

7

LA CONCEPTION STRUCTURALE PRELIMINAIRE DE NAVIRES EN ÂMES SANDWICH * .

C. PREVITE¹

Résumé - La conception de stratifiés en fibres de verre est d'un grand intérêt pour les concepteurs et les ingénieurs de la marine. Cette communication résume le thème du choix de l'âme pour les structures marines, en fournissant une approche schématique pour simplifier la conception des stratifiés. Les propriétés de différents types d'âmes Polimex et les principales causes de rupture des sandwichs seront passées en revue. Dans un esprit de brièveté, l'analyse et les formules ont été simplifiées.

mots clefs : sandwich, PVC, conception, rupture

INTRODUCTION

La construction en sandwich est un concept qui s'est développé rapidement pour les structures marines ces vingt dernières années. Depuis sept ans, pratiquement tous les bateaux de plaisance américains de moins de 43 mètres ont été construits en sandwichs en fibres de verre (1,2). Les capacités de cette conception ont été prouvées, sont largement acceptées et un grand nombre de bateaux réussis naviguent.

Mais pour ceux qui ne sont pas accoutumés à concevoir des stratifiés en sandwich, il semble y avoir un nombre infini de "que faire si". Souvent, la taille et la complexité du bateau, couplées à une responsabilité potentielle en cas de rupture, conduit le constructeur à ajouter plus de stratifiés, "juste pour être sûr".

Les ingénieurs conçoivent typiquement des stratifiés en fibres de verre sur les bases de la supposition de l'homogénéité du matériau. La réponse sous charge et l'analyse des contraintes sont basées sur des formules techniques empruntées de la conception avec l'acier et l'aluminium. Cette pratique ne prédit pas de façon précise le comportement des stratifiés en fibres de verre sous contrainte et conduit habituellement à une conservation de la structure.

* traduit de l'américain

¹Polimex, Etats-Unis.

REVUE DE LA CONSTRUCTION EN SANDWICH

Un désavantage principal du GRP est son faible module en flexion. Donc, la limitation de la déflexion est le paramètre limitant de la conception. A cause de cela, le concepteur doit utiliser soit un réseau dense de raidisseurs longitudinaux et transversaux, soit des renforts sélectionnés et des systèmes de résine avec des modules de flexion plus élevés, soit encore changer pour une construction en sandwich.

Une construction en sandwich augmente les propriétés en section du stratifié sans en augmenter le poids. En général, les propriétés en section, l'inertie et le module en section peuvent être augmentés de trois façons, chacune avec différents niveaux d'efficacité. Le stratifié peut être épaissi, raidi ou on utilise une construction sandwich. Ces options peuvent être employées individuellement mais sont souvent utilisées en combinaison.

Une construction en sandwich augmente la rigidité en séparant le stratifié et en y insérant une âme épaisse et légère. Une âme épaisse augmente le moment d'inertie de la section du stratifié, et ainsi sa résistance à la flexion. Le poids du sandwich est réduit au minimum en utilisant des âmes de faible densité.

STRATIFIE SANDWICH

Un stratifié sandwich est constitué de trois parties : les peaux, l'âme et l'adhésif. Les peaux résistent aux moments de flexion en résistant aux forces de traction et de compression développées quand le panneau est plié. Pour que les peaux soient capables de résister aux moments de flexion, elles doivent être empêchées de se déplacer l'une par rapport à l'autre, dans le plan ou hors du plan. Elles doivent aussi résister au flambage généralisé ou localisé, aux impacts et à l'abrasion.

L'âme doit résister aux contraintes de cisaillement générées par le mouvement de glissement des peaux sous charge et elle doit maintenir les peaux équidistantes. Si l'épaisseur des panneaux n'est pas maintenue constante, il en résulte une diminution des capacités des peaux à résister à la flexion. Une résistance au cisaillement de l'âme non adaptée se traduira par une rupture de l'âme en cisaillement, au mouvement indépendant des peaux et à un panneau flexible. Il est intéressant de noter que la déformation d'un panneau sandwich qui a rompu dépendra seulement des propriétés physiques des peaux en flexion. La résistance au cisaillement de l'âme a peu à voir avec la résistance à la flexion.

Bien que ce ne soit pas aussi significatif, le module de cisaillement de l'âme est une mesure de rigidité et un facteur dans la déflexion des panneaux sandwichs. Si une âme élastique est chargée en cisaillement, elle se déformera plus qu'une âme rigide. Il est alors clair qu'un sandwich avec une âme élastique ne sera pas aussi raide qu'un sandwich avec une âme rigide.

Un panneau sandwich sous charge de flexion se déforme sous l'action de la flexion et du cisaillement. La composante de flexion est fonction de la rigidité des peaux, de l'épaisseur et de l'épaisseur de l'âme. La déformation en cisaillement est fonction du module de cisaillement et de l'épaisseur de l'âme.

