

Procédé d'application de fibres thermoplastiques à l'aide de robots

L'excellente rigidité et la résistance spécifique élevée des matériaux composites renforcés de fibres de carbone les rendent particulièrement appropriés aux applications sur des machines tournantes. Malheureusement, ces matériaux ont l'inconvénient que leur procédé de fabrication exige beaucoup de travail manuel et qu'il est donc lent et coûteux. Ces obstacles sont surmontés par le procédé de placement de bandes composites à matrice thermoplastique. Avec ce procédé, les bandes thermoplastiques imprégnées sont chauffées et consolidées localement sous pression. ABB a développé cette méthode en laboratoire avec un robot à 6 axes et l'a appliquée lors du développement de nouveaux composants de turbomachines. Une cellule de travail équipée d'un robot à 3 axes a en outre été installée dans une fabrique pour la production d'anneaux de renforcement pour les têtes de bobines de moteurs électriques.

La demande croissante de performances et d'efficacité croissante, alliées à la demande de réduire les coûts, a incité les fabricants de turbomachines à haute vitesse et d'autres systèmes dynamiques à accroître leurs efforts en vue d'améliorer les propriétés des matériaux utilisés. Pour des systèmes robotisés avec des masses subissant de fortes accélérations, ou pour des rotors qui doivent supporter des forces centrifuges élevées, on a besoin de matériaux qui combinent une résistance et une rigidité élevées avec un faible poids. Les matériaux composites renforcés de fibres répondent à ces exigences mieux que les matériaux standard, tels que l'acier, les alliages d'aluminium ou de titane, grâce à leurs rapports résistance/poids et rigidité/poids extraordinaires (tableau 1).

Il existe un grand nombre de matériaux composites [1]. Pour les structures sollicitées par des forces d'inertie, les matériaux les plus évolués et les plus prometteurs sont composés de polymères renforcés de fibres de carbone. La difficulté de la fabrication de structures constituées de ces matériaux provient de l'anisotropie intrin-

sèque définie par l'orientation des fibres continues longues.

Dans le procédé de mise en oeuvre traditionnel à trois étapes **1**, le laminé est d'abord étalé manuellement sous forme de membranes à fibres de carbone unidirectionnelles **1a**, imprégnées préalablement avec une résine thermodurcissante. Dans l'étape suivante, un autoclave **1b** sert à appliquer une certaine pression et de la chaleur pour durcir la résine. Le matériau subit ensuite un contrôle de qualité, normalement sous forme d'inspection aux ultrasons **1c**.

Dr Markus Ahrens
Dr Vishal Mallick
Karl Parfrey

ABB Corporate Research, Baden

Ce procédé de fabrication exige non seulement beaucoup de travail manuel, mais le taux de rebut est élevé et la reproductibilité reste limitée. L'utilisation de bandes de fibres de carbone imprégnées de résine thermoplastique et l'application d'un procédé d'application automatisé évite ces inconvénients, améliore l'accessibilité du prix et ouvre un plus vaste domaine d'application, ainsi qu'un niveau de performances plus élevé.

Matériaux composites à matrices polymères

Dans les composites, les fibres sont les principaux éléments de transmission des forces, tandis que le polymère environnant, dans lequel sont noyées les fibres, sert à maintenir la position et à transmettre la force aux fibres, tout en les protégeant contre les influences de l'environnement. Les caractéristiques principales des fibres de renforcement consistent en une faible densité, ainsi qu'en une rigidité et une résistance élevées. Plusieurs fibres du commerce remplissent ces conditions (tableau 2).

Les polymères peuvent être subdivisés en duroplastiques et en thermoplastiques [2, 3]. Les polymères thermoplastiques sont constitués de chaînes de molécules individuelles non liées chimiquement **2a**, mais par des liaisons secondaires, telles que des forces de Van der Waals ou des ponts hydrogène. Ces liaisons peuvent être rompues par l'application de chaleur et de pression, de sorte que le matériau se déforme par viscoélasticité. Après le refroidissement, les liaisons conservent leur nouvelle position moléculaire. Ce faisant, les thermoplastiques peuvent être mis en oeuvre par fusion. Ils peuvent être transformés de cette façon un nombre quelconque de fois et sont également aptes à se souder.

Après leur durcissement, les duroplastiques ne peuvent plus modifier leur forme. Dans les duroplastiques, les molécules sont réticulées, c'est-à-dire liées chimiquement **2b**. Leur position ne peut plus être modifiée par l'application de chaleur ou de pression. Historiquement, les matériaux composites ont été tout d'abord fabriqués avec des résines duroplastiques et la plupart des procédés disponibles s'appliquent à cette classe de matériaux.



a



c



b

Procédé de fabrication traditionnel de matériaux composites de hautes performances

1

a *Déposition du laminé*

b *Autoclave de durcissement*

c *Contrôle de qualité*

Fabrication traditionnelle de pièces composites duromères

Le renforcement par fibres pour en faire des structures composites hautement performante doit être continu, avec une orientation bien définie des fibres. Les procédés d'injection et de moulage sous pression ne sont pas considérés ici, étant donné qu'ils s'appliquent principalement aux produits composites à fibres courtes.

