

Rissüberbrückung und translaminare Verstärkung in Faserverbundwerkstoffen

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

von Albrecht Radtke

Kurzfassung

Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (FKV) finden – insbesondere in Form von Mehrschichtverbunden als Laminat – aufgrund ihrer hohen spezifischen mechanischen Eigenschaften und der Besonderheit des lastgerechten Designs z.B. durch Wahl von Lagenorientierungen in vielen Bereichen Anwendung. Dieser Aufbau aus einzelnen Lagen jedoch macht die Verbundwerkstoffe auch anfällig für Ablösungen der einzelnen Lagen voneinander, sogenannte Delaminationen. Diesen wirken Rissüberbrückungsmechanismen entgegen, welche Rissausbreitungen innerhalb der Laminatstruktur verlangsamen oder sogar verhindern können. Diese Mechanismen können dabei sowohl intrinsisch durch den Lagenaufbau und die Struktur der verwendeten textilen Halbzeuge als auch extrinsisch durch explizite Maßnahmen zur translaminaren Verstärkung ausgelöst werden. Eine umfassende Kenntnis und Fähigkeit zur Modellierung der Rissüberbrückung und damit verbundener Veränderungen in FKV-Laminaten ist von großer Bedeutung, um ihr Leichtbaupotential voll ausschöpfen zu können und gleichzeitig die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Strukturen sicherzustellen. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Beitrag zum Verständnis und der Beschreibung der Rissüberbrückung infolge von Faserüberbrückung und translaminaren Verstärkungen in FKV-Laminaten zu leisten. Für die analytische Modellierung des Risswachstums in überbrückten Rissen wird ein neuer Ansatz vorgestellt, der zur präziseren Beschreibung des Verhaltens Schubdeformationen sowie Nachgiebigkeiten im ungerissenen Bereich berücksichtigt. Dieser erzielt gute Übereinstimmung mit numerischen und experimentellen Ergebnissen und verbessert die Anwendbarkeit für schubweiche Strukturen. Darüber hinaus wird die Mikrostruktur, die sich infolge der Einbringung transversaler Verstärkungen in FKV-Laminaten ergibt, welche maßgeblich für sowohl die resultierende Rissüberbrückung als auch die mechanischen Eigenschaften in der Laminebene sind, untersucht. Ein umfassendes Modell, in dem eine neue segmentierte Beschreibung sich um die Verstärkungen bildender Harzzonen vorgestellt wird, hilft, unphysikalische Annahmen bestehender Modelle zu überwinden, in dem es unter anderem stetige Faserverläufe, realistische Faservolumenanteile und Überlappungen der Einflussbereiche benachbarter Verstärkungen adressiert. Anhand einer Fallstudie, die auch die Anwendbarkeit für rechteckige Pinquerschnittsgeometrien belegt, wird der Einfluss verschiedener Modellannahmen auf die resultierenden effektiven Steifigkeiten in der Laminebene dargelegt. Anhand einer experimentellen Studie wird ergänzend die Übertragbarkeit eines für kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) entwickelten Verfahrens zur translaminaren Verstärkung auf naturfaserverstärkte Kunststoffe (NFK) mit ihren textilen Besonderheiten untersucht. Es wird gezeigt, dass sich durch das z-Anchoring-Verfahren, welches laminateigene Fasern in Dickenrichtung umorientiert, mit den verwendeten Prozessparametern keine maßgeblichen Veränderungen der interlaminaren Bruchzähigkeit, Zug- und Biegeeigenschaften erzielen lassen. Es wird aber unabhängig von den Prozessparametern eine deutliche Steigerung der bruchmechanischen Eigenschaften durch Faserüberbrückung in den NFK-Laminaten festgestellt und in einem Rissüberbrückungsgesetz quantifiziert.

Abstract

Fiber-reinforced plastics (FRP) are used in many applications, particularly in the form of multilayer composites as laminates, due to their high specific mechanical properties and the special feature of load-dependent design through the selection of layer orientations. However, this layer structure also makes the composites susceptible to separation of the individual layers from each other, known as delamination. This is counteracted by crack bridging mechanisms, which can slow down or even prevent crack propagation within the laminate structure. These mechