

**Titre:** Modélisation et simulation de l'état initial d'une structure en composite à matrice thermoplastique fabriquée par placement de tape automatisé et consolidation laser

**Mots clés:** placement de tape automatisé avec consolidation laser, composites à matrice thermoplastique, contraintes résiduelles, modélisation, simulation

**Résumé:** Au cours des dernières décennies, l'utilisation croissante de matériaux composites dans les industries automobile et aérospatiale a fait appel à des techniques de production modernes et automatisées telles que le placement de bande assisté par laser (LATP), qui assurent des taux de production élevés mais induisent des contraintes et des déformations résiduelles dans les structures fabriquées. En raison de la complexité et des nombreuses sources de contraintes et de déformations résiduelles impliquées dans le processus de fabrication LATP, le présent travail s'est concentré sur l'évaluation des principaux mécanismes physiques à l'échelle méso et macro qui sous-tendent l'accumulation de l'état initial dans la structure composite causée par le processus de fabrication. Selon l'état de l'art, l'effet combiné de la géométrie et de l'anisotropie de la pièce composite est une source importante de contraintes et de déformations résiduelles que l'on retrouve à l'échelle macro. La géométrie courbe couple la cinématique dans le plan avec la cinématique hors du plan tandis que, pour l'anisotropie du composite, le comportement dans le plan est généralement différent par rapport au comportement hors du plan. Par conséquent, le champ de contraintes thermiques incompatibles généré pendant le traitement provoque des contraintes résiduelles au sein de la structure. Pour traiter les effets de l'histoire thermique complexe induite par le LATP pendant la fabrication, un nouveau modèle constitutif viscoélastique dépendant de la température adapté aux composites à matrice polymère renforcés par des fibres unidirectionnelles est développé. Ce modèle est construit à l'échelle du pli isotrope transverse homogénéisé, mais il tient compte des propriétés des constituants sous-jacents. Une décomposition des

tenseurs de contrainte et de déformation est proposée, ce qui permet de distinguer plus facilement la contribution des fibres et de la matrice au comportement du matériau composite homogénéisé. En supposant une réponse viscoélastique déviatorique de la matrice et des fibres élastiques, le modèle viscoélastique linéaire est appliqué uniquement sur certains termes de la décomposition. Pour les simulations numériques, le modèle viscoélastique est implémenté dans une sous-routine utilisateur UMAT Abaqus. Une équation transitoire de transfert de chaleur unidimensionnelle est utilisée pour décrire de manière simplifiée l'histoire thermique induite par la phase de consolidation du processus de fabrication du LATP. Les conditions aux limites mixtes considèrent les flux de chaleur avec le mandrin et l'ambiance, tandis que la condition initiale est la distribution de température dans l'épaisseur de la structure générée par la phase de chauffage du LATP. La solution analytique du modèle thermique est développée et implémentée dans une sous-routine utilisateur UTEMP Abaqus. Des simulations thermomécaniques sont réalisées sur des tubes à l'aide du logiciel commercial d'éléments finis Abaqus pour évaluer les effets des sources de contraintes et de déformations résiduelles prises en compte dans le présent travail. La technique de modélisation de la fabrication additive est utilisée pour réaliser un modèle simplifié du processus de stratification automatisé du LATP. Dans ce scénario, les contraintes résiduelles sont évaluées et ensuite libérées en simulant une coupe le long de la direction axiale des tubes. Les contraintes résiduelles numériques sont comparées aux résultats expérimentaux fournis par le CETIM.

**Title:** Modeling and simulation of the initial state of a thermoplastic matrix composite structure manufactured by laser assisted tape placement

**Keywords:** laser assisted tape placement, residual stresses, thermoplastic matrix composites, modeling, simulation

**Abstract:** In the last decades, the increasing use of composite materials in the automotive and aerospace industries involved modern and automated production techniques like the Laser Assisted Tape Placement (LATP), which assure high production rates but induce residual stresses and strains in the manufactured structures. Because of the complexities and the numerous sources of residual stresses and strains involved in the LATP manufacturing process, the present work focused on the evaluation of the main physical mechanisms at the meso- and the macro-scale underlying the build-up of the initial state within the composite structure caused by the manufacturing process. From the state of the art, the combined effect of the composite part's geometry and anisotropy is an important source of residual stresses and strains that can be found at the macro-scale. The curved geometry couples the in-plane kinematics with the out-of-plane kinematics while, for the anisotropy of the composite, the in-plane behavior is generally different with respect to the out-of-plane behavior. Therefore, the incompatible thermal strains field generated during processing causes residual stresses within the structure. A new viscoelastic constitutive model suited for unidirectional composite is developed to address the effects of the complex thermal history induced by the LATP. A decomposition of the stress and strain tensors is proposed, making it easier to distinguish

the contribution of the fibers and the matrix to the constitutive behavior of the composite material. Assuming a viscoelastic deviatoric response of the matrix and elastic fibers, the linear viscoelastic model is applied only on certain terms of the decomposition. For numerical simulations, the viscoelastic model is implemented in a UMAT Abaqus user subroutine. A one-dimensional heat transfer transient equation is used to describe in a simplified way the thermal history induced by the consolidation phase of the LATP manufacturing process. The mixed boundary conditions consider the heat fluxes with the mandrel and the ambient, while the initial condition is the temperature distribution in the structure thickness generated by the heating phase of the LATP. The analytical solution of the thermal model is developed and implemented in a UTEMP Abaqus user subroutine. Thermo-mechanical simulations are performed on tubes using the commercial finite element software Abaqus to evaluate the effects of the sources of residual stresses and strains accounted in the present work. The additive manufacturing modeling technique is used to achieve a simplified model of the automated lay-up process of the LATP. In this scenario, residual stresses are assessed and then released by simulating a cut along the axial direction of the tubes. The numerical residual strains are compared with the experimental results provided by CETIM.

