

24

TESTER L'EFFICACITE DES RESINES RESILIENTES POUR L'AMELIORATION DES PERFORMANCES STRUCTURELLES DES LIAISONS DANS LES BATEAUX EN MATERIAUX COMPOSITES*.

L.S. NORWOOD¹, C. CAULIER²

Résumé - Un des points essentiels à surveiller dans une structure en matériau composite, est sa capacité à résister aux contraintes de cisaillement ou de décollement interlaminaire. Le problème devient encore plus difficile lorsqu'un intervalle de temps s'écoule entre deux stratifications ou lorsque deux matériaux dissemblables doivent être joints. Dans le cas des navires chasseurs de mines, l'adhésion entre la coque et les raidisseurs devient un point critique lorsque le navire est soumis à des contraintes de choc par explosion sous-marine. Afin de réduire les coûts et d'améliorer l'adhésion coque/raidisseur, des systèmes ont été développés à base de résine uréthane acrylate, afin de remplacer les procédés mécaniques utilisés jusqu'à présent, pour arrêter la propagation des fissures. Cette présentation décrit les avantages de l'utilisation des uréthane acrylates pour les renforts de coque en comparaison avec les systèmes mécaniques.

Mots clés : joint, fixation, coque, raidisseur, uréthane acrylate.

INTRODUCTION

Les résines synthétiques renforcées sont maintenant reconnues et acceptées comme un des principaux matériaux pour la construction de bateaux. Leurs avantages ont déjà été souvent décrits et leurs propriétés amagnétiques les rendent particulièrement intéressantes pour la construction de navires de la Marine Nationale. L'utilisation de stratifiées verre/résine dans la réalisation de chasseurs de mines a fait progresser les composites du stade de la construction de bateaux vers le niveau de la construction de navires.

En Grande-Bretagne, les chasseurs de mines sont réalisés avec une coque monolithique et des raidisseurs, afin d'obtenir la rigidité de coque désirée. Ces raidisseurs sont réalisés par une stratification verre/résine sur une âme en mousse préformée, tout ceci dans une coque qui peut

* traduit de l'anglais.

¹ Scott Bader Co Ltd, Wollaston, Wellingborough, Northants, U.K.

² Scott Bader SA, 65 rue de Sully, F - 80044 Amiens Cedex.

avoir été achevée plusieurs semaines auparavant. La préparation de surface, avant la stratification du renfort, devient donc primordiale afin d'obtenir un accrochage dont la résistance au cisaillement interlaminaire sera identique à celle du stratifié monolithique de la coque.

Comme les structures des chasseurs de mines doivent supporter des chocs importants, il est essentiel que l'accrochage coque/renfort reste intact. Hélas, les essais ont révélé une tendance à la séparation entre la coque et le renfort, en cas de chocs importants. Ceci a été résolu par le boulonnage de la semelle de renfort dans la coque [1, 2], à l'aide de boulons en titane, chers et coûteux à installer.

Cette présentation passe en revue les différents procédés utilisés, pour réduire les coûts et améliorer l'adhésion et elle s'attache particulièrement aux bénéfices des systèmes à base de résine uréthane/acrylate.

DESCRIPTION DES ESSAIS

APPAREILLAGE

Des raidisseurs identiques à ceux couramment utilisés en production (figure 1) ont été réalisés et testés de différentes manières [3]. Les conditions de contraintes les plus sévères ont été obtenues en utilisant une fixation centrale au sommet du raidisseur et une attache fixée sur le stratifié de la coque (figure 2). Les résultats obtenus avec ce type d'essai ont confirmé ceux obtenus avec une analyse par éléments finis réalisée sur des raidisseurs chargés transversalement.

La fixation du bas était une barre en acier doux de section 50 x 50 mm, puis la charge a été appliquée avec un système de charge centrale de largeur 125 mm, au sommet du raidisseur.