Le renforcement continu s'effectue manuellement en déposant des membranes tissées ou unidirectionnelles dans un

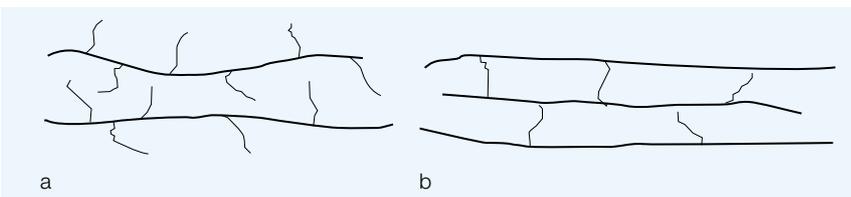
moule. Elles sont ensuite aspergées avec une résine duroplastique. Les membranes peuvent aussi être trempées à l'avance dans un bain de résine ou l'imprégnation peut s'effectuer sous vide. Une méthode alternative plus élégante consiste à utiliser des prépregs. Il s'agit de feuilles dont les fibres ont été préimprégnées avec une quantité donnée de résine duroplastique. Celle-ci est polymérisée partiellement, ce qui confère à la feuille une adhésivité semblable à celle des bandes autocollantes de ménage. Après l'élaboration de la

forme, le laminé est évacué sous vide. On applique ensuite une pression externe pour éliminer l'air et pour assurer le mouillage des fibres. La résine est alors réticulée par un apport de chaleur. L'application de chaleur et de pression s'effectue normalement dans un autoclave **3**.

Ce procédé de fabrication requiert beaucoup de travail manuel. Le taux de rebut est élevé et la reproductibilité limitée. Ces inconvénients furent constatés à une date précoce de la fabrication de composites. On a donc développé un procédé d'enroulement de filaments pour automatiser la production en masse d'articles composites d'un certain type. Dans ce procédé, un filin continu de fibres est enroulé autour d'un mandrin. Avant d'atteindre ce dernier, les fibres sont imprégnées par immersion dans un bain de résine. Un mouillage complet des fibres est assuré en appliquant une tension sur celles-ci pendant l'enroulement. La pièce

Chaînes moléculaires thermoplastiques (a) et duroplastiques (b)

2



enroulée est ensuite placée dans un four pour le durcissement. Après celui-ci, la pièce est extraite du mandrin.

Les premières applications servent à fabriquer des structures tubulaires à symétrie axiale. Aujourd'hui, on peut produire des formes plus complexes, telles que des avirons ou des sphères. Toutefois, pour les raisons suivantes, l'enroulement de filaments ne peut s'appliquer à la fabrication de toutes les structures:

- La méthode est limitée aux corps de révolution. Des sections plates ou ouvertes ne sont pas réalisables.
- Les fibres ne peuvent être appliquées que le long de courbes géodésiques permettant l'exercice d'une traction.
- La déposition de couches parallèles à l'axe d'enroulement n'est pas possible.
- Des formes complexes, concaves ou à double inflexion sont irréalisables.
- La qualité des laminés est limitée.

Le procédé d'application de fibres est né du procédé d'enroulement de filaments et évite les difficultés ci-dessus. Au lieu de fibres mouillées enroulées autour d'un mandrin, on utilise une tête de déposition de filins de filaments sur la surface d'un outil. Ce procédé permet de réaliser des structures à contours complexes. Les fibres peuvent être déposées exactement en direction des efforts principaux que la pièce doit subir. Un système de commande par ordinateur réduit le rebut, tout en améliorant la reproductibilité et la qualité des produits finis.

Placement robotisé de fibres thermoplastiques

Malgré ses avantages, la méthode de placement de fibres n'est pas utilisée de manière généralisée. Les coûts des équipements restent élevés et seul un petit nombre de machines sont utilisées dans le monde entier. Une raison des frais élevés réside dans le fait que les bandes et filins de prépregs duroplastiques doivent être conservés au frais en amont de la tête d'application, pour éviter un durcissement prématuré. En outre, ils doivent être manipulés soigneusement. L'utilisation de prépregs thermoplastiques sous forme de rubans résout ce problème, vu qu'aucune manipulation spéciale n'est requise en amont de la tête d'application. En complément, par l'application de chaleur au point de déposition de la bande

Tableau 1: Rapports résistance/poids et rigidité/poids typiques de différents matériaux

Matériau	Résistance/poids MPa/kgm ⁻³	Rigidité/poids MPa/kgm ⁻³
Acier	0,25	27
Alliages d'aluminium	0,20	26
Alliages de titane	0,20	25
AS4/PEEK	1,40	84
IM6/époxyde	2,20	128

Tableau 2: Propriétés typiques de fibres de renforcement commerciales

Type de fibres	Diamètre des fibres µm	Poids spécifique kg/dm ³	Module - de traction GPa	Résistance à la traction MPa	Allongement à la rupture %
E-glass (verre)	10	2,54	73	2,450	4,8
T-300 (carbone)	7	1,76	228	3,200	1,4
Kevlar-49 (aramide)	11,9	1,45	131	3,620	2,8

thermoplastique, celle-ci peut être durcie localement, ce qui élimine le besoin d'autoclavage.

