

Méthodes pour l'étude de l'effet de la mise en forme des systèmes sandwich acier/polymère/acier sur le niveau d'adhérence acier/polymère

J. Guillemenet*, S. Bistac*, P. Deprez**,
P. Junges**, J. Schultz*

* ICSI- CNRS, Mulhouse

** Usinor - LEDEPP, Florange

L'objectif de l'étude est de déterminer l'influence quantitative de la mise en forme (emboutissage, pliage ...) sur les propriétés d'adhérence de systèmes acier/polymère/acier, grâce à deux tests d'adhérence complémentaires (rupture en mode I et II) : le test de clivage en coin et la torsion par cisaillement. Les résultats, confrontés aux caractéristiques mécaniques de la résine, permettent de définir des premiers critères simples d'emboutissabilité.

■ INTRODUCTION

Les systèmes acier/polymère/acier, dits tôles sandwich, sont développés par les sidérurgistes dans le but de réduire le bruit et les vibrations, notamment dans l'automobile, le bâtiment et l'électroménager. Ces systèmes doivent répondre à plusieurs critères : cohésion suffisante des assemblages, aptitude au soudage, à l'emboutissage et au pliage, tenue en température et, bien entendu, niveau d'amortissement élevé dans les zones de température et de fréquence désirées.

La mise en forme des assemblages acier/polymère/acier est une opération délicate pour le matériau. Des phénomènes complexes faisant intervenir notamment les propriétés cohésives du polymère et l'adhésion polymère/métal sont rencontrés lors de l'emboutissage de tels systèmes. L'objectif de cette étude est, dans un premier temps, de développer des tests d'adhérence adaptés à la géométrie de nos systèmes et permettant de suivre l'évolution de leur adhérence après prédéformation. Le but sera ensuite de déterminer l'influence quantitative de la mise en forme sur les propriétés d'adhérence des assemblages acier/polymère/acier. La réalisation de ce travail repose en partie sur la décomposition de l'emboutissage par des sollicitations mécaniques simples, facilement modulables et contrôlables d'un point de vue qualitatif et quantitatif.

Deux tests complémentaires d'adhérence en cisaillement par torsion et clivage en coin ont ainsi été développés. Le cisaillement par torsion nous permet, dans un premier temps, de connaître les propriétés mécaniques et d'adhérence en mode II de la résine étudiée. L'évolution de l'adhérence après un endommagement en cisaillement est également suivie grâce à ce test de cisaillement pur. La mesure des propriétés d'adhérence des systèmes acier/polymère/acier en mode I avant et après déformation en expansion équibiaxée, traction plane et traction uniaxiale, est effectuée à l'aide d'un test de clivage en coin dynamique. Les résultats, confrontés aux caractéristiques mécaniques de la résine, permettent de définir des premiers critères simples d'emboutissabilité.

■ MATÉRIAUX

Les systèmes acier/polymère/acier étudiés sont composés d'un film de polymère thermodurcissable d'environ 45 μm , inséré entre deux tôles d'acier minces (0,4 mm) afin d'obtenir une structure confinée dans laquelle la viscoélasticité du polymère est utilisée à son maximum.

Le substrat est un acier doux (fourni par le groupe Usinor) dont les caractéristiques sont les suivantes :

- module d'élasticité : $2,1 \cdot 10^{11}$ Pa,
- contrainte à 0,2 % : $1,525 \cdot 10^8$ Pa,
- contrainte à la rupture : $2,94 \cdot 10^8$ Pa,

Manuscrit reçu le 10 décembre 1999, bon à publier le 10 juillet 2000.

© La Revue de Métallurgie 2001.

Method for studying the influence of the forming of sheet steel laminates on the adhesion polymer/steel

J. Guillemenet*, S. Bistac*, P. Deprez**,
P. Junges**, J. Schultz*

* ICSI- CNRS, Mulhouse

** Usinor - LEDEPP, Florange

Sheet steel laminates are obtained by the hot co-rolling of two sheets, one of which is precoated on the inside with a thin layer of viscoelastic resin. The sandwich structures obtained in this way dampen vibrations with damping coefficients similar to those of plastics, while conserving the strength of steel. They can be used for structures such as staircases, doors, floors, protection rails, etc. This configuration offers a large number of advantages due to the resulting original mechanical behaviour. In particular, it provides an efficient solution to requirements involving combinations of lightness, stiffness, mechanical strength and thermal insulation, and especially acoustic insulation which has led to the development of the vibration damping sandwich sheets.

The objective of the study is to determine the influence of the forming on the adherence properties of sheet steel laminates. When the core is thin, from 0.05 to 1 times the thickness of the facing sheet, the resulting sandwich can be coiled, and can be blanked and formed using standard techniques employed for ordinary sheets, and where necessary assembled to form the finished component. This is a major advantage of thin-core sandwich structures, which can be processed like standard sheet, but provide additional features such as lightness and vibrational damping. But the stamping operation is quite damageable for this sort of materials. Two adherence tests are using : torsion shear test (napkin-ring) and wedge test in order to evaluate the metal/polymer adhesion before and after deformation. Drawing is then decomposed in different solicitations : stretching (or biaxial tension), plane strain tension, uniaxial tension and shear deformation.