DETAILS DE L'INTERFACE

Les arrangements suivants pour l'interface coque/raidisseur ont été testés :

- résine polyester standard avec roving de verre tissé (construction non modifiée) ;
- résine polyester standard avec boulons en titane ;
- résine polyester standard avec visserie en acier inoxydable ;
- tissu broché avec résine polyester ;
- tissu broché avec matrice acrylique ;
- tissu et mat de verre avec résine polyester ;
- stratifié du raidisseur réalisé avec un système acrylique modifié par un élastomère ;
- stratifié du raidisseur réalisé en mat de verre/résine acrylique ,
- stratifié du raidisseur et dernières couches de la coque réalisés en

- tissu de roving et résine uréthane acrylate ;
- stratifié standard en résine polyester plus garniture uréthane acrylate (figure 3) ;
- stratifié en résine uréthane au niveau de l'interface plus garniture uréthane acrylate.

RESULTATS ET DISCUSSION

INFLUENCE DU SYSTEME DE FIXATION

Le système de fixation utilisé a une influence significative sur le processus de rupture des raidisseurs [3]. Le système de charge centrale est un essai relativement simple qui reproduit assez fidèlement les pires conditions de chocs pouvant survenir dans la réalité. La force est appliquée au sommet du raidisseur avec une double fixation sur l'embase. Avec la force appliquée au sommet, les flancs du raidisseurs ne présentent qu'un fléchissement très minime. Les contraintes se concentrent à la verticale du flanc du raidisseur et la rupture se produit rapidement par un délaminage le long de l'interface.

L'essai de pelage lent utilisant le système de charge centrale a fourni les faciès de rupture les plus représentatifs d'une rupture par choc sur les éprouvettes non renforcées et de raidisseurs boulonnés ; la comparaison entre les éprouvettes de rupture et celles pleine échelle endommagées par une onde de choc de mine a indiqué une séparation entre le raidisseur non renforcé et la coque pour les éprouvettes non boulonnées et des fissures le long de l'interface secondaire qui étaient arrêtés aux boulons pour les éprouvettes de raidisseur boulonné.

CONTROLE DES EPROUVETTES

Les cinq premières éprouvettes décrites au paragraphe "détail de l'interface" étaient considérées comme des constructions conventionnelles possibles. Les détails concernant leur rupture sont indiqués dans la figure 4.

La construction non modifiée ne présentait aucun dommage visible à l'interface, jusqu'au moment de la rupture complète et de la séparation totale de la semelle, par rapport à la base, et ce, à l'interface.

La construction réalisée avec un tissu broché et une résine de polyester au niveau du plan de contact présente une courbe charge/déformation supérieure de 15 % à celle de la construction non modifiée. Là encore, la rupture est totale au niveau du plan de contact.

La construction réalisée avec un tissu broché et une résine acrylique à l'interface présente une première fissure à 20 kN, à la verticale du flanc du raidisseur, non pas à l'interface, mais dans le stratifié de base. L'ensemble a encore supporté une charge de 30 kN jusqu'à ce que la

fissure s'agrandisse et permette à une semelle de décrocher. Cette rupture partielle au niveau de l'interface se termine aussi par une séparation complète.

La construction réalisée avec des boulons en titane commence à se fissurer à 22 kN avec une rupture au niveau de l'interface qui démarre à la verticale du flanc du raidisseur et se propage vers l'extérieur jusqu'aux boulons. Le même phénomène apparaît sur l'autre semelle lorsque la charge augmente, puis la rupture s'étend autour des boulons, puis la tête de la vis ainsi que l'écrou commencent à s'enfoncer dans le stratifié. Enfin, la rupture est totale lorsque l'écrou et la rondelle passent à travers le stratifié de la semelle.

L'énergie totale pour atteindre la rupture dans les constructions boulonnées est considérablement plus élevée que pour les autres systèmes.

La rigidité du congé flanc/semelle du raidisseur joue un rôle important en déterminant la distribution des contraintes le long de l'interface.

