

Zusammenfassung

Ein wesentliches Merkmal faserverstärkter Kunststoffe (FKV) im Vergleich zu alternativen Werkstoffen sind massenspezifisch hohe mechanische Eigenschaften. Sie sind deshalb zweifelsohne eine wichtige Gruppe von Strukturmaterialien, die eingehend betrachtet werden muss, wenn es bei der Konzipierung tragender Strukturen um die Umsetzung von Leichtbauanforderungen geht. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur ganzheitlichen Gestaltung von Bauweisen aus Faserkunststoffverbund-Werkstoffen liefern. Aufgrund der Breite des Themengebiets konzentriert sie sich auf die Betrachtung der konstruktiven Aspekte bei der Entwicklung von Bauweisen aus lang- und endlosfaserverstärkten Kunststoffen sowie auf die Darstellung und Diskussion der Betriebsfestigkeitsproblematik derartiger Strukturen.

Im einleitenden Teil der Arbeit sind Beispiele zum Entwicklungsstand und zu den Perspektiven des Einsatzes von FKV in verschiedenen Bereichen der Technik (Luftfahrt, Automobilindustrie, Bahntechnik, Maschinenbau) und eine Zusammenstellung der wichtigsten Werkstoff- und Halbzeugformen der für Strukturanwendungen relevanten Polymermatrixverbunde zusammengestellt. Ein wesentlicher Aspekt dieses Teils der Arbeit ist die Darstellung möglicher Formen und konstruktiver Gestaltungsaspekte von FKV-Bauweisen. Dabei wird nach Anregungen und Antworten auf die Fragestellung gesucht, wie und mit welchen Halbzeugen, einschließlich der dabei zu beachtenden Randbedingungen, werkstoffgerechte und erfolgversprechende Lösungsvorschläge erarbeitet werden können. In diesem Abschnitt werden der Entwurf von FKV-Bauweisen sowie die anwendbaren Entwurfsphilosophien und Leichtbaustrategien betrachtet. Die grundlegenden Formen monolithischer Bauweisen und Sandwichkonstruktionen werden zusammen mit ihrem jeweiligen Eigenschaftsspektrum und ihren Anwendungen beschrieben. Textile Faserpreform-Bauweisen werden dargestellt, die zunehmend Aufmerksamkeit dadurch erregen, dass sie wesentliche Gestaltungsfreiheiten und Kostenreduzierungen in der Fertigung ermöglichen. Ein kleiner Abschnitt widmet sich der Darstellung von FKV/Metall-Hybridbauweisen in der Automobilindustrie.

Als Beispiel eigener FKV-Bauweisenentwicklungen wird zunächst eine Pkw-Sitz- Traverse aus einer langfaserverstärkten Thermoplastmatrix betrachtet, die nach der Anpassung des Fertigungsprozesses auf die neue Werkstoffklasse im Spritzgussverfahren hergestellt wurde. Die Sicherheitsschuhkappe, die über das thermische Umformen (ähnlich dem Tiefziehen bei Metallblechen) aus vorkonsolidierten, thermoplastischen Plattenhalbzeugen mit Endlos-Glasfaserverstärkung (organische Bleche) gefertigt wurde, ist eine Anwendung für die Massenproduktion. Weiterhin wird auf eine Sandwichplatte für ein Indoor-Kart eingegangen, die mit der Zielrichtung einer möglichst hohen Lebensdauer ausgelegt wurde. Die Fertigung der Platte erfolgt in einem Schritt über die Vakuumfiltration einer Duroplastmatrix in die trocken eingelegten Kohlenstoff/Glas-Hybrid-Deckschichten und den Balsaholzkern. Zum Abschluss dieses Kapitels werden Ergebnisse einer laufenden Entwicklung monolithischer Zylinderschalenstrukturen aus einem kohlenstofffaserverstärkten Duroplastkunststoff für ein Großexperiment in der Hochenergie-Teilchenphysik dargestellt. Die wesentlichen Anforderungen sind hier eine möglichst geringe Masse, hohe geometrische Präzision und die Anwendbarkeit in einer Umgebung mit extrem hoher elektromagnetischer Strahlung.