The torsion shear test gives information on the mechanical and adherence shear properties and allows to evaluate the damage sensibility of polymer during shear mechanical solicitation. The results show that the break shear behaviour of sheet steel laminates depends on a critical strain/deformation couple (γ_S, τ_S) of predeformation. This couple is a polymer characteristic which corresponds to the maximum elongation and damage of macromolecular chains, sollicitation and failure of cross-linked points. During the shear predeformation, if the sollicitation is going up this critical deformation, the shear adherence of the laminate decreases. The residual shear adherence after a shear sollicitation depends then on the intrinsic polymer properties and the sollicitation level.

The wedge test, chosen because of the small-scale of the sample ($10 \times 50 \text{ mm}^2$), allows us to test a large panel of sheet steel laminates after an elementary predeformation (uniaxial traction, plane traction and stretching). After these three types of predeformation, the residual metal/polymer adhesion rapidly decreases until a level of deformation corresponding to the yield limit of the polymer. For a more important deformation, the adhesion still constant. In spite of the important deformation obtained, no polymer/metal delamination is observed.

The proposed methodology permits to evaluate the impact of a forming on the adherence properties of steel/polymer/steel system. It can be applied to elementary deformation easily obtained in laboratory, in order to predict the evolution of adherence during real forming of the laminate.

- allongement réparti : 23,9 %,
- allongement à la rupture : 42,3 %,
- taux d'écrouissage : 0,2415,
- constante d'écrouissage : $5,325 \cdot 10^8 \text{ Pa}$.

Le polymère est une résine polyester réticulée avec une époxy (type DGEBA) et un anhydride. La *figure 1* représente une courbe de traction du polymère obtenue pour une vitesse de 100 mm/min. Son module d'élasticité est de 3,5 MPa et

sa température de transition vitreuse est située vers 10°C. Cette résine présente un domaine élastique jusqu'à une déformation de 13 % et un fort allongement à la rupture d'environ 200 %.

Le procédé de fabrication de ces assemblages est basé sur le colaminage à haute température des tôles d'acier. L'assemblage acier/polymère/acier est obtenu par enduction d'un film de résine d'épaisseur contrôlée, évaporation des solvants et calandrage à chaud des deux parements d'acier.

Notations

b	: largeur de l'éprouvette (m)
d(t)	: distance entre deux marques à l'instant t (m)
e	: épaisseur du polymère (m)
E	: module d'Young du substrat (Pa)
E _a	: module d'Young de l'adhésif (Pa)
G	: énergie à la rupture des systèmes acier/polymère/acier (J/m ²)
h	: épaisseur du substrat (m)
h _a	: épaisseur de l'adhésif (m)
L	: longueur de la fissure (m)
R _e , R _i	: rayon extérieur et intérieur de l'éprouvette de torsion (m)
R	: rayon moyen (m)
T	: couple de torsion (N/m)
TS (en indice)	: tôle sandwich
β	: rapport de rayon intérieur/extérieur de l'éprouvette de torsion
δ	: hauteur du coin (m)
ε ₁	: plus grande déformation (déformation principale) dans le plan de la tôle
ε ₂	: déformation principale perpendiculaire à ε ₁ dans le plan de la tôle
ε ₃	: déformation dans l'épaisseur de la tôle
γ	: déformation de cisaillement
θ	: angle de déformation (°)
τ	: contrainte de cisaillement (Pa)
τ _{rupt} ⁰	: contrainte de cisaillement à la rupture pour un échantillon non prédéformé (Pa)
τ _{def}	: contrainte de prédéformation en cisaillement (Pa)
τ _{rupt} ^{def}	: contrainte de cisaillement à la rupture pour un échantillon prédéformé (Pa)

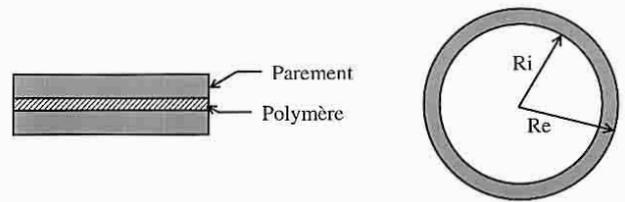


Figure 2. – Géométrie de l'éprouvette de torsion.

Figure 2. – Torsion shear sample geometry.