La matrice acrylique permet d'accroître l'adhésion à l'interface en répartissant les efforts hors de la zone de concentration des contraintes, mais ne permet pas d'atteindre les performances des réalisations boulonnées. De même, l'utilisation de vis en acier inox, moins onéreuses, ne donne pas les résultats des boulons en titane, et un travail complémentaire a été entrepris pour trouver une solution qui donnerait les mêmes performances que les boulons, mais à un moindre coût.

AUTRES TYPES D'INTERFACE

Les résultats obtenus avec une matrice acrylique étant prometteurs lors des premiers essais, notre attention s'est portée sur une amélioration de l'adhésion à l'interface semelle/base sans avoir recours aux fixations mécaniques (type brochage).

L'utilisation d'un mat de verre avec résine polyester au niveau de l'interface n'a pas amélioré l'adhésion entre le tissu de verre de la base et celui de la semelle. En fait, l'effort nécessaire pour la rupture était même de 20 % inférieur à celui de la construction non modifiée. La craquelure se propageait dans la couche en mat de verre (figure 5).

L'utilisation d'une matrice acrylique modifiée d'un élastomère au niveau de l'interface, bien que réduisant la rigidité de l'ensemble, permettait d'atteindre une charge de 19 kN avant l'apparition des premières fissures (figure 5). Ces fissures, situées au niveau du plan de contact, s'ouvraient non pas de manière catastrophique, mais lentement et à mesure de l'augmentation de la charge, jusqu'au décrochage complet de l'une des semelles.

Une observation attentive de la surface de rupture a permis de constater que la séparation s'était produite dans la première couche de tissu de verre/résine polyester et que la matrice acrylique était toujours

collée à la résine polyester au niveau de l'interface.

L'utilisation d'un mat de verre imprégné acrylique au niveau du plan de contact a donné des résultats inférieurs à ceux de la matrice acrylique seule sans renfort.

Une matrice autre que la résine acrylique a aussi été examinée avec attention, pour la bonne raison qu'elle avait été conçue comme une résine de stratification, donc facile à utiliser. Cette résine, une uréthane acrylate en solution dans le styrène monomère, servait de matrice aux dernières couches de la base (sur tissés de verre), ainsi qu'aux premières couches de la base du raidisseur, avec une application de ce produit pur à l'interface. Lors des essais, nous avons constaté une résistance plus importante que pour la plupart des autres systèmes (31 kN, figure 5). Quelques fissures de surface apparaissaient sur le stratifié de base avec une séparation partielle d'un des semelles, puis on notait une reprise de charge et enfin rupture à l'interface de l'autre semelle. Les principales fissures apparaissaient à l'angle du raidisseur.

Comparé à une construction non modifiée l'utilisation de résine uréthane acrylate avait pour conséquence de multiplier par trois l'énergie nécessaire à l'apparition des premières fissures. Le fléchissement du flanc du raidisseur était aussi réduit par une diminution des concentrations de contrainte à la verticale du flanc, cette résine offrant une interface plus souple que celle en polyester en raison de sa capacité à absorber plus d'énergie.

La matrice uréthane acrylate possède un allongement à la rupture supérieur à 100 % et résiste particulièrement bien à la propagation des fissures.

Les constructions réalisées avec les boulons en titane présentent les premiers signes de rupture avec seulement 50 % de l'énergie nécessaire pour l'apparition des mêmes symptômes sur les constructions en uréthane acrylate. Ce type de construction s'est donc avéré plus efficace et moins coûteux.

MATRICE URETHANE ACRYLATE DANS LES CHASSEURS DE MINES

Les résultats encourageants pour l'amélioration de l'adhésion coque/raidisseur nous ont poussé à parfaire cette conception afin d'améliorer le rapport coût/performance.

Différentes éprouvettes ont été testées avec un nombre réduit de couches de tissu de verre/résine uréthane acrylate et l'introduction d'une garniture en "compound" uréthane-acrylate à la verticale du flanc du raidisseur (figure 3). La présence de cette garniture augmente les performances de la construction (figure 5), mais le dessin de cette garniture n'a pas d'influence considérable sur les résultats.