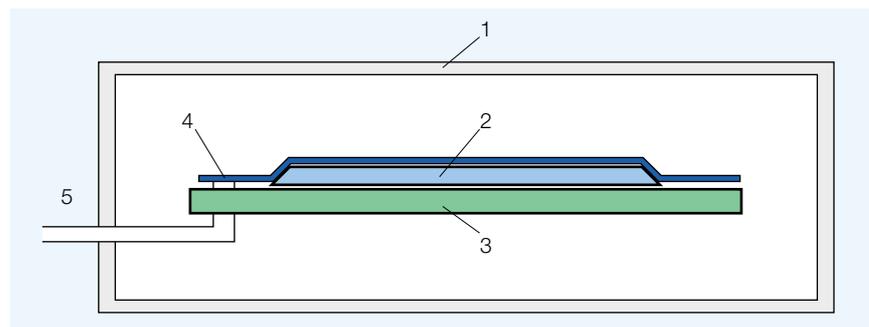
Un autre aspect important réside dans les coûts des manipulateurs de déposition de bande multiaxiaux. Historiquement, ces machines sont des versions géométriquement agrandies de fraiseuses à commande numérique et sont typiquement

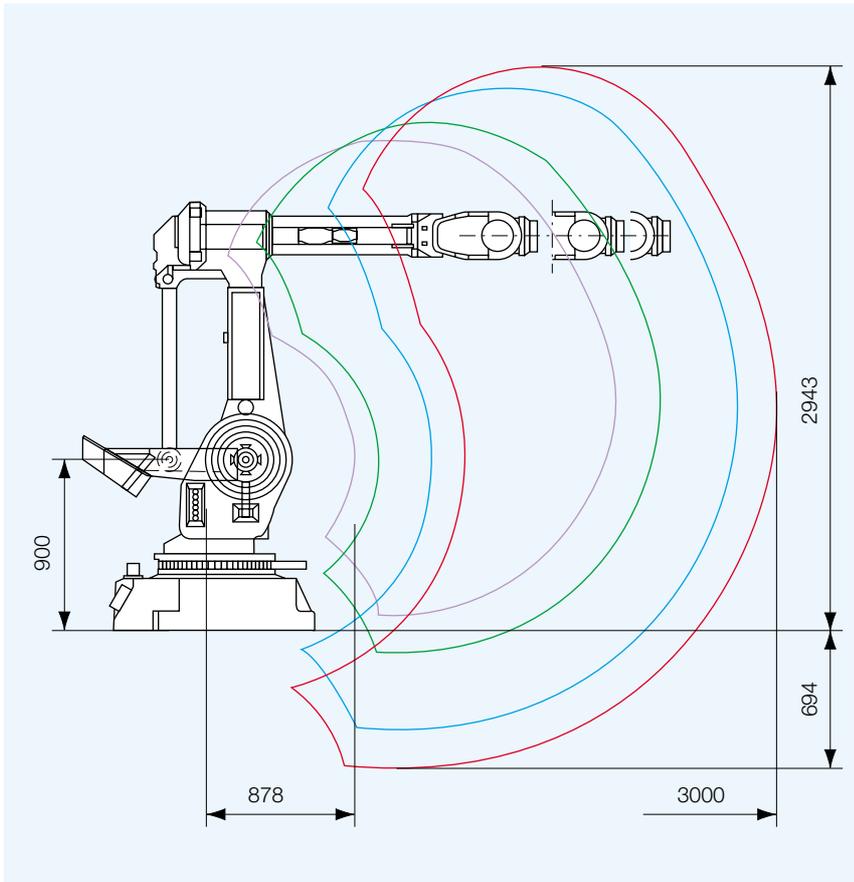
des outils à faible volume [4, 5]. Récemment, d'énormes progrès ont été réalisés en ce qui concerne les coûts, les performances mécaniques et la commande de robots à 6 axes. Par exemple, le robot IRB 6400 à 6 axes d'ABB **4** peut manipuler des charges de 200 kg à des vitesses atteignant 5 m/s, avec une précision de trajectoire meilleure que 0,1 mm [6].

Procédé d'autoclavage

3

- | | |
|--------------------|--------------------------|
| 1 <i>Autoclave</i> | 4 <i>Sachet (scellé)</i> |
| 2 <i>Composite</i> | 5 <i>Vide</i> |
| 3 <i>Moule</i> | |