Dans notre cas, l'éprouvette se présente sous la forme d'un anneau de rayon intérieur et extérieur respectivement de 20 et 25 mm (fig. 2). Elle est collée sur deux supports métalliques sur lesquels sont usinées deux clavettes permettant de fixer l'ensemble sur les porte-échantillons de la machine de torsion MTS. Il est nécessaire de respecter rigoureusement les tolérances des différentes pièces (échantillon, porte-échantillon) et de bien les aligner de façon à s'assurer que le couple appliqué provoquera une torsion pure sur le joint de colle. Le collage des éprouvettes se fait alors à l'aide de gabarits en Teflon® assurant un parfait centrage de l'ensemble.

Soumis à une torsion, l'ensemble montage/colle/parement d'acier/polymère se déforme d'un angle total θ_{MTS} mesuré par la machine de torsion, que l'on peut décomposer de la manière suivante (fig. 3) :

$$\theta_{MTS} = 2 \theta_{montage} + 2 \theta_{colle} + 2 \theta_{m\acute{e}tal TS} + \theta_{polym\grave{e}re TS} \quad [1]$$

La mesure exacte du cisaillement subi par le polymère nécessite alors de connaître la valeur de θ_{polymèreTS}. Un capteur vidéo, composé d'une caméra équipée d'un objectif à fort grossissement, permet de suivre un marquage effectué sur la tranche du système acier/polymère/acier étudié (fig. 3 et 4). L'épaisseur du polymère doit être mesurée précisément et doit être constante sur toute la surface collée. Les échantillons, sous forme d'anneaux, sont obtenus par usinage dans des plaques de grandes dimensions. L'épaisseur de polymère est alors constante et aucune bavure de polymère n'est présente. De plus, grâce au capteur vidéo mesurant le cisaillement réellement subi par le polymère, l'épaisseur et les « bourrelets » de la colle permettant de fixer nos systèmes aux porte-échantillons ne sont plus des facteurs gênant l'expérience.

■ TECHNIQUES

Cisaillement par torsion

Ce test, appelé « napkin-ring », fut développé à l'origine par de Bruyne (1) et consistait à coller bout-à-bout deux cylindres de fine épaisseur, et à les soumettre à une déformation par torsion. Cet essai permet de déterminer la résistance au cisaillement, le module de cisaillement et la courbe contrainte/déformation des adhésifs collés avec des supports rigides.

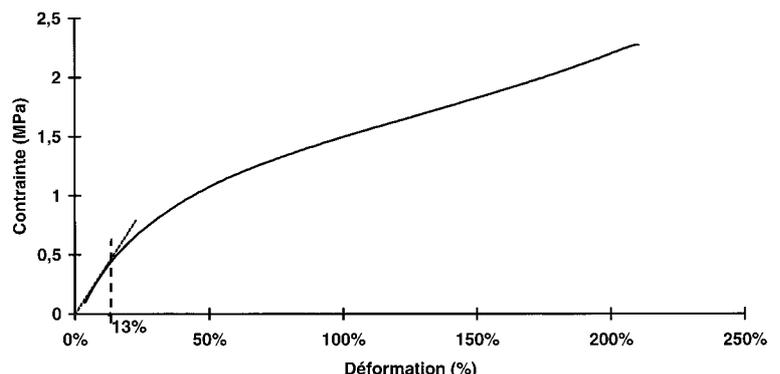


Figure 1. – Courbe de traction de la résine étudiée.

Figure 1. – Traction stress/strain curve.

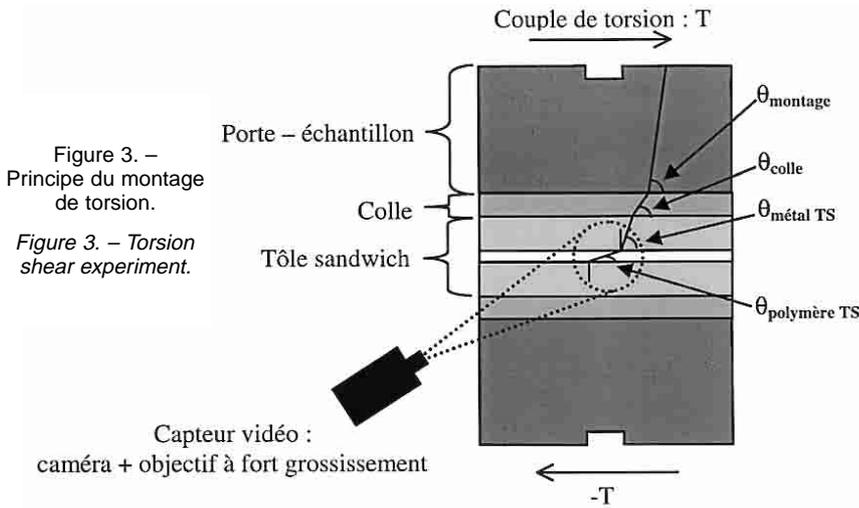


Figure 3. – Principe du montage de torsion.

Figure 3. – Torsion shear experiment.