Différentes combinaisons de garnitures et de stratifiées uréthane acrylate au niveau de l'interface sont détaillés (figure 6), ainsi qu'une

construction avec seulement une garniture uréthane acrylate sur une structure non modifiée, c'est-à-dire en polyester. Bien que cette dernière construction présente une rupture à un niveau de charge inférieur de moitié à celui nécessaire pour les éprouvettes avec les stratifiés en uréthane acrylate, elle approche tout de même les résultats obtenus avec les boulons en titane (figure 7), mais présente une absorption d'énergie avant les premières fissures bien meilleure que le système boulonné.

De toute évidence, l'utilisation de résine uréthane acrylate et d'une garniture modifie le processus de rupture des raidisseurs, comparé aux systèmes avec boulons (figure 7).

APPLICATION DE LA GARNITURE URETHANE ACRYLATE

Il est essentiel que la garniture soit appliquée de manière précise et constante entre le préformé en mousse et la coque du navire. Les constructions actuelles nécessitent un litre d'uréthane acrylate par mètre, le long du raidisseur et l'application se fait au pistolet pneumatique [4].

RESINES RESILIENTES POUR L'ADHESION A L'ÂME DE MOUSSE

L'utilisation de résines uréthane acrylate pour l'adhésion entre la mousse profilée, la coque et les raidisseurs a produit un intérêt pour son utilisation possible comme agent de liaison pour les structures sandwich renforcées avec une âme de mousse.

Les éprouvettes ont été construites en utilisant une mousse PVC à cellules fermées de densité 250 kg/m^3 , avec :

- des peaux de mat de verre polyester appliquées sans agent de liaison ;
- un agent de liaison en pâte d'uréthane acrylate entre la mousse et les peaux de plastique renforcées ;
- une résine de stratification uréthane acrylate à faible viscosité, utilisée pour stratifier la première couche de verre de chaque côté de la mousse, avant la stratification avec la résine polyester.

Bien que le système de pâte uréthane acrylate supporte des charges de rupture plus importantes que le matériau sans agent de liaison entre la mousse et les peaux, il présente un niveau de rupture cohésive qui peut se traduire par une rupture dans la mousse.

Dans le cas d'un système utilisant une résine uréthane acrylate à faible viscosité à l'interface, la rupture se produit par délaminage total des peaux renforcées, c'est-à-dire que la distribution de charge reste uniforme sur la surface de liaison jusqu'à ce que la zone la plus faible du système rompe. Dans ce cas, la résistance à la traction transverse de la peau en résine polyester renforcée de fibres de verre était plus faible que la

résistance de la mousse et que la liaison interfaciale.

On peut en retenir que la résistance de la liaison d'uréthane acrylate à une âme de mousse PVC et à du plastique renforcé est supérieure de 5,5 MPa.

CONCLUSION

L'utilisation de ces résines très résilientes retarde fortement l'apparition des fissures dans les zones critiques de la construction, comme par exemple au pied du flanc du raidisseur.

L'énergie nécessaire pour obtenir la rupture des raidisseurs avec garniture uréthane acrylate est similaire à celle qu'il faut pour les constructions boulonnées, mais l'énergie nécessaire pour provoquer les premières fissures est considérablement plus élevée dans une construction à base de résine uréthane acrylate.

L'utilisation de renforts imprégnés d'une résine uréthane acrylate en combinaison avec une garniture en uréthane acrylate au pied du raidisseur procure une structure plus performante que les autres types de construction.

Les systèmes de résines résilientes améliorent les performances des interfaces de plastique renforcé à âme de mousse jusqu'à un niveau où l'interface a de meilleures propriétés au cisaillement que les substrats.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier C.S. Smith de AME et D. Bashford de Fulmer Research pour nous avoir autorisé à publier leurs résultats, ainsi que les directeurs de Scott Bader Company Limited pour avoir permis la publication de cette communication.