Le composant final, l'adhésif, forme un lien continu entre les peaux et l'âme. Il transmet les forces de compression et de traction des peaux à l'âme et les forces résistantes de l'âme aux peaux. Dans l'industrie marine, cet adhésif est typiquement la résine utilisée pour la stratification. De nouveaux adhésifs syntactiques sont développés qui améliorent beaucoup l'adhésion et les performances des liaisons (1).

Souvent considérée comme allant de soi, une liaison inadaptée entre les peaux et l'âme est responsable de plus de ruptures de sandwich que la rupture des peaux ou de l'âme. La liaison doit être continue, sans porosité et d'épaisseur constante. Elle doit être assez rigide pour transmettre les contraintes et pourtant assez élastique pour absorber et atténuer les chocs. Des systèmes d'adhésif et de matériaux spéciaux sont développés pour être plus résilients, plus faciles à appliquer et plus fiables que les moyens conventionnels d'assemblage (3).

MODE DE RUPTURE DES SANDWICHS ET PREVENTION

Les structures sandwich sont chargées dans le plan, hors du plan et en combinaison (4,5). Il est donc bénéfique pour le concepteur d'être renseigné sur les différents cas de rupture d'un panneau avec une âme en mousse. Il en existe en général cinq :

- rupture des peaux en traction ou en compression ;
- rupture de l'âme en cisaillement ou en compression ;
- rupture par flambage généralisé ;
- rupture par flambage localisé ;
- rupture du joint adhésif.

La contrainte dans les peaux est la somme des moments appliqués au panneau et peut-être une charge dans le plan. Si les contraintes dans les peaux excèdent la résistance critique du matériau, les peaux se rompent soit en traction, soit en compression.

Sous charge de flexion, l'âme est seulement sujette à des contraintes de cisaillement. Si les contraintes de cisaillement dépassent la résistance au cisaillement des mousses, il y aura rupture. Les contraintes de cisaillement sont uniformément réparties à travers la section de l'âme, et donc assez faciles à prédire. Comme les âmes en mousse sont pratiquement toutes isotropes, le choix et le dimensionnement sont relativement simples.

Des mousses très élastiques avec un faible module de cisaillement ne se rompent en général pas de façon catastrophique sous cisaillement. Une déformation en cisaillement excessive sous charge fera s'amincir ces

mousses. Le panneau développe des contraintes de membrane et est capable de résister à des déformations importantes sans ruptures graves.

Dans chacun des cas, de plus grandes charges peuvent être appliquées soit en sélectionnant une âme avec une plus grande résistance au cisaillement, soit en augmentant la surface de cisaillement de l'âme en la faisant plus épaisse. Épaissir le panneau le rend plus résistant à la flexion et, par conséquent, réduit les contraintes à la fois dans les peaux et l'âme.

Des panneaux sandwich soumis à une charge de compression dans le plan sont sujets au flambage généralisé (6). Puisque le flambage généralisé est fonction des conditions limites, de la géométrie et des propriétés mécaniques des matériaux, les plaques peuvent se rompre en compression au-dessous du seuil de résistance des matériaux.

Si le flambage généralisé est à prendre en compte dans la conception, il peut être surmonté en sélectionnant les matériaux de peaux avec des modules élastiques plus élevés, en augmentant leurs épaisseurs ou l'épaisseur de l'âme et en augmentant le module de cisaillement de l'âme. Bien sûr, toute combinaison peut être utilisée pour éviter le flambage généralisé.

Le flambage localisé d'un sandwich se produit quand l'âme est incapable de supporter les peaux latéralement. Les peaux peuvent se rider si l'âme n'a pas assez de résistance en traction ou en compression pour les stabiliser et les empêcher soit de s'effondrer sur l'âme, soit de s'arracher. Le flambage localisé n'est pas fonction de la géométrie structurale ou des contraintes de fixation.

Si le flambage localisé est un problème, le concepteur devrait préciser les peaux et l'âme avec des modules élastiques plus élevés. Le flambage localisé est en effet seulement local, et une augmentation de l'épaisseur de l'âme ne servirait à rien.

CONCEPTION

Caprino et Teti (4,5) ont expliqué l'appréhension des concepteurs et des ingénieurs à concevoir en composite sandwich. Ceci est largement dû au manque de connaissance des structures composites et des propriétés mécaniques des matériaux polymères. La recherche des propriétés mécaniques des matériaux polymères n'est pas notre objectif, mais une revue de l'analyse de base des structures sandwich est importante.