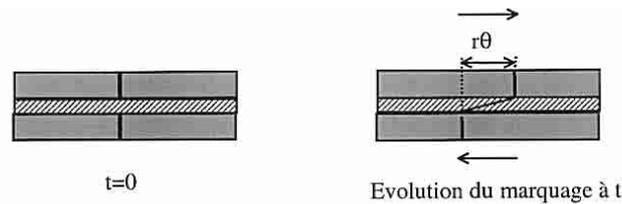


Figure 4. – Déformation du polymère et mesure de la distance entre deux marques.

Figure 4. – Polymer deformation and measure of the distance between two marks.

L'ensemble vidéo, placé sur une platine xyz permettant un réglage micrométrique du positionnement de la caméra, est supporté par un bras aluminium fixé sur le mandrin du porte-échantillon inférieur et permet de suivre les repères au cours de l'essai.

Tout au long de l'expérience, l'évolution du marquage est enregistrée à une fréquence maximale de une image par seconde. Un logiciel de traitement d'images et une routine spécialement développée permettent le dépouillement automatique de l'enregistrement.

La déformation de cisaillement γ à une distance r du centre est :

$$\begin{aligned} \gamma(r) &= \arctan\left(\frac{r\theta}{e}\right) \\ &= \arctan\left(2\frac{r}{e} \arcsin\left(\frac{d(t)}{2R_e}\right)\right) \end{aligned} \quad [2]$$

avec e : épaisseur du polymère et $d(t)$: écart entre les deux marques à l'instant t .

L'expression du couple de torsion T en fonction de la contrainte de cisaillement τ est :

$$T(\theta) = \int_{Aire} \tau \cdot r \cdot dA = 2 \cdot \pi \int_{R_i}^{R_e} \tau(r, \theta) \cdot r^2 \cdot dr \quad [3]$$

Lors de ce test, un état de contrainte de pur cisaillement se développe dans le joint, mais le champ circulaire associé n'est pas uniforme : il est maximal sur la périphérie ($r = R_e$) (fig. 5).

L'intégration de l'équation [3] n'est alors réalisable que si l'on connaît la loi de comportement du matériau. De Bruyne propose néanmoins de considérer le cisaillement comme homogène si la largeur de l'anneau $\Delta R = R_e - R_i$ est très inférieure à son rayon (ce qui est le cas dans cette étude).

L'équation devient alors :

$$\tau = \frac{T}{2\pi R^2 \Delta R} = \frac{2T}{\pi R_e^3 (1 + \beta)^2 (1 - \beta)} \quad [4]$$

avec R : rayon moyen et $\beta = R_i/R_e$: rapport des rayons intérieur/extérieur.

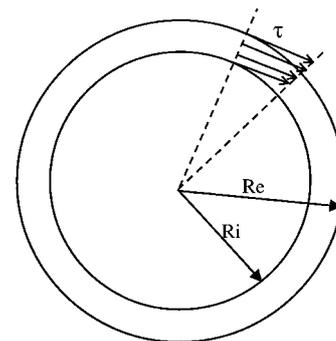


Figure 5. – Répartition des contraintes de cisaillement dans l'anneau de torsion.

Figure 5. – Shear stress distribution in a torsion ring.

Clivage

Le test de clivage (2-3) consiste à introduire un coin en acier inoxydable entre deux lames assemblées au moyen d'un adhésif (fig. 6) et permet de mesurer l'énergie de propagation d'un décollement. En effet l'écartement symétrique en mode I des plaques provoque la création d'une fissure qui se propage jusqu'à l'équilibre. Si aucune énergie n'est dissipée dans les lames et l'adhésif, l'énergie élastique libérée par le substrat est égale à la résistance à la rupture du joint. La connaissance des caractéristiques mécaniques et géométriques des parements et de l'adhésif, de l'écartement du coin ainsi que celle de la longueur de la fissure à l'équilibre permettent de calculer l'énergie de rupture du joint adhésif suivant les équations suivantes (4) :

$$G = \frac{3Eh^3 \delta^2}{16L^4} \frac{1}{\left(1 + \frac{\lambda_0}{\lambda} 0.64 \frac{h}{L}\right)^4} \quad [5]$$

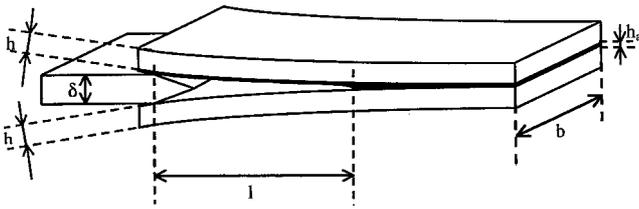


Figure 6. – Essai de clivage en coin.