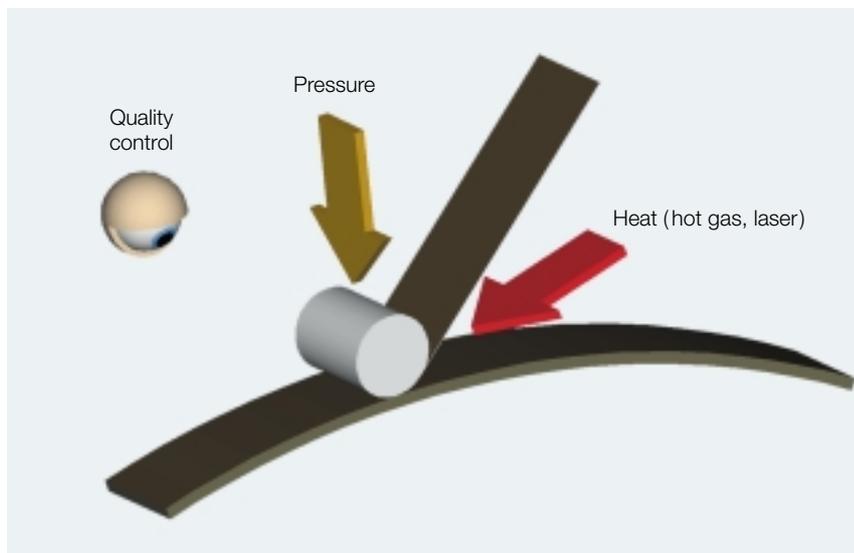




Robot IRB 6400 à 6 axes. Ce robot peut manutentionner des charges utiles de 200 kg à des vitesses atteignant 5 m/s, avec une précision de trajectoire meilleure que 0,1 mm. Différentes enveloppes de travail sont possibles avec différents manipulateurs.

Toutes les dimensions en mm

Procédé de placement de fibres thermoplastiques



Avec une commande moderne, ces robots peuvent fonctionner comme des machines à commande numérique et s'utiliser pour des missions aussi complexes que le placement de fibres.

La combinaison de composites thermoplastiques et de la technologie robotique offre d'énormes possibilités pour la fabrication de structures composites de hautes performances à des prix compétitifs.

Le procédé de placement de fibres thermoplastiques TFP (Thermoplastic Fiber Placement) est illustré par **5**. Dans le procédé TFP, un filin de fibres de carbone imprégné de résine thermoplastique est roulé sur un substrat et soudé localement par l'application de chaleur au point de contact. Une tête appropriée a été installée sur un robot IRB 6400 à 6 axes auprès d'ABB Corporate Research par la firme Automated Dynamics Corporation [7]. Cette cellule à robot **6** possède également un axe à mandrin externe pour l'élaboration de pièces de révolution.

Pendant le procédé de déposition de la bande thermoplastique, le chemin cinématique du robot doit être tel que la pression du galet d'application soit toujours perpendiculaire à la surface du corps. La vitesse du ruban, sa coupure et la pression d'application sont des variables du procédé qui doivent être coordonnées avec le mouvement du robot durant la déposition de la bande et donc intégrées dans la régulation du robot.

Le flux de chaleur au point de contact est appliqué à l'aide d'un chalumeau à azote chaud ou avec un laser Nd:YAG continu de 1,5 kW. Actuellement, la régulation du flux de chaleur n'est pas intégrée dans la régulation du robot. Dans le cas du chalumeau à azote chaud, la température du gaz est réglée par un thermocouple placé au point de contact. Le signal du thermocouple est mené à un régulateur PID qui règle le courant de l'élément de chauffage du chalumeau.

Dans le cas du laser, la puissance est réglée par un régulateur à réseau neuronal qui saisit pyrométriquement la température au point de contact et la vitesse de déposition de la bande [8].

Dans une prochaine étape, la programmation de la trajectoire du robot sera combinée avec le procédé CAD et la conception de l'orientation des couches compo-

sites successives. L'intégration de la conception de la pièce, de l'analyse mécanique et du procédé de fabrication ne diminuera pas seulement considérablement le temps de fabrication et donc aussi les coûts, mais éliminera aussi les problèmes d'interface et améliorera les performances du procédé.

Modélisation et régulation du procédé TFP

Le procédé TFP dépend dans une vaste mesure du transfert de chaleur de la source thermique (c'est-à-dire du chalumeau à gaz ou du laser) vers la bande et du processus de refroidissement qui y fait suite. Les paramètres du procédé doivent être choisis correctement, afin d'obtenir une qualité de pièce de qualité optimale. Une analyse du transfert de chaleur et des essais ont été accomplis pour déterminer le système de chauffage idéal [9], resp. les paramètres du procédé. Ces derniers, par exemple la vitesse de la bande et le flux de chaleur, doivent être déterminés individuellement pour chaque type de matériau de la bande.

Le procédé TFP est commandé à l'aide d'un ordinateur personnel avec une interface utilisateur LabView. Les dimensions et les spécifications de déposition, telles que les angles, le nombre de plis, les croisements de trajectoires, etc. sont programmées et transférées par l'interface utilisateur de l'ordinateur personnel. Ces valeurs, la vitesse de rotation du mandrin et les fonctions de la tête doivent être combinées avec la commande du robot.

La qualité des pièces dépend essentiellement de la qualité du collage du matériau. Plusieurs méthodes directes et indirectes sont à disposition pour contrôler cette qualité. Les méthodes basées sur laser ou sur les ultrasons sont possibles, mais n'ont pas encore été implémentées jusqu'ici. La mesure de la température peu après la solidification, combinée avec un bon modèle du procédé et de bonnes connaissances des matériaux fournissent une estimation fiable des propriétés des laminés.

