

Kurzfassung

Das Vernähen von trockenen Faserhalbzeugen im Vorfeld der Harzinjektion bietet vielfältige Möglichkeiten, um gewichts- und kostenoptimierte Faser-Kunststoff-Verbund-Bauteile komplexer Geometrie herzustellen. Zur Stabilisierung der Faseranordnung, insbesondere aber zur Erhöhung der Impaktbeständigkeit und Schadenstoleranz derartiger Strukturen können flächige Halbzeuge durch strukturelles Vernähen verstärkt werden, wodurch die Aufnahme komplexer dreidimensionaler Belastungen ermöglicht wird. Allerdings kann Vernähen in Laminatdickenrichtung die mechanischen Scheibeneigenschaften des Verbunds in der Laminebene auch reduzieren, was auf Fehlstellen (Reinharzgebiete) und Faserondulationen, verursacht durch das Nähgarn, zurückzuführen ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher, aufbauend auf Ergebnissen scheibenzug- und -druckbelasteter Faser-Kunststoff-Verbunde, kohlenstofffaserverstärkte Multi-axialgelege-(MAG-)Lamine strukturell vernäht und eine breit angelegte experimentelle Parameterstudie zum Einfluss unterschiedlicher Nähkonfigurationen auf Scheiben-Schubmodul und -festigkeit sowie zusätzlich auf die Restdruckfestigkeit nach Impaktbelastung (CAI-Festigkeit) und die scheinbare interlaminare Energiefreisetzungsrate G_{1R} unter Mode-1-Belastung durchgeführt. Neben Stichrichtung, Garnfeinheit, Teilung (Abstand zwischen zwei parallelen Nähten) und Stichlänge wurde die Belastungsrichtung (Rissfortschrittsrichtung im Falle von G_{1R}) als Parameter definiert, systematisch variiert und hinsichtlich ihrer statistischen Signifikanz auf das experimentelle Ergebnis untersucht. In der Mehrzahl der Fälle wurden der Schubmodul und die Schubfestigkeit im Vergleich zum unvernähten Laminat um bis zu 22 % reduziert. Bei einigen Nähkonfigurationen ließen sich aber auch keine Änderung oder sogar eine geringfügige Steigerung des Schubmoduls im Vergleich zum unvernähten Laminat feststellen. Demgegenüber konnten die CAI-Festigkeit und G_{1R} durch strukturelles Vernähen maximal um 48 % bzw. um den Faktor 5 erhöht werden. Während die Scheibenschubeigenschaften und G_{1R} dominierend von der Garnfeinheit beeinflusst werden, wird die CAI-Festigkeit vorwiegend durch die Wahl der Stichdichte bestimmt, wobei der Einfluss von Garnfeinheit und Stichdichte auf die untersuchten Kennwerte gegenläufig ausgeprägt ist. Ein Anstieg dieser Parameter führt zu Absenkungen der Scheibeneigenschaften, gleichzeitig aber auch zu Steigerungen von CAI-Festigkeit

und G_{IR} . Allerdings kann durch die Wahl geeigneter Nähkonfigurationen ein Kompromiss zwischen beiden Effekten gefunden werden.

Die Realisierung der Nähtechnik im Industriemaßstab kann allerdings nur dann erfolgen, wenn Werkstoffeigenschaften günstig und schnell, d. h. mit minimalem experimentellen Aufwand, abgeschätzt werden können. Zur Simulation des Festigkeitsverhaltens in der Laminebene, das in der Strukturauslegung neben dem elastischen Verhalten häufig maßgeblich ist, wurde daher, aufbauend auf einem parametrisch gesteuerten Finite-Elemente-Einheitszellenmodell, ein Modul zur kontinuumsmechanischen Versagensanalyse (Spannungs-, Verzerrungs-, Festigkeits- und Degradationsanalyse) entwickelt. In Abhängigkeit der jeweiligen Parametereinstellung können komplexe Einheitszellen mit Fehlstellen und Faserondulationsgebieten modelliert werden. Die iterative, einzelschichtbasierte Versagensanalyse ermöglicht die Abschätzung von Festigkeitskennwerten unvernähter und strukturell vernähter MAG-Lamine unter Scheibenbelastung (Zug, Druck und Schub). Zur Bewertung der Werkstoffanstrengung für Faserbruch wurde das Maximalspannungs-Kriterium, für Zwischenfaserbruch das Wirkebenenkriterium von Puck für den dreidimensionalen Spannungszustand implementiert. Das Nachversagensverhalten wird kontinuumsmechanisch durch Steifigkeitsdegradation nach einem für den dreidimensionalen Spannungszustand modifizierten Chiu-Modell abgebildet. Die nichtlineare Versagensanalyse erlaubt die Berechnung des Schädigungsverhaltens infolge von Zwischenfaserbruch, die Vorhersage des Totalversagens und des ebenen Spannungs-Dehnungs-Verhaltens sowie die Berücksichtigung thermisch bedingter Eigenspannungen und werkstofflicher Nichtlinearitäten.