Comme il a été mentionné ci-dessus, une structure sandwich est sujette à des contraintes de traction et de compression au niveau des peaux et à des contraintes de cisaillement dans l'âme. La contrainte dans l'âme est une simple charge par unité de surface et ne sera pas développée ici.

Les contraintes développées dans les peaux par un moment peuvent

être assez complexes si ces peaux sont de matériaux et d'épaisseur différents. Pour des peaux de mêmes épaisseur et matériau, la contrainte peut être prédite en supposant les propriétés isotropes avec les équations 1 et 2.

Si les peaux sont un empilement de plis de différents matériaux, alors la contrainte dans chacun des plis peut être prédite à l'aide de l'équation 3.

La déflexion sous charge est une fonction de la rigidité en flexion du sandwich. De nouveau, le calcul peut être assez difficile suivant la complexité des plis individuels des peaux du sandwich.

L'équation 4 prédit la rigidité flexurale pour un sandwich avec des peaux de mêmes épaisseur et module élastique. Pour un sandwich avec des peaux de différents modules élastiques et épaisseurs, la rigidité flexurale peut être calculée à l'aide des équations 5 et 6.

Quand une ou les deux peaux du sandwich sont faites de deux ou de plus de plis de différents matériaux, le module équivalent attribué aux peaux doit être évalué. L'équation 7 permet de calculer le module élastique équivalent des peaux.

Bien sûr, ces formules ne sont pas détaillées ici et l'auteur recommande la lecture des références 4 et 5 pour un traitement plus approfondi de la conception sandwich.

CHOIX DE L'ÂME

Le concepteur et le constructeur doivent considérer plus que les contraintes à l'intérieur de l'âme. Ils sont responsables de la détermination des meilleurs moyens d'installation et de l'assurance de la qualité ainsi que de la prédiction des contraintes.

Pour sélectionner l'âme adaptée, le concepteur doit identifier les exigences pour la "performance" de l'âme (1,4,5,6). Celles-ci sont :

- *exigences d'installation*
 - systèmes de résine
 - systèmes de colle pour l'âme
 - application de la pression
- *exigences d'application*
 - fond de coque
 - haut de coque
 - ponts
 - cloisons internes
 - considération spéciale
- *hiérarchie de rupture*
 - cisaillement de l'âme ou plasticité
 - rupture des joints adhésifs
 - décohésion des raidisseurs longitudinaux et transversaux
 - rupture des peaux

- *coût*
 - coût de l'âme
 - coût en fonction de la résistance/poids
 - facilité d'installation
 - bénéfice de commercialisation

Comme nous pouvons le voir, il y a un nombre important de considérations à faire pour la sélection de l'âme.

CONCEPTION STRUCTURALE PRELIMINAIRE

Quand on conçoit toute structure, il est important de développer un "livre de recettes" d'analyse pas à pas. Ceci est utile pour deux raisons : cela crée une routine d'analyse et cela augmente l'efficacité avec laquelle l'analyse est faite.

Ce qui suit est la routine d'analyse de base pour la conception sandwich de bateaux. C'est une approche schématique d'une démarche complexe, présenté sans formule ni analyse numérique. Cela ne fait aucune différence si le concepteur de stratifié utilise des poutres ou des plaques pour analyser la structure ; le concept de base est le même... réduire la structure en composants simples qui peuvent être analysés indépendamment les uns des autres.

SCHEMA DE LA CONCEPTION SANDWICH

Ce qui suit est un schéma de conception largement utilisé pour l'analyse structurale (6,7) :

- pas 1 - définir les panneaux ;
- pas 2 - définir les charges ;
- pas 3 - définir les déflexions maximales admissibles ;
- pas 4 - concevoir les stratifiés ;
- pas 5 - contrôler les contraintes ;
- pas 6 - optimiser.

Pas 1 - Définir les panneaux. Réduire la structure à ses composants de base. L'infrastructure de base du bateau représente le système de support principal, la coque et le pont. Ceci inclut : les raidisseurs longitudinaux et transversaux ; les cloisons ; les supports de moteurs ; les cadres.

a) Isoler les panneaux qui formeront le standard structural pour le reste du bateau :

- . les panneaux médians de fond de coque ;
- . les panneaux de la coque supérieure avant ;
- . les panneaux d'avant-pont ;
- . les avants de rouf.

b) déterminer les conditions de fixation des panneaux.

Pas 2 - Définir les charges. Nous concevons des bateaux qui évoluent à l'interface complexe eau/air. Le travail d'identification des charges à la surface de la coque des bateaux est, au mieux, une suggestion informée. Pour cette raison, les dimensions de coques historiques sont souvent utilisées pour la conception structurale. Quand on considère les charges sur le bateau, les décomposer et identifier les forces dominantes. Si le composant est soumis à une combinaison de charges, s'assurer qu'il a les dimensions pour les accommoder.