De nos jours, les paramètres du procédé sont choisis en fonction de son modèle et des données d'essai des matériaux. En cas de besoin, les valeurs peuvent être adaptées manuellement pendant



Cellule de travail TFP à robot d'ABB Corporate Research à Baden-Dättwil

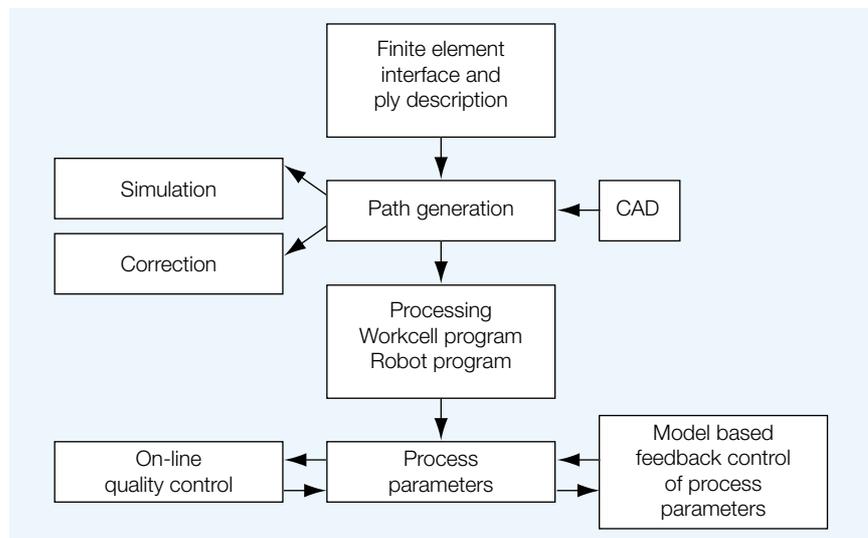
6

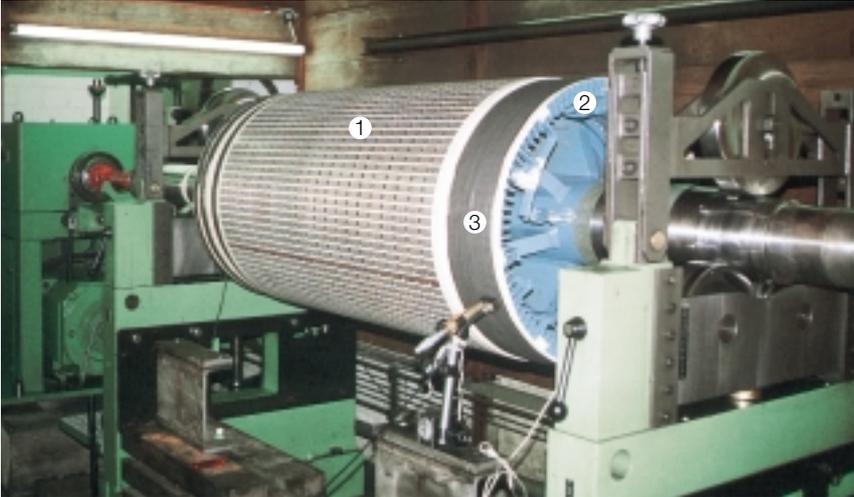
le procédé d'application. A l'avenir, les rétro-messages des dispositifs d'examen de qualité en ligne et des mesures directes des paramètres du procédé seront utilisés comme données d'entrée d'une régula-

tion fondée sur modèle 7. Ce faisant, l'automatisation pourra être plus poussée et l'application du procédé sera encore plus simple dans un environnement industriel.

Représentation schématique du procédé d'application de fibres thermoplastiques

7





Moteur ABB avec frettes de têtes de bobines thermoplastiques **8**

1 Partie active 2 Tête de bobine 3 Frette

Application industrielle pour l'enrubannage des têtes de bobines

Pour cette application industrielle, le procédé TFP a été légèrement modifié et mis en oeuvre dans une fabrique de moteurs ABB [10]. On l'utilise actuellement comme partie du procédé de fabrication de machines électriques.

Normalement, on utilise des barres de cuivre pour les enroulements des rotors

de machines électriques. Dans la zone active du rotor, ces conducteurs sont maintenus en place par des cales.

Au-delà de la zone active, à chaque extrémité du rotor, les têtes de bobines forment le renvoi des conducteurs. L'influence de la force centrifuge est absorbée par les frettes **8**.

Actuellement, ABB fabrique ces frettes de moteurs électriques soit à l'aide de fils d'acier enroulés, soit en matériau compo-

site en fibres de verre/polyester, soit en acier. Les frettes en acier s'utilisent sur les moteurs à induction, à cause de la forte sollicitation de la résistance du matériau. Les frettes sont usinées et frettées sur les têtes de bobine, ce qui rend le procédé onéreux. Le procédé de fabrication de bandages en fils d'acier est relativement lent. Pour les deux frettes d'un rotor d'alternateur, ce travail exige typiquement une semaine. La fabrication de frettes en matériau composite de fibres de verre et de polyester est également laborieuse, vu que le rotor entier doit être préchauffé dans un four, puis de nouveau durci dans un four après l'enroulement des frettes. En outre, l'épaisseur de ces deux types de frettes entrave la dissipation de la chaleur du rotor et limite donc ses performances.