1. SMITH C.S., 1973, Proc. Symp. on GRP ship construction, London RINA, pp 33-56.
2. SMITH C.S., PATTISON D., 1977, Proc. conf. designing with fibre reinforced materials, London, I.Mech.E, pp 33-36.
3. FULMER RESEARCH LABORATORY LIMITED,
The development of improved frames to hull bonds for GRP ships, rapport de recherche privé.
4. EUROPEAN ADHESIVES AND SEALANTS, décembre 1987. p. 6.

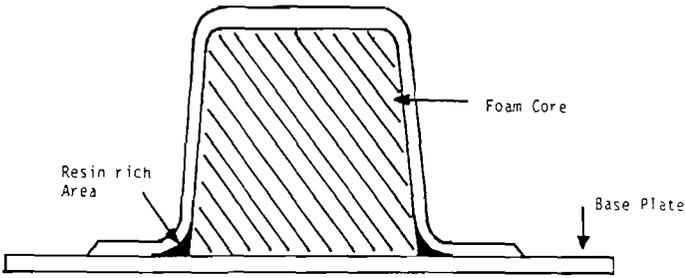


Figure 1. Raidisseur
Typical top hat stiffener

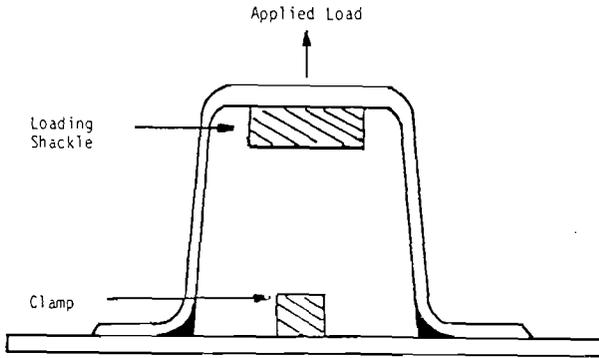


Figure 2. Sollicitation de raidisseur par le centre.
Centre clamp loading mode

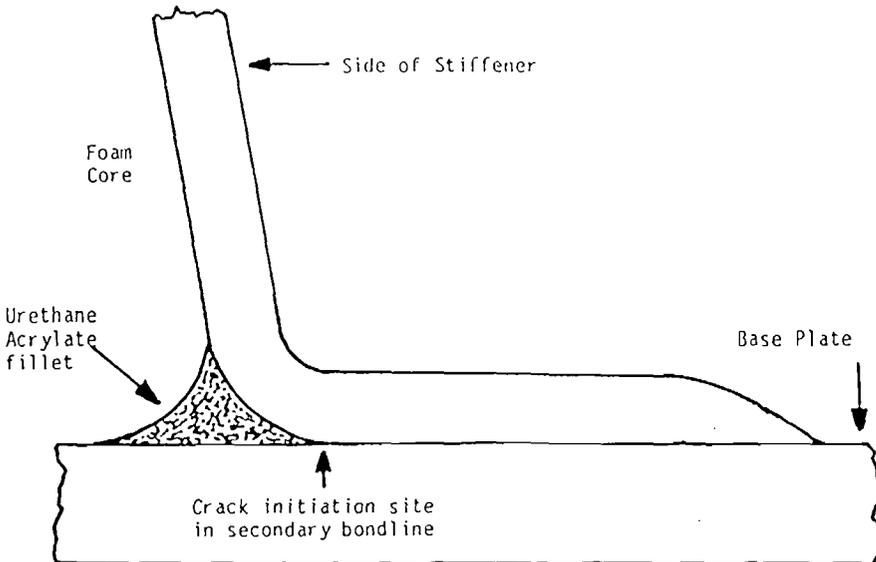


Figure 3. Raidisseur avec garniture d'uréthane acrylate.
Top hat stiffener with urethane acrylate fillet