Figure 6. – Wedge test.

avec :

$$\lambda = \left(\frac{3k}{Ebh^3} \right)^{1/4} ; \quad \lambda_0 = \left(\frac{3k_0}{Ebh^3} \right)^{1/4}$$

et :

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_0} + \frac{1}{k_a} \quad \text{où} \quad k_0 = \frac{2bE}{h} \quad \text{et} \quad k_a = \frac{bE_a}{h_a}$$

Notre choix s'est porté sur ce modèle pour calculer la résistance à la rupture de nos systèmes acier/polymère/acier. Ce modèle tient compte du fait que l'énergie élastique n'est pas uniquement emmagasinée dans les bras fléchis du double cantilever, mais également dans la partie non clivée. Cette dernière se déforme en effet d'une façon qui dépend des contraintes locales en bout de fissure, et donc des propriétés de l'adhésif (module d'élasticité et épaisseur) et de la longueur L de la fissure.

Malgré la faible épaisseur du coin, une très légère déformation plastique des parements apparaît. Dans le cadre de cette étude, l'énergie correspondant à cette déformation plastique n'est pas considérée parce qu'elle est constante : la même courbure des parements d'acier est mesurée sur les différents essais de clivage, et seule la longueur de la fissure varie. Il est possible de tenir compte de sa contribution dans la mesure de la résistance à la rupture en appliquant la méthode développée par Mantel et al (5) pour le pelage (ce calcul a été effectué et confirme que la part d'énergie due à la déformation plastique est faible).

De plus, il semblerait qu'aucun modèle de clivage ne permette de prendre en compte un comportement viscoélastique de l'adhésif.

Un test de clivage, adapté à la géométrie du système acier/polymère/acier utilisé, a alors été mis au point et est composé de :

- un coin de faible épaisseur afin de limiter la déformation plastique ;
- une visualisation précise de la longueur de la fissure sous un microscope optique ;
- un contrôle de la vitesse d'avancement du coin afin de solliciter le polymère de manière continue et à vitesse constante (6) ;

- un enregistrement sur support vidéo de la propagation de la fissure ;
- un ordinateur permettant l'analyse d'image.

Ce montage permet donc d'accéder à toutes les dimensions géométriques (longueur de fissure, écartement de parements, épaisseur de polymère, ...) nécessaires au calcul de la résistance à la rupture, et d'étudier l'influence de la vitesse d'introduction du coin sur l'adhérence ou également la cinétique de la propagation des fissures. Dans le cadre de cette étude, la vitesse d'introduction du coin est fixée à 0,8 mm/min.

Sollicitations mécaniques des assemblages

Lors de la mise en forme par emboutissage, une tôle sous forme de flan est déformée plastiquement par l'outillage. On peut distinguer trois grands modes de déformation (7, 8) : l'expansion, la traction large, le rétreint (fig. 7a). Il en existe, en fait, par combinaison entre elles, une infinité. Par convention, tout type de déformation d'un acier peut être représenté par un point du diagramme $\epsilon_1 - \epsilon_2$ (fig. 7b), où ϵ_1 est la plus grande déformation (déformation principale) dans le plan de la tôle et ϵ_2 la déformation principale perpendiculaire à ϵ_1 dans le plan de la tôle. La valeur de déformation ϵ_3 dans l'épaisseur est obtenue à partir de la loi de conservation du volume : $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$.

Dans le cadre de cette étude, l'emboutissage a été décomposé en sollicitations mécaniques simples, plus facilement modulables et contrôlables d'un point de vue qualitatif et quantitatif, permettant notamment de réaliser des mesures d'adhérence polymère/acier après sollicitations mécaniques de l'assemblage, et de parvenir à dégager les modes et taux de déformation particulièrement néfastes pour la cohésion du polymère et son adhésion vis-à-vis de l'acier.

Les prédéformations en cisaillement ont pour objectif de simuler l'inversion de cisaillement qui se produit lors du passage sur rayon de matrice. Un décalage entre les deux

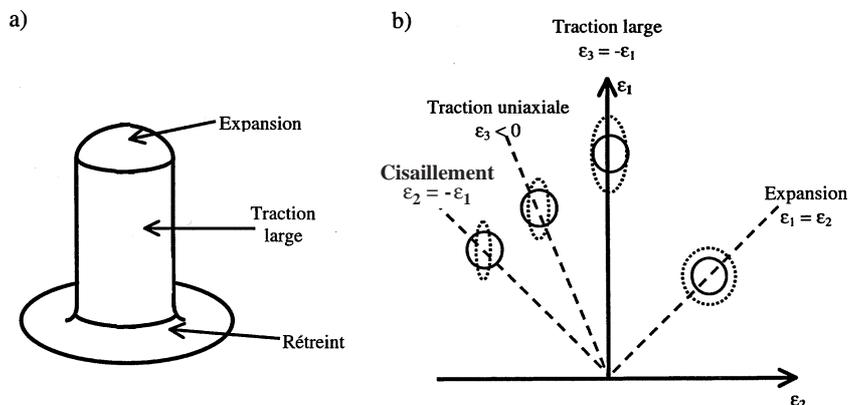


Figure 7. – a) Principales déformations rencontrées dans un embouti type godet ; b) diagramme de déformations possibles dans un embouti.