Pas 3 - Définir les déflexions maximales admissibles. La fibre de verre, en comparaison de l'acier et de l'aluminium, est très flexible. Nous construisons fréquemment des structures en fibres de verre pour qu'elles soient suffisamment raides puisque la flexibilité est communément associée à la faiblesse. Des stratifiés monocouches construits dans cette optique sont presque toujours surdimensionnés en termes de résistance.

Pas 4 - Conception du stratifié. Pour l'analyse structurale préliminaire, on suppose que la fibre de verre est isotrope.

a) Analyse de la structure en supposant que les poutres et les plaques sont isotropes. Même si le stratifié est optimisé en utilisant des programmes d'ordinateurs sophistiqués et la micromécanique, on a toujours besoin d'un point de départ à partir duquel des données de base peuvent être tirées.

b) concevoir un stratifié solide pour satisfaire aux critères de déflexion et à la résistance.

c) convertir en stratifié sandwich. L'épaisseur du sandwich et la surface de cisaillement de l'âme peuvent être résolus en rendant l'inertie du sandwich et le module de section plus grands ou égaux que ceux du stratifié monolithique.

Pas 5 - Contrôle des contraintes. Vérifier que les contraintes sous charge sont plus faibles que la contrainte critique des matériaux. Si le stratifié est asymétrique autour de l'âme, utiliser la méthode de transformation de section pour calculer l'inertie et le module de la section.

Pas 6 - Optimiser la structure si le poids est un facteur critique. L'optimisation commence quand on considère les effets structuraux des autres composants agissant comme un seul. A ce point, l'analyse peut être continuée en revenant au pas 1 ou peut être arrêtée si le stratifié satisfait aux exigences de résistance et de poids de la structure.

EXIGENCES DE CONCEPTION

En résumé, un sandwich doit être conçu pour satisfaire aux critères structuraux de base suivants :

- les peaux doivent être assez épaisses pour supporter les contraintes de traction et de compression ;
- l'âme doit être assez résistante pour supporter les contraintes de cisaillement ;
- l'âme doit être assez épaisse et avoir un module de cisaillement suffisant pour prévenir un flambage généralisé ;
- l'âme doit avoir assez de résistance à la compression pour empêcher l'écrasement du panneau sous charge normale.

FORMULAIRE

Equation 1 : $S_A = S^*_A + (S_{F1} + S_{F2}) / 2$

Equation 2 : $\sigma_{F1,2} = \pm M / (b S_A S_{F1,2})$

Equation 3 : $\sigma_K = \sigma_F (E_K S_F / \sum E_i S_i)$

Equation 4 : $EI = b E_F S_F (S_A^2/2)$

Equation 5 : $EI = E_F (S_{F1} S_{F2} S_A^2 / S_{F1} + S_{F2})$

Equation 6 : $EI = b E_{F1} E_{F2} (S_{F1} S_{F2} S_A^2 / E_{F1} S_{F1} + E_{F2} S_{F2})$

S_A	: distance entre les centroïdes des peaux ;
S^*_A	: épaisseur de l'âme ;
$S_{F1,2}$: épaisseur des peaux 1,2 ,
$\sigma_{F1,2}$: contrainte dans les peaux 1,2 ;
M	: moment de flexion appliqué ;
b	: largeur de la poutre sandwich ;
σ_K	: contrainte dans le Kième pli ;
σ_F	: contrainte moyenne dans la peau ;
E_K	: module élastique dans le Kième pli ;
S_F	: épaisseur totale de la peau ;
n	: nombre de laminé dans les peaux ;
E_i	: module élastique dans le ième pli ;
S_i	: épaisseur du ième pli ;
EI	: rigidité flexurale du sandwich ;

EF1,2 : module élastique des peaux ;
EF : module élastique équivalent de la peau.

1. KOCH T., 1990, Advanced vacuum bagging techniques on sandwich construction, The core material in boat building sandwich construction, Pelf/Polimex, Padova, Italie.
2. WEISSMAN-BERMAN D., 1992, Marine sandwich structures, Part 1, SAMPE journal, vol. 28, n°4, juillet/août 1992.
3. SKEIST I., Handbook of adhesives, 3rd edition, Van Nostrand, Reinhold, New York, NY.
4. CAPRINO G., TETI R., 1989, Sandwich structures, Il Prato Publishers, Padova, Italie.
5. CAPRINO G. TETI R., 1990, Primer on polymeric foam core sandwich structures, University of Naples Press, Naples, Italie.
6. LUBIN G., 1982, Handbook of composites, Van Nostrand, Reinhold, New York, NY.
7. NUDELMAN N., 1989, Principles of fiberglass boat design and construction, chapitre 10, Westlawn School of Yacht Design, Stamford, CT.