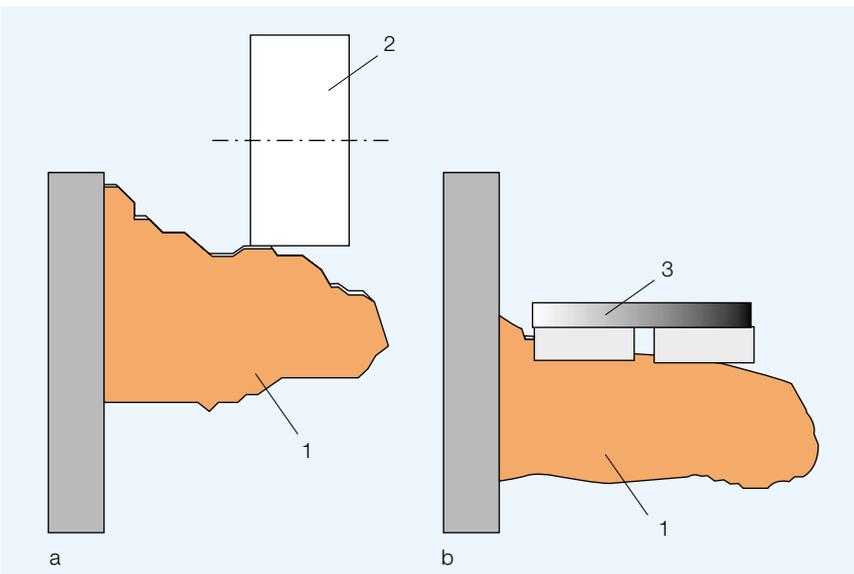
Pour cette application, l'utilisation de matériaux composites à matrice thermoplastique mis en oeuvre avec le procédé TFP automatisé offre des avantages considérables:

- Le préchauffage du rotor avant l'enroulement et le chauffage de durcissement ne sont pas nécessaires.
- Utilisation minimale ou nulle de matériaux expansibles.
- Les propriétés des fibres de carbone et le matériau thermoplastique améliorent les performances: un rapport résistance/poids accru résulte de frettes plus minces et plus légères. Le coefficient de dilatation thermique négatif favorise une prétension accrue des frettes. La conductibilité thermique plus élevée facilite le refroidissement du rotor.
- Le durcissement local des bandes fournit une tension résiduelle plus élevée et plus constante, ce qui améliore la qualité et réduit le facteur de sécurité du dimensionnement.
- Avec le durcissement local, les géométries d'enroulement qui actuellement ne peuvent pas être réalisées par le procédé de thermodurcissement disponible, sont potentiellement traitables.
- Rationalisation du procédé de renforcement des têtes de bobines par le remplacement des trois méthodes usuelles (fibres de verre, fils d'acier et bagues en acier) par un seul procédé basé sur des anneaux de renforcement thermoplastiques.

ABB fabrique des moteurs et des alternateurs de nombreux types (machines à

Tête de bobine d'un rotor d'excitatrice (a) avant et (b) après l'enrubannage avec de la bande thermoplastique **9**

1 Tête de bobine 2 Enrubanneur TFP 3 Frette



induction, à cage d'écurueil et à rotor bobiné, moteurs de traction, rotors d'excitateurs et moteurs CC). De ce fait, la forme des têtes de bobines, les températures de service et les sollicitations mécaniques sont également très variables.

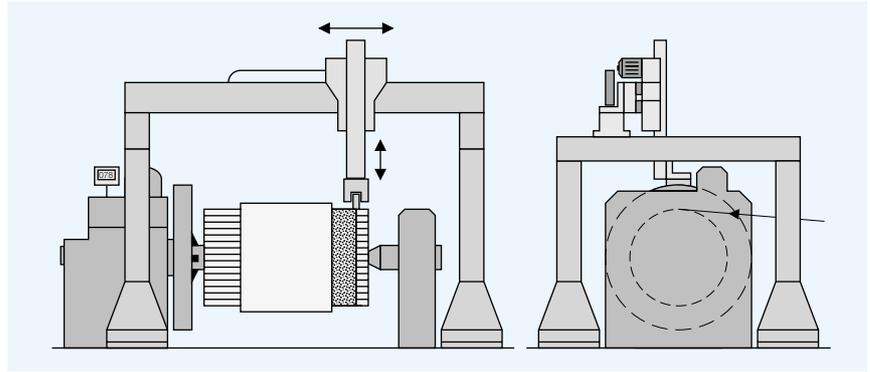
Le procédé TFP doit être adapté aux têtes de bobines du moteur. Au contraire des mandrins, les têtes de bobines ont des surfaces moins bien définies et sont flexibles. La conception de ces anneaux de renforcement requiert qu'ils sont fabriqués avec une certaine précontrainte de tension. Pour obtenir la prétension dans l'anneau, on a besoin d'un système de frein. La force de freinage doit être variable, en relation avec la flexibilité des têtes de bobines en direction radiale. Une prétension constante sur toute la direction axiale de la tête de bobine augmenterait la pression dans une zone flexible et réduirait la prétension dans d'autres zones.