Figure 7. – a) Most important strain observed during pot stamping ; b) strain diagram for sheet forming.

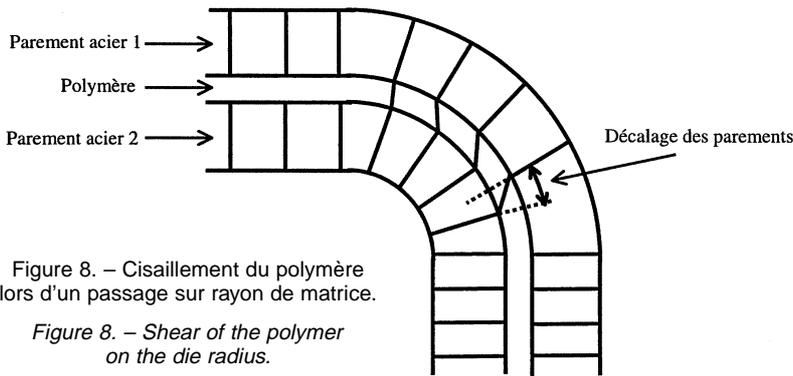


Figure 8. – Cisaillement du polymère lors d'un passage sur rayon de matrice.

Figure 8. – Shear of the polymer on the die radius.

parements (fig. 8) impose effectivement un cisaillement à la résine lors du passage sur rayon, mais également lors de l'écoulement de la structure sandwich dans un jonc utilisé pour bloquer la tôle sous serre-flan. Les essais de cisaillement ont été effectués sur la machine de torsion et sont plus précisément décrits dans la partie résultats.

La traction plane et la traction uniaxiale ont été respectivement obtenues sur une machine de traction large avec des éprouvettes de 295 × 270 mm², et sur une machine de traction universelle avec des éprouvettes ISO 20 × 80. L'expansion équi-biaxée a enfin été obtenue par le test de gonflement hydraulique Jovignot (bulge test en anglais).

■ RÉSULTATS

Cisaillement par torsion

Le test de cisaillement pur nous a permis, dans un premier temps, de connaître les propriétés mécaniques et d'adhérence des polymères utilisés pour la fabrication des tôles sandwich. Un exemple de courbe de cisaillement contrainte/déformation réelle obtenue pour une vitesse de 1°/300 s est présenté figure 9.

Outre le module de cisaillement (égal à 1,7 MPa) et l'énergie à la rupture G_{rupture}

$$\left(G_{rupture} = \frac{1}{\pi(R_e^2 - R_i^2)} \int_0^{\theta_{rupture}} T(\theta) d\theta \right),$$

la courbe de la figure 6 permet de connaître :

τ_{rupt}^0 : contrainte de cisaillement à la rupture pour un échantillon non préformé ;

(τ_s, γ_s) : couple contrainte/déformation de cisaillement au-delà duquel le comportement du polymère est modifié : élongation maximale et endommagement des chaînes macromoléculaires, sollicitation et rupture des nœuds de réticulation.

Après avoir obtenu les caractéristiques en cisaillement pur de nos systèmes, des tests de prédéformation

ont été effectués. Ces tests permettent d'évaluer la sensibilité à l'endommagement des polymères sous sollicitation mécanique (cisaillement pur). Ils consistent à faire subir à l'assemblage une prédéformation en cisaillement (double cisaillement dans un sens et puis dans l'autre à $v = 1^\circ/300$ s, limité à une contrainte d'amplitude τ_{def}) puis à mesurer l'adhérence résiduelle en torsion de l'assemblage après cette sollicitation. Un exemple est illustré figure 10.

L'évolution de la contrainte à la rupture (τ_{rupt}^{def}) avec la contrainte de prédéformation (τ_{def}) est représentée figure 11. Ce graphe montre

l'importance du couple (τ_s, γ_s), défini précédemment, qui s'avère être une valeur seuil de prédéformation ($\tau_s = 1,7$ MPa) en dessous de laquelle la contrainte de rupture en cisaillement (τ_{rupt}^{def}) ne change pas. Au-delà de cette valeur caractéristique du polymère, la contrainte à la rupture chute progressivement. Le comportement intrinsèque du polymère en cisaillement gouverne donc la tenue des assemblages à une prédéformation de type cisaillement.

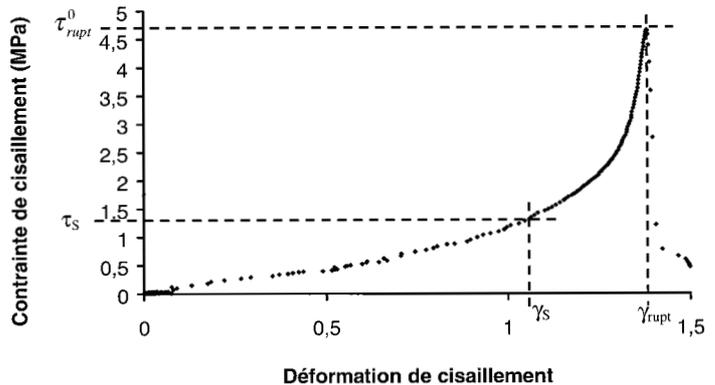


Figure 9. – Courbe contrainte/déformation de cisaillement.