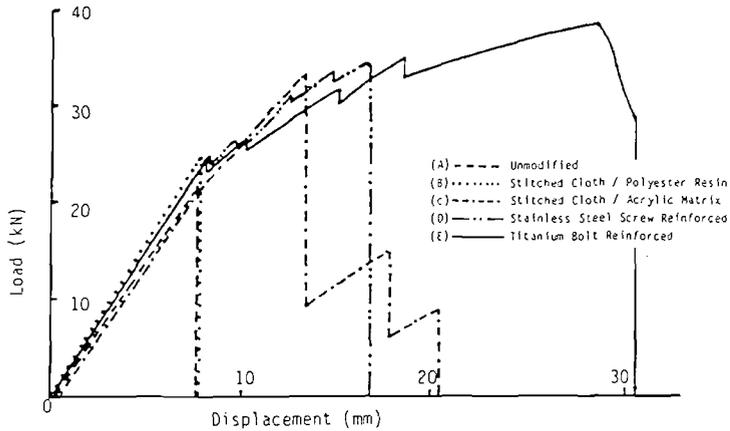


Figure 4. Essai de sollicitation de raidisseur par le centre.
Centre clamp top hat pull off tests.

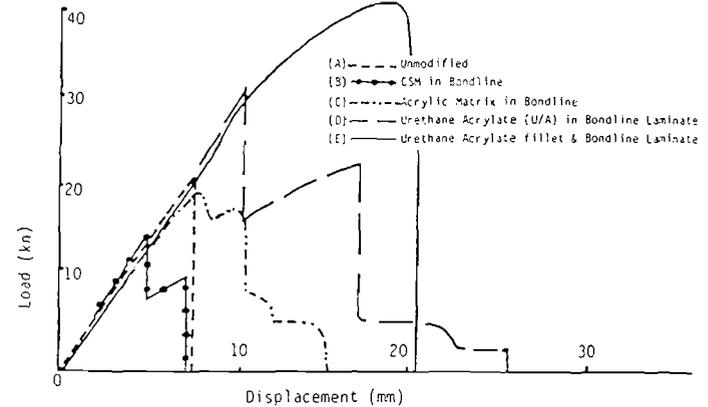


Figure 5. Essai de sollicitation de raidisseur par le centre.
Centre clamp top hat pull off tests.

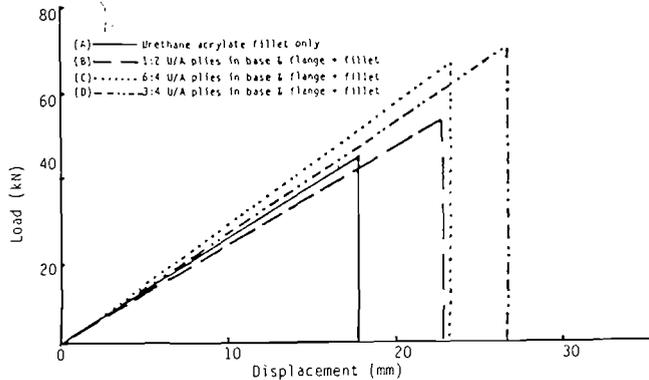


Figure 6. Essai de sollicitation de raidisseur par le centre, avec différent conditions d'interface.
Centre clamp top hat pull off tests with different bondline conditions.

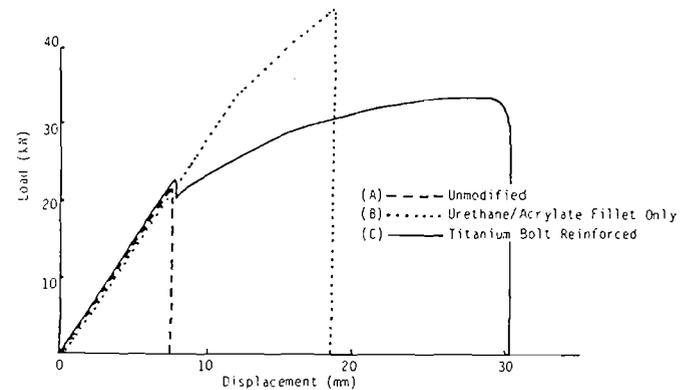


Figure 7. Essai de sollicitation de raidisseur par le centre, comparaison d'interfaces standard. avec uréthane acrylate..
Centre clamp top hat pull off tests, comparing standard bondlines with the adopted urethane acrylate system..