

Abstract

Despite the superior weight-specific mechanical properties of conventional continuous fiber-reinforced plastic (FRP), the brittle failure behavior under tensile and bending loads and the resulting low damage tolerance and structural integrity are often an exclusion criterion for these materials. Further application-related exclusion criteria follow from the rather low electrical conductivity compared to metallic lightweight materials. A promising approach to overcome these disadvantages is the hybridization of ductile metallic reinforcing fibers and conventional reinforcing fibers. This hybridization offers electrically and thermally conductive hybrid materials that retain their very good weight-specific mechanical properties while simultaneously enable a significant improvement in damage tolerance and crash behavior. Depending on the material composition, the laminate architecture and the hybridization strategy, the embedded metal fibers offer alternative load paths due to their high elongation at break and enable further load bearing capacity even after the failure of the conventional reinforcing fibers. While the potential of these hybrid materials has already been proven for a wide variety of material combinations, this work concentrates on understanding and describing the various mechanisms of material behavior before, after and during the failure of the hybrid material. Based on an extensive experimental investigation on steel and carbon fiber reinforced epoxy resin, it can be shown that the failure of the carbon fibers triggers a complex load redistribution process. The material behavior after the failure of the carbon fibers strongly depends on the local damage and stresses that arises during this process. Furthermore, it can be shown how this damage and stresses can be influenced by manipulating the laminate stacking sequence, the composition of the material, the laminate architecture or the geometry of the test specimen. Based on this investigation, a model is presented which is capable to map the complex load redistribution process after the failure of the carbon fibers and which enables a predictive estimation of the material behavior. In addition, a material model for steel fiber reinforced plastics (SFRP) is implemented for LS-Dyna®. Combined with a material model for carbon fiber reinforced plastics (CFRP), the SFRP-model is used for the description of hybrid laminate layups, consisting of SFRP and CFRP layers, within in the FEM. Finally, a detailed analysis regarding the prediction suitability for the model of the load redistribution process as well as for the description of SCFK within the FEM is presented.

Kurzfassung

Trotz überlegenen gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften von klassischen, endlosfaserverstärkten Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV), sind oftmals das spröde Versagensverhalten unter Zug- und Biegebeanspruchungen sowie die daraus resultierende geringe Schadenstoleranz und Strukturintegrität ein Ausschlusskriterium für diese Werkstoffe. Weitere anwendungsbezogene Ausschlusskriterien folgen aus der, verglichen mit metallischen Leichtbauwerkstoffen, eher als gering einzustufenden elektrischen Leitfähigkeit. Eine vielversprechende Möglichkeit, um diesen Nachteilen entgegen zu wirken besteht in der Hybridisierung von duktilen metallischen Verstärkungsfasern und klassischen Verstärkungsfasern. Damit können elektrische und thermisch leitfähige Hybridwerkstoffe erzeugt werden, die neben sehr guten gewichtsspezifischen mechanischen Eigenschaften eine signifikante Verbesserung der Schadenstoleranz und der Crashperformance ermöglichen. In Abhängigkeit der Werkstoffzusammensetzung, der Laminatarchitektur und der angewandten Hybridisierungsstrategie, bieten die eingebetteten Metallfasern aufgrund ihrer hohen Bruchdehnung alternative Lastpfade und ermöglichen so die Lastaufnahme auch nach dem Versagen der klassischen Verstärkungsfasern. Während das Potenzial dieser Hybridwerkstoffe bereits für verschiedenste Werkstoffkombinationen bewiesen wurde, konzentriert sich die vorliegende Arbeit darauf, die verschiedenen Wirkmechanismen des Materialverhaltens von metallisch hybridisierten FKV vor, nach und während des Versagens zu verstehen und verschiedene Beschreibungsansätze und -modelle dafür zu entwickeln. Am Beispiel von stahl- und kohlenstofffaserverstärktem Epoxidharz (SCFK) wird hierzu eine umfangreiche experimentelle Untersuchung vorgestellt. Dabei wird gezeigt, dass das Versagen der Kohlenstofffasern einen komplexen Lastumlagerungsprozess auslöst und dass das Materialverhalten nach dem Versagen der Kohlenstofffasern im Wesentlichen von den dabei entstehenden lokalen Schädigungen und Beanspruchungen abhängt. Ferner kann gezeigt werden, wie diese Schädigungen und Beanspruchungen durch die Zusammensetzung des Werkstoffes, die Laminatarchitektur oder die Prüfkörpergeometrie beeinflusst werden können. Darauf aufbauend wird ein neuartiges Werkstoffmodell vorgestellt, mit dem der komplexe Lastumlagerungsprozess nach dem Versagen der Kohlenstofffasern abgebildet werden kann und mit dem eine schnelle Abschätzung der Materialeigenschaften möglich ist. Darüber hinaus wird ein

Materialmodell zur Abbildung des Materialverhaltens von stahlfaserverstärkten Kunststoffen (SFK) für den Solver LSDyna implementiert und in Kombination mit einem Materialmodell für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) für die Beschreibung von auf Laminebene hybridisiertem SCFK mit der FEM verwendet. Abschließend wird sowohl für das Modell des Lastumlagerungsprozesses als auch für die Beschreibung von SCFK mit der FEM eine detaillierte Analyse der Vorhersageeignung vorgestellt.