

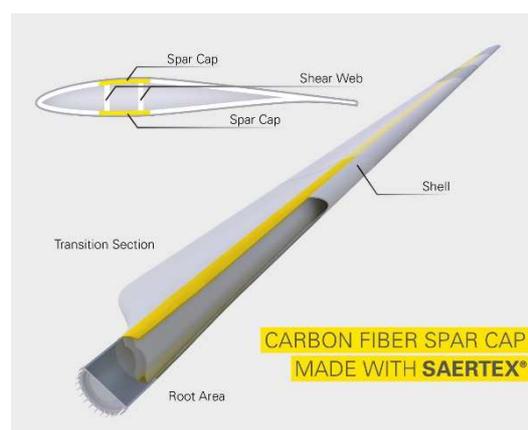
Chapeau du longeron en fibre de carbone avec infusion VAP®

Les fibres de carbone à haut degré de carbonisation (>99%) à base de PAN et leur procédé de production industrielle ont été développés pour la première fois dans les années 1960. Les performances mécaniques élevées (module E de traction et résistance) de ce nouveau matériau ont ouvert de nouvelles opportunités aux applications composites, mais son prix s'est situé à un niveau correspondant pendant des décennies. Son utilisation a donc été limitée aux secteurs industriels qui pouvaient vendre leurs produits à un prix élevé, qui n'avaient pas d'autres alternatives techniques ou qui, comme l'industrie aéronautique par exemple, pouvaient se le permettre.

Cette situation a changé vers les années 2000 : De nouveaux fournisseurs sont apparus et ont mis à disposition des fibres de carbone de qualité industrielle à forte teneur en fibres de carbone (~240GPa / 4000 MPa, 50K) à des prix plus bas, ce qui a permis à d'autres industries d'utiliser des volumes importants pour leurs applications.

L'éolien est l'un des secteurs industriels qui a adopté les fibres de carbone à grande échelle dans les années 2010 :

L'énergie produite par une éolienne est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor. Les pales ont tendance à s'allonger et ont maintenant déjà franchi la barre des 100 m (par exemple, GE Haliade-X, 12 MW / 107 m). Cependant, une longueur de pale plus importante signifie aussi des charges mécaniques plus importantes pendant le fonctionnement et un poids de pale plus élevé. Une solution technique à ces deux problèmes consiste à fabriquer le chapeau du longeron, qui va de l'emplanture à l'extrémité de la pale et qui absorbe les charges de compression et de traction de la pale, avec des fibres de carbone.



[Parties d'une pale de rotor d'éolienne]

La plus faible densité des fibres de carbone (environ 1,8 g/cm³) et leurs meilleures propriétés mécaniques (ici : module E d'environ 240 GPa, résistance à la traction d'environ 3 800 MPa) par rapport aux fibres de verre réduisent le poids de la pièce elle-même et, par conséquent, celui de la lame dans son ensemble. En outre, le chapeau du longeron en fibre de carbone prend moins de place qu'une version en fibre de verre techniquement équivalente. Cela permet de concevoir des pales plus longues et plus rigides.

Maintenant que la disponibilité de CF carbone à un prix abordable a plus ou moins résolu la question commerciale de l'utilisation en grand volume de ce matériau, il reste à répondre à la question de savoir quel matériau et quel procédé à base de fibres de carbone devraient être utilisés pour fabriquer le chapeau de longeron.

Il existe actuellement sur le marché trois options « principales » parmi lesquelles choisir : Les préimprégnés à base de fibres de carbone existent depuis plus de 50 ans et sont toujours largement utilisés. Comme la fibre est déjà fournie avec la résine, l'utilisateur n'a pas à se soucier de la manière d'imprégner le matériau ou de régler la fraction volumique de fibre (FVF) souhaitée. De plus, les fibres sont bien alignées, ce qui permet d'obtenir de bons résultats lors des tests mécaniques – du moins en laboratoire. Mais il y a aussi quelques inconvénients : Lors de la pose, l'air est emprisonné entre les différentes couches. Ce phénomène est inhérent au matériau et à la technologie et ne peut être évité. Cela entraîne une augmentation de la porosité du chapeau du longeron (un pourcentage à un chiffre généralement), ce qui réduit d'autant la qualité de la construction.



[Bulles d'air dans un laminé pré-imprégné]

En outre, la rigidité des matériaux rend plus difficile – voire parfois impossible – la fabrication de chapeaux de longerons avec une torsion, une pré-courbure ou les deux. La durée de vie limitée des préimprégnés est un autre inconvénient.

La dernière tendance qui a beaucoup attiré l'attention récemment est celle des tiges pultrudées : les fibres de carbone sont tirées à travers une matrice, imprégnées d'un système de résine VE ou EP, puis aussitôt durcies. Les tiges standards obtenues varient en largeur de 100 mm à 300 mm et en épaisseur de 3 mm à 5 mm et sont enroulées sur des bobines avant d'être envoyées aux fabricants. Les avantages techniques sont que les tiges sont déjà durcies, leur FVF bien définie et les fibres bien alignées, ce qui leur confère des propriétés mécaniques élevées.