En outre, les enroulements doivent se déplacer perpétuellement en avant et en arrière sur la tête de bobine, afin d'obtenir une distribution régulière de la pression. Pour des bandes étroites, la trajectoire du rotor doit être optimisée pour éviter des accumulations d'épaisseurs irrégulières des couches et pour prévenir une perte de qualité sur les bords des bandes. On doit aussi éviter des fibres de carbone libres sur les bords, pour parer aux courts-circuits dans la machine électrique.

La programmation de la trajectoire du rotor doit être robuste et suivre les déviations de surface des têtes de bobine. Par exemple, les têtes de bobines de rotors d'excitatrices utilisées avec des machines synchrones ne sont pas seulement flexibles, mais présentent aussi une forme conique à surface inégale et de diamètre variable **9**.

La machine TFP d'une fabrique de moteurs comprend un robot ABB Portal équipé d'une tête TFP modifiée de conception interne **10**, **11**. Pour les travaux normaux, le robot est programmé sur son panneau utilisateur. Un PC sert à régler et à analyser les paramètres du procédé TFP.

Pour les applications réalisées dans un environnement industriel, il est primordial que l'interface utilisateur du procédé



Machine TFP et robot ABB Portal dans la fabrication de moteurs ABB de Birr, Suisse **10**

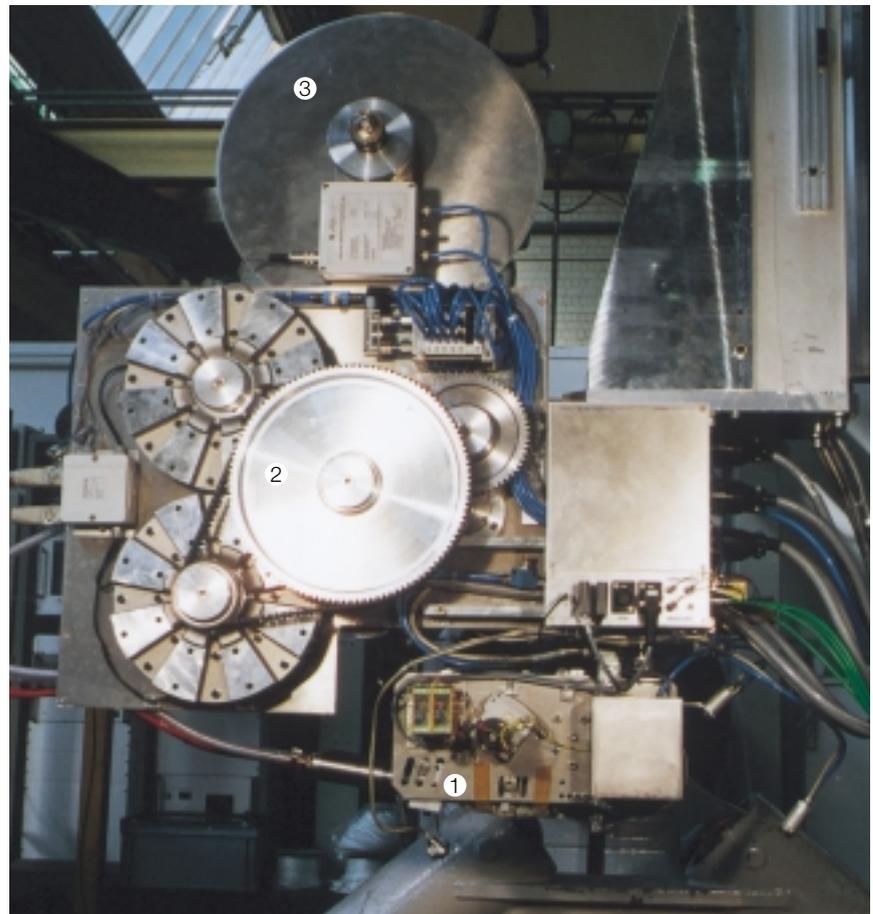
TFP s'utilise facilement. Toutes les données d'entrée de l'enrubannage du moteur sont introduites sur le panneau utilisateur du robot. Le degré d'automatisation élevé signifie que la machine peut être