Figure 9. – Shear stress/strain curve.

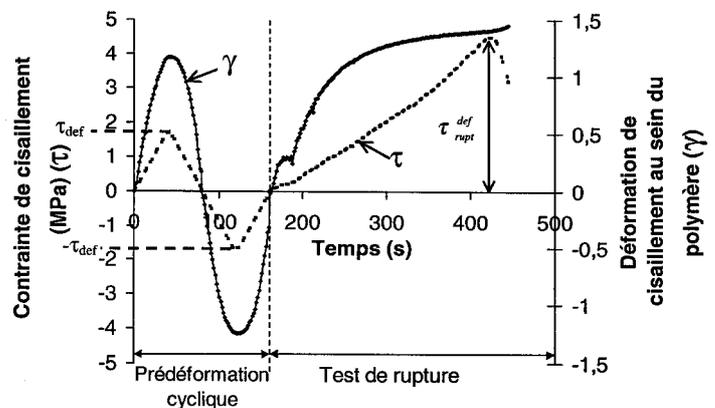


Figure 10. – Exemple de test de prédéformation en cisaillement.

Figure 10. – Example of a shear predeformation test.

Afin de limiter cette légère chute d'adhérence, il serait possible d'adapter la géométrie de la tôle sandwich en faisant varier l'épaisseur de polymère (décalage de parement = $2\pi e$) et le rayon de matrice R .

Clivage

Le niveau d'adhérence G_0 des assemblages est tout d'abord évalué avant prédéformation, puis les échantillons sont testés après sollicitation mécanique et l'évolution de l'adhérence résiduelle des assemblages est analysée en fonction du type de déformation mécanique élémentaire subie par le matériau. Le système acier/polymère/acier est déformé en traction uniaxiale, traction plane et expansion équibiaxée. La mesure des déformations sur ces éprouvettes prédéformées se fait à l'aide d'une grille de carrés ($2 \times 2 \text{ mm}^2$) disposée par gravure électrochimique sur le flan avant déformation.

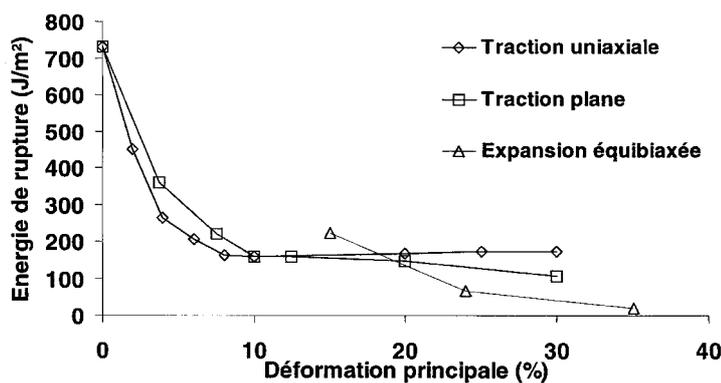


Figure 12. – Evolution de l'énergie à la rupture des systèmes acier/polymère/acier après prédéformation en traction plane, uniaxiale et expansion équibiaxée.

Figure 12. – Effect of different forming deformation on the adherence of steel/polymer/steel system.

La petite taille des échantillons testés par clivage (largeur = 10 mm et longueur = 50 mm), la faible épaisseur du coin utilisé (400 μm) et par conséquent la faible longueur de la fissure, nous permettent de déterminer l'adhérence résiduelle du système acier/polymère/acier dans une zone de prédéformation parfaitement déterminée.

L'adhérence résiduelle G du système ainsi déformé est alors tracée en fonction de la plus grande déformation principale ε_1 (fig. 12).

Les types de sollicitation mécanique étudiés dans cette étude conduisent à une diminution du niveau d'adhérence progressive, en première approximation identique dans les trois cas, jusqu'à une valeur de $\varepsilon_1 \approx 10\%$ correspondant à la limite d'élasticité du polymère en traction. Au-delà de cette valeur, le niveau d'adhérence des systèmes prédéformés reste constant avec une valeur moyenne de 210 J.m^{-2} pour