Alternativ zur Einheitszellenmodellierung wurde für den Konstrukteur in der Vorauslegung oder den Anwender in der Verarbeitungstechnik die Möglichkeit geschaffen, Scheibeneigenschaften strukturell verstärkter Lamine mit nahezu beliebigem Schichtaufbau und Nähmuster durch die Verwendung von Kennwerten vernähter, unidirektionaler MAG-Einzelschichten in Verbindung mit analytischen Laminatanalyseprogrammen konservativ abzuschätzen. Zur Vorhersage mit verbesserter Genauigkeit sollte allerdings auf das Finite-Elemente-Einheitszellenmodell zurückgegriffen werden.

Abstract

Stitching of dry semi-finished fiber products prior to the resin infusion offers the potential for weight and cost reductions in complex composite (fiber reinforced plastic) structures. The insertion of local through-thickness reinforcements into dry preforms by stitching provides a possibility to stabilize fibers in the demanded orientation and to particularly improve the mechanical performance perpendicular to the laminate plane (out-of-plane). Three-dimensional stress states can be carried by stitching yarns, leading to increased impact resistance and damage tolerance. On the other hand, the 3D reinforcement induces dislocations of the in-plane fibers, which causes the formation of voids (resin pockets) in the stitch vicinity after resin infusion possibly reducing the in-plane properties of the laminate, such as stiffness and strength.

Based on results under in-plane tension and compression loading, a broad experimental study on the influence of varying stitching configurations on the in-plane shear modulus and strength as well as on the compression after impact (CAI) strength and apparent mode 1 energy release rate G_{1R} of non-crimp fabric (NCF) carbon fiber/epoxy laminates is presented in this thesis. The direction of stitching, thread diameter, spacing and pitch length as well as the direction of testing (which may be interpreted as direction of crack propagation in the case of G_{1R}) were varied and their effect on the experimental results was evaluated statistically. In some cases, no changes or a slight shear modulus increase could be found compared to the unstitched laminate, whereas in most cases reductions of modulus and strength up to 22 % were observed. In contrast, the CAI strength and G_{1R} could be improved up to 48 % or by a factor of 5, respectively. The in-plane properties and G_{1R} are mainly controlled by the thread diameter, while the stitch density shows a significant influence on the CAI strength. Thereby, stitching affects the mechanical properties both in positive and negative directions. Increasing the thread diameter and the stitch density leads to a decrease of the in-plane properties and to an improvement of the CAI strength and G_{1R} . With a proper selection of the stitching configuration a compromise between both effects can be found.

Stitching technology on an industrial scale can only be realized if material characteristics can be estimated economically and fast with a minimum of experiments. In

structural design strength characteristics are often relevant beside the elastic behavior. Therefore, a finite element model was developed to estimate the in-plane strength of structurally stitched laminates based on a representative unit cell approach. The parametric model is capable to generate complex unit cells taking voids and regions with disturbed fiber orientations into account. The non-linear, continuum mechanics based failure analysis includes stress and strain analysis, fracture analysis and degradation analysis of structurally stitched laminates under in-plane loading (tension, compression and shear). Moreover, the damage state caused by inter-fiber failure, the total failure as well as the in-plane stress-strain behavior can be calculated taking thermal stresses and physical non-linearities into account. For fiber failure the maximum stress criterion, for inter-fiber failure Puck's action plane criterion for 3D stress state are used to estimate the stress exposure. Post-failure behavior is modeled by stiffness degradation according to a Chiu model which was modified for 3D stress states.

Besides the unit cell model a method is provided to predict in-plane properties of structurally stitched laminates conservatively for application in an early design stage or in processing technology. For this purpose, the material characteristics of structurally stitched NCF single layers are allocated which can be used in combination with laminate analysis tools to estimate composite materials within a wide variety of lay-ups and stitching configurations. Nevertheless, to achieve a higher accuracy in the prediction, the application of the unit cell model should be preferred.