Il existe cependant aussi quelques inconvénients : Les tiges doivent être déroulées, coupées et chanfreinées. Des machines coûteuses sont nécessaires pour effectuer ces tâches. La section transversale généralement carrée des tiges peut conduire à des zones riches en résine dans la pièce, surtout lorsque le chapeau du longeron n'est pas plat, mais torsadé au préalable. De plus, une couche de tissu en fibre de verre est habituellement introduite entre les couches de tiges superposées. Cela réduit les propriétés mécaniques du chapeau de longeron par rapport aux valeurs de la tige pultrudée pure obtenues lors de l'essai en laboratoire. La rigidité des tiges enfin, qui explique les bonnes propriétés mécaniques, peut également poser des problèmes : Il est plus difficile d'empiler le matériau dans un moule avec une pré-courbure notable et de s'assurer qu'il ne se déplace pas lorsque le vide est fait. Par conséquent, la possibilité de positionner librement le chapeau du longeron dans la pale est limitée.

La troisième option consiste à produire des chapeaux de longeron en fibre de carbone en infusant des tissus UD secs en fibre de carbone avec des fibres s'étendant dans la direction 0°. Les laminés infusés en tissus CF UD et en systèmes de résine EP révèlent des propriétés mécaniques plus faibles dans les tests de laboratoire que les préimprégnés et les tiges pultrudées. Il faut absolument en tenir compte lors de la conception de la lame. Cependant, ce que vous voyez c'est ce

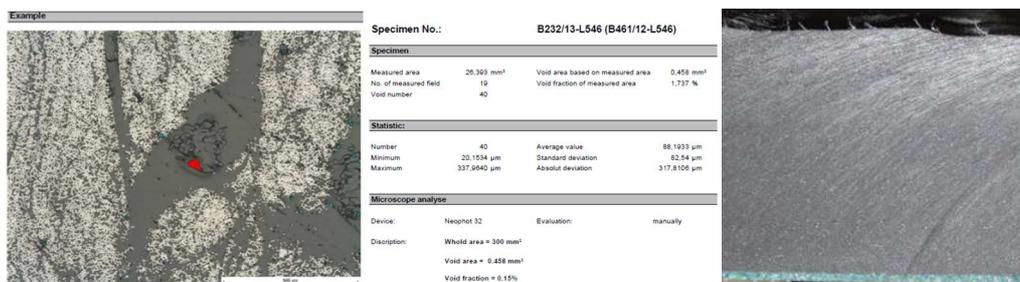
que vous obtenez : Les valeurs de laboratoire reflètent les performances mécaniques que l'on peut attendre du chapeau de longeron réel. Pour obtenir une bonne qualité de construction avec ces propriétés mécaniques, un bon alignement des fibres dans le moule est crucial. Comme les tissus UD sont plus souples que les préimprégnés et les tiges pultrudées, le processus d'empilage doit être effectué avec soin, avec le matériau provenant d'un chariot qui circule au-dessus du moule. La souplesse ou la capacité de drapage des rubans de tissu UD ne fait cependant pas qu'occasionner des problèmes : Elle permet au tissu de s'adapter à la forme du moule beaucoup plus facilement que les autres matériaux, ce qui est important pour les chapeaux de longerons avec une pré-courbure, une torsion ou les deux. C'est aussi exactement cette capacité de drapage qui permet au concepteur d'amener le chapeau de longeron (ou les chapeaux de longeron) dans la position qui convient le mieux à la structure de la pale. De cette façon, cela offre plus de liberté lors de la conception du chapeau de longeron, y compris l'utilisation de rubans CF UD pour les bords de fuite.

Une autre question importante à considérer est le processus d'infusion lui-même. Les tissus CF sont plus difficiles à infuser que les tissus GF car leurs filaments sont beaucoup plus fins. L'espace plus petit entre les filaments réduit le flux de résine en conséquence. Pour obtenir un mouillage complet des composants épais comme les chapeaux de longerons, 3 points sont importants :

Le CF UD utilisé doit avoir une bonne perméabilité z (c'est-à-dire dans le plan de passage) pour permettre à la résine de traverser toutes les couches de tissu du bas vers le haut de la pile entière sans aucune zone sèche. SAERTEX a développé un tel tissu CF UD en fibre 50K qui permet l'infusion de 120 couches donnant une épaisseur de stratifié d'environ 73 mm. La perméabilité z améliorée est obtenue grâce à une technologie de couture spécialement développée et brevetée.