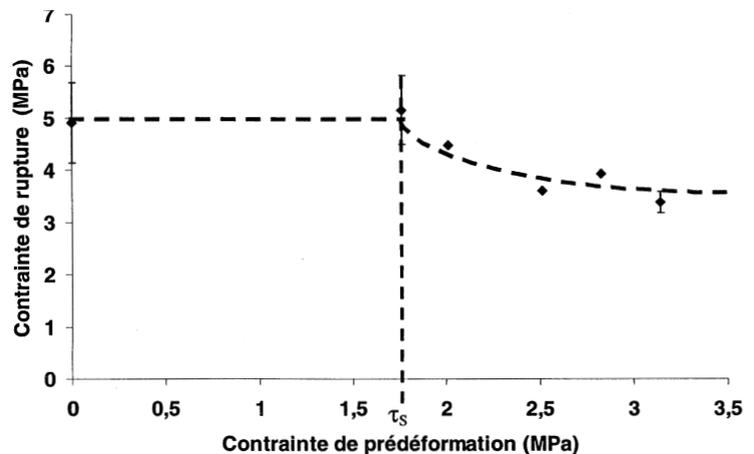


Figure 11. – Evolution de la contrainte à la rupture en cisaillement avec la contrainte de prédéformation en cisaillement.

Figure 11. – Effect of the shear predeformation stress on the shear break stress.

les trois types de déformation. Malgré les très grandes déformations étudiées (la rupture de l'acier a lieu par exemple pour 42,3 % d'élongation en traction uniaxiale), aucune délamination (énergie de rupture nulle) n'est à noter.

Cette méthode d'essai originale développée permet par conséquent de quantifier l'impact d'une sollicitation mécanique sur les propriétés d'adhérence de systèmes acier/polymère/acier lors de leur mise en forme.

CONCLUSION

Lors de cette étude, les propriétés mécaniques de la résine ont été étudiées. L'adhérence métal/polymère, avant prédéformation de l'assemblage, a ensuite été mesurée en mode I à l'aide du test de clivage en coin et en mode II grâce au test de torsion - cisaillement.

Afin d'évaluer l'effet de la mise en forme des tôles sandwich sur l'adhérence acier/polymère, l'emboutissage a été décomposé en sollicitations mécaniques élémentaires telles que le cisaillement, l'expansion équibiaxée, la traction plane et la traction uniaxiale.

La torsion annulaire a ainsi permis de montrer que le comportement à la rupture en cisaillement est modifié pour une prédéformation cyclique correspondant à une contrainte seuil caractéristique du polymère (élongation maximale et endommagement des chaînes macromoléculaires, sollicitation et rupture des nœuds de réticulation). Lorsque la contrainte de prédéformation est supérieure à cette valeur seuil, la contrainte de cisaillement à la rupture de l'assemblage chute progressivement.

Lors d'une prédéformation de type traction plane, uniaxiale et expansion équibiaxée, l'adhérence résiduelle chute par contre relativement rapidement jusqu'à une déformation principale correspondant à la limite d'élasticité du polymère, et reste ensuite constante pour des déformations supérieures.

Il est cependant délicat de comparer les résultats obtenus pour ces dernières prédéformations avec ceux du cisaillement. Les prédéformations en cisaillement sont en effet obtenues sans que l'acier soit déformé et donc sans que la surface d'acier en contact avec le polymère soit modifiée.

L'adhérence résiduelle après mise en forme dépend donc des propriétés intrinsèques du polymère et du niveau de sollicitation. Les propriétés mécaniques du polymère telles que le module d'élasticité du polymère, sa limite d'élasticité et bien entendu l'adhérence initiale polymère/acier, semblent en effet jouer alors un rôle important.

Cette méthodologie originale permet par conséquent de quantifier l'impact d'une sollicitation mécanique sur les propriétés d'adhérence des systèmes acier/polymère/acier : elle est fondée sur des déformations élémentaires facilement réalisables en laboratoire et vise à prévoir la variation d'adhérence induite localement lors d'une mise en forme complexe.

bibliographie

- (1) DE BRUYNE (N.A.). – Adhesion and Cohesion. P. Weiss Ed., Elsevier, N.Y. (1962), p. 47-64.
- (2) COGNARD (J.). – **J. Adhesion**, 20 (1986), p. 1-13.
- (3) BISTAC (S.), VALLAT (M.F.), SCHULTZ (J.). – **J. Adhesion**, 56 (1996), p. 205-215.
- (4) PENADO (F.E.). – **J. of Composite Materials**, 27, No. 4 (1993), p. 383-407.
- (5) MANTEL (M.), DESCAVES (F.). – **J. Adhesion Sci. Technol.**, 6, No. 3, (1992), p. 357-376.
- (6) GUILLEMENET (J.), BISTAC (S.), SCHULTZ (J.), DEPARIS (P.), DEPREZ (P.). – JADH'99, supplément à la revue **Le Vide** n° 291-1/4-1999 (1999), p. 15-18.
- (7) COL (A.), HEURTAULT (S.), MUNIER (M.). – Le livre de l'acier. Ed. Technique & Documentation Lavoisier (1994), p. 786-813.
- (8) HOSFORD (W.F.), DUNCAN (J.L.). – **JOM** : (1989), 51, No. 11 (1999), p. 26-38.