Das zweite Hauptkapitel widmet sich dem Betriebsfestigkeitsaspekt und dem Stand der Technik aus der Perspektive der FKV-Bauweisen. Hierbei wurde das Hauptaugenmerk auf die Problematik der Lebensdauervorhersage im Umfeld des konstruktiv tätigen Ingenieurs gelegt. In diesem Kapitel sind die grundlegenden Methoden dargestellt, die zur experimentellen Untersuchung und Charakterisierung des Ermüdungsverhaltens von FKV-Werkstoffen, das aufgrund der Inhomogenität und Anisotropie wesentliche Unterschiede im Vergleich zu Metallen zeigt, angewendet werden. Ein weiterer Abschnitt beschreibt die derzeit verfügbaren, linearen und nichtlinearen Methoden zur rechnerischen Lebensdaueranalyse von FVK-Werkstoffen unter Schwingermüdungsbelastung.

Eigene Forschungsarbeiten sind auf die Entwicklung von Methoden zur rechnerischen Lebensdauervorhersage geometrisch komplexer FKV-*Strukturen* ausgerichtet, die mehrachsigen Spannungszuständen und mehrstufigen, ggf. auch stochastischen Belastungsprofilen unterworfen sind. Die Berücksichtigung mehrachsiger Spannungszustände erfordert die Entwicklung geeigneter Versagenskriterien, welche die momentanen Spannungskomponenten mit den korrelierenden, von der momentanen Schwingungsamplitude abhängigen Festigkeitswerten verknüpft; darüber hinaus wird eine Verallgemeinerung der angewendeten Schadensmetrik benötigt. Sollen Strukturen mit komplexer Geometrie betrachtet werden, so müssen strukturmechanische Methoden, wie beispielsweise die Finite-Ele-

mente-(FE-)Methode, zusammen mit der Lebensdaueranalyse in iterativer Art und Weise eingesetzt werden. Im hier verfolgten Ansatz wird ein kommerzielles Finite-Elemente-Programmsystem angewendet, mit dessen Hilfe der Dehnungszustand der Struktur in Abhängigkeit der bis zum betrachteten Schwingspielinkrement akkumulierten Schädigung bestimmt wird. Das Dehnungsergebnis wird danach an das Lebensdaueranalyseprogramm weitergegeben, wo infolge des jeweiligen Schwingspielinkrements der Grad der Werkstoffdegradation ermittelt wird. Dabei ist die Lebensdauergerade anhand einer in Bezug auf den jeweiligen Anwendungsfall zu definierenden Schwingbruchbedingung zu bestimmen. Sofern im betrachteten Schwingspiel das Ende der Lebensdauer noch nicht erreicht ist, wird die Verringerung der Werkstoffsteifigkeit aufgrund des Schwingspielinkrements ermittelt und an das FE-Programm zurückgegeben. Nach der Anpassung des Strukturmodells an die veränderten Werkstoffeigenschaften wird dort zur Vorbereitung der Analyse des nächsten Schwingspielinkrements eine erneute Berechnung der Struktur vorgenommen. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis die rechnerische Lebensdauer des Bauteils erreicht ist. Die Behandlung deterministischer oder stochastischer Last-Zeit-Profile erfordert die Verfügbarkeit von Wöhlerlinien für alle darin enthaltenen Mittelspannungen und Spannungsamplituden (Lebensdauerdiagramm), was bei vollständiger experimenteller Ermittlung mit einem enormen Zeit- und Kostenaufwand (sofern überhaupt möglich) verknüpft ist. Als Ausweg aus dieser Problematik wird das Lebensdauerdiagramm auf der Grundlage einiger weniger, experimentell zu ermittelnder Wöhlerlinien durch verschiedene Interpolationsansätze numerisch angenähert.

Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf die Perspektiven der FKV-Technologie für Strukturanwendungen.

Abstract

One predominant characteristic feature of fibre reinforced polymer matrix composites (PMC) compared to alternative structural materials are superior mass-specific mechanical properties. PMC are, by no doubt, a major group of materials which need to be considered in order to achieve light-weight requirements in the design of load-bearing components. This work focusses on the aspects of a designer in the development of composite structures reinforced with long and continuous fibres as the PMC/metal multi-material design approach as applied in the well as the issue of cyclic fatigue and presents an outline of the relevant PMC materials.

The introductory chapters include the state-of-the-art of PMC applications in various industrial fields such as civil aircraft, car, railway and machinery industries as well as a survey of the major PMC materials and the varieties of semi-finished products for structural applications. The considered materials include reinforcing fibre materials and the different types of fabrics produced from fibre rovings, the relevant polymer matrices as well as the fibre-matrix composites available on the market (long-fibre thermoplastics, sheet moulding compounds and prepregs). This section is concluded with a survey on sandwich core materials such as honeycombs and structural foams as well as structural adhesives.

A comprehensive description of the design process associated with different kinds of PMC materials is presented providing suggestions and answers for the material choice and application aiming at a structural design approach oriented to the specific properties of the applied material. One important aspect of this part of the work is to discuss the possibilities and the boundary conditions for the successful application of fibre reinforced composites. This chapter includes design philosophies and strategies in order to achieve light weight structures. Monolithic and sandwich structures, as well as their characteristics and applications, are described as basic types of PMC structures. The textile fibre preform technology is presented which gains more and more attention and importance with regard to manufacturing possibilities and cost reduction. A small section is devoted to the PMC/metal multi-material design approach as applied in the automotive industry under conditions for mass production.

One of the sections presents results of own development work covering a car seat cross member made out of a long-fibre reinforced thermoplastic matrix, applying an injection moulding process after its adjustment to this innovative material type. A protective toe cap is described as an example for a multi-use application of consolidated thermoplastic sheet materials with continuous glass fibre reinforcement („organic sheets“) which are manufactured through heating above the melting temperature and forming in a fast-moving press comparable to the deep drawing technique in sheet metals. Furthermore, a sandwich plate application for an in-door kart is shown which was designed for durability and manufactured using a one-step vacuum infiltration process of a thermoset matrix into the dry carbon/glass hybrid skins and the balsa core. Finally, results of an on-going development effort towards the production of monolithic cylindrical support structures designed for minimum weight, high precision and application in very harsh radiation environments are shown which will be installed in a large high energy particle physics experimental apparatus.

Another part of the work deals with the problem of the cyclic fatigue behaviour of PMC materials under the aspect of the design engineer and presents and discusses the available methods for the theoretical prediction of the fatigue life. The basic experimental procedures are covered to investigate and characterize the fatigue behaviour of PMC materials which is rather different from the behaviour of metals due to their inhomogeneous and anisotropic nature. One section describes the linear and non-linear methods for the fatigue life prediction of PMC materials under constant amplitude loading.

Own research is directed towards the development of methods for the fatigue life prediction of geometrically complex PMC structures under general plane stress states and variable amplitude loading profiles, including stochastic load-time processes. To consider multi-axial stress states in fatigue loaded components the development of appropriate failure criteria which correlate the actual stress components and the corresponding uniaxial cyclic strength values, as well as a generalization of the fatigue damage metric is needed. The treatment of structures with general geometries requires the iterative structural finite element analysis to determine the strain field for the accumulated damage state up to the fatigue cycle increment under consideration, and the fatigue life analysis to determine the degree of material degradation in the PMC material and the final fatigue failure of the structure. The treatment of variable and stochastic load-time processes raises the problem of fatigue life under variable stress means and amplitudes (fatigue life diagram) and the associated tremendous experimental effort which is overcome by various interpolation procedures from a limited number of S-N curves determined experimentally.

In the conclusion, a survey of the prospects of the PMC technology for structural application is presented.