En outre, il est important d'utiliser un système de résine latente. Ces systèmes de résine ont une faible viscosité et une longue durée de vie en pot tant qu'ils sont maintenus à la bonne température, afin que la résine ait suffisamment de temps pour imprégner toute la pile de tissus. Comme pour tout autre système d'infusion et de résine, il est important de respecter les températures recommandées pour le moule, la pile de tissus et le système de résine mélangée. Certains systèmes de résine latente ont également une légère exothermie qui permet d'éviter les problèmes lors du durcissement.

Le troisième rôle essentiel est celui de la technologie VAP®. La membrane VAP® appliquée est placée entre la pile à infuser et le sac à vide. La membrane semi-perméable VAP® emprisonne la résine à l'intérieur de la pile de matériaux tandis que l'air et le gaz peuvent la traverser. De plus, elle aide la résine à imprégner l'ensemble du matériau et assure une distribution uniforme de la résine sur toute la dimension de la pièce. Les principaux avantages du procédé VAP® sont le contrôle de la teneur en résine en infusant la quantité de résine préalablement calculée nécessaire pour la FVF souhaitée, et une réduction de la porosité de la pièce bien en dessous de 1 % grâce à la fonction de dégazage pendant le processus d'infusion en cours. La sécurité et la fiabilité globales du processus permettent d'éviter des pièces rebutées très coûteuses.

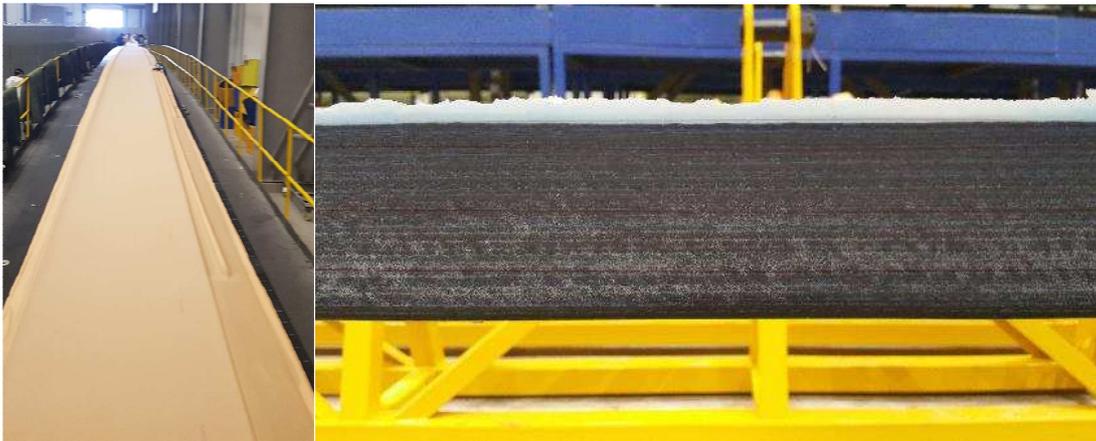


[Analyse de la porosité d'un laminé infusé en technologie VAP, coupé à travers un laminé]

Les préimprégnés étaient autrefois le premier choix pour les chapeaux de longeron CF lorsqu'il n'y avait pas d'autre alternative. En raison de leur manque de drapabilité, de leur durée de conservation limitée et d'une porosité relativement élevée de la pièce, leur utilisation diminue de plus en plus.

Les tiges CF pultrudées présentent des propriétés mécaniques élevées. Si le fabricant est prêt à dépenser l'argent nécessaire pour les machines, elles constituent une alternative intéressante. Toutefois, leur rigidité limite le concepteur en termes de position et de forme du chapeau du longeron : la conception de la pale doit être adaptée à ce matériau particulier (et non l'inverse). Quelques problèmes de processus doivent être résolus tels que la manipulation des longues planches, le positionnement et l'intégration dans la pale.

Les tissus CF UD secs infusés avec la membrane VAP® ne présentent pas les meilleures propriétés mécaniques, mais des propriétés suffisamment élevées pour produire un chapeau de longeron CF. L'infusion VAP® est très similaire à un procédé d'infusion standard, ce qui signifie que la transition est assez facile pour les fabricants, seules la mise en place et les conditions du procédé sont légèrement différentes. En raison du drapé des tissus CF UD souples, cette option offre aux concepteurs la plus grande liberté pour réaliser différents concepts de chapeaux de longerons.



[Un longeron de 87 m de long imprégné de PVA ; vue latérale de la section la plus épaisse (120 couches)]

Quelle est la prochaine étape ? Actuellement, l'infusion de tissus CF UD secs avec un système de résine latente en technologie VAP® est la solution qui offre la plus grande liberté de conception et génère le moins de coûts globaux. Le perfectionnement des matériaux et de la technologie des procédés est en cours, de sorte que les fabricants pourront à l'avenir infuser des chapeaux de longerons d'une épaisseur supérieure à 100 mm dans des conditions de production standard en série. Cela permettra d'infuser des chapeaux de longerons CF pour les pales de plus de 100 m de long.

Plus d'infos : www.saertex.com