simple du bimatériaux.

Une fois ces données collectées, la simulation des processus réels de mise en forme d'un matériau composite métal/caoutchouc peut être développée.

Remerciements

Les essais mécaniques ont été réalisées au Laboratoire des Propriétés Thermo-Mécaniques des Matériaux de L'Institut Galilée - Paris, France et nous tenons remercier à Monique Gasperini, Brigitte Bacroix et Cristian Teodosiu de m'avoir offrir leur support scientifique.

Références

- [1] Hill R. *The Mathematical Theory of Plasticity*, The Oxford Engineering Science Series, Clarendon Press, 1989.
- [2] P. Heulliet *Modélisation du Comportement Hyperélastique des Caoutchoucs Compacts et Cellulaires*, Tome 1 et 2, Mesnel étude R200, décembre 1996.
- [3]*** MARC documentation, Volume B : Element Library K7.

Modelarea comportarii mecanice a materialelor compozite

Rezumat

In lucrare este prezentata o metodologie de modelare a comportarii mecanice a materialelor compozite pornind de la identificarea comportarii fiecarei componente. Aceasta metodologie se bazeaza pe rezultatele incercarilor mecanice la tractiune simpla si forfecare monotona sau ciclica. Baza de date realizata in urma acestor incercari este utilizata in simularea numerica a proceselor de deformare plastica. O serie de parametri ai calculului de simulare cu elemente finite sunt determinati prin analiza incercarii la tractiune a unei epruvete realizate din materialul compozit.

Modeling of mechanical behavior for composite materials

Abstract

The paper presents a method for modeling the mechanical behaviour of the composite materials starting from the identification of each component behaviour. This method is based on results of tensile test and monotonous or cyclic shearing tests. The data base realised after these tests is utilised for numerical simulation of plastic deformation process. Analyzing the tensile test of a specimen from composite material, we can calculate a series of parameters of the simulation process with finite elements.