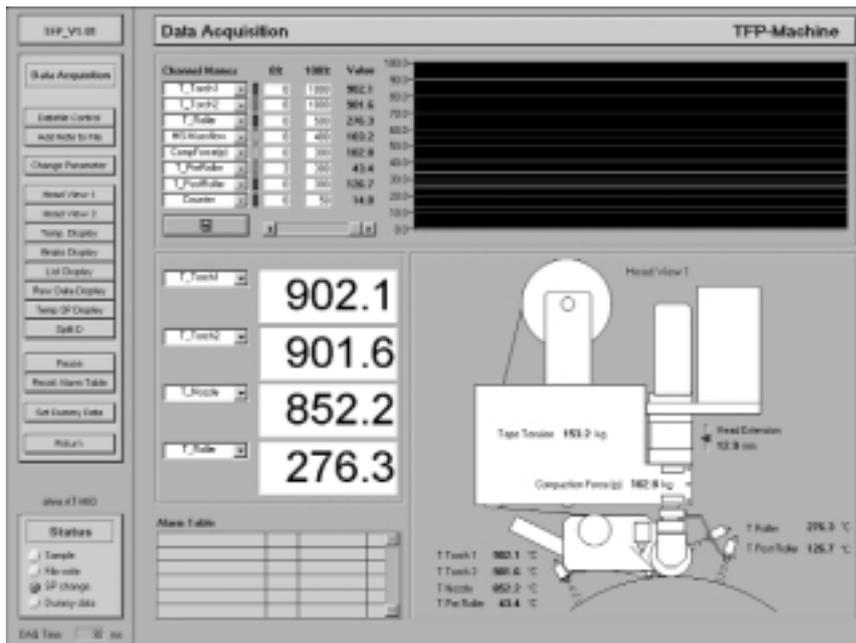
conduite par une seule personne – un aspect important de la rentabilité des machines TFP.

Une interface utilisateur LabView **12** est utilisée pour afficher les paramètres du

Tête de la machine TFP utilisée dans de la fabrication de moteurs de Birr **11**

- 1 Dispositif à galet d'application
- 2 Système de freinage
- 3 Bobine de bande préreg





Interface utilisateur fondée sur LabView pour la surveillance des paramètres du procédé, l'optimisation et les essais 12

procédé, pour l'optimiser et pour effectuer des essais.

Une analyse coûts/bénéfices a largement démontré les avantages du procédé TFP par rapport à tous les autres procédés de la concurrence.

Conclusions et perspectives

L'automatisation poussée atteinte par l'application de fibres thermoplastiques à l'aide de robots réduit très fortement les temps de fabrication de pièces en matériaux composites et donc leurs coûts. En plus des applications en laboratoire, ce procédé a aussi été utilisé avec succès pour la fabrication d'enrubannages de têtes de bobines de moteurs dans un environnement industriel. D'autres domaines dans lesquels le procédé TFP procure de grands avantages par rapport à tous les autres procédés sont l'industrie des robots elle-même et l'industrie aéronautique.

Il est prévu d'accroître prochainement encore l'automatisation du procédé. Un régulateur à rétrosignalisation fondé sur modèle simplifiera l'application du procédé et procurera une qualité encore plus élevée. Une application tridimensionnelle des bandes sera réalisée pour combler la lacune entre le CAD et la programmation

de la trajectoire du robot. Il en résultera une diminution encore plus poussée du temps de fabrication et des coûts. On projette également l'application de bandes en matériaux composites duroplastiques à l'aide de robots. ABB utilise lui-même le procédé TFP pour développer de nouvelles applications dans ses différentes turbomachines. En même temps, on étudie des versions commerciales de cellules TFP à robots qui seront mises à la disposition d'autres industries.

Bibliographie

[1] Engineering Materials Handbook: Composites, Vol. 1, ASM International, 1987.
 [2] Cogswell, F. N.: Thermoplastic Aromatic Polymer Composites. Butterworth, Oxford, 1992.
 [3] Strong, B. A.: High Performance Thermoplastic Composites. Technomic Pub, 1993.
 [4] Evans D. O. et al.: Fiber placement process study. International SAMPE Symposium and Exhibition, Book 2 (of 2). Publ. by SAMPE, Covina, CA, USA, 1989, 1822-1833.
 [5] Barth, J. R.: Fabrication of complexe composite structures using advanced fiber placement technology. National

SAMPE Symposium and Exhibition (Proceedings), Vol. 35 n, Book 1. Publ. by SAMPE, Covina, CA, USA, 1990, 710-720.

[6] Madesäter, A.: Robots industriels plus rapides et plus précis par une nouvelle commande. Revue ABB 2/1995, 31-34.

[7] Stover, D.: Tape-laying precision industrial shafts. High Performance Composites. Juillet/août 1994, 29-32.

[8] Lichtenwalner, P. F.: Neural network-based control for the fiber placement composite manufacturing process. Journal of Materials Engineering and Performance. 5 oct. 1993, 687-692.

[9] Johnson, B.; Mallick, V.; Meynard, F.: Method and Apparatus for heating thermoplastic composite tapes. Déposition de brevet allemande N° 19626662.3.

[10] Heil, W.; Mallick, V.; Meynard, F.; Parfrey, K.; Prenner, H.: Thermoplastic windig applied for rotor overhang bandages. Déposition de brevet allemande N° 19635295.9.

Adresse des auteurs

Dr Markus Ahrens
 Dr Vishal Mallick
 Karl Parfrey
 ABB Corporate Research
 5405 Baden-Dättwil
 Suisse
 Téléfax: +41 56 486 73 15
 E-mail:
 markus.ahrens@chrcr.abb.ch
 vishal.mallick@chrcr.abb.ch
 karl.parfrey@chrcr.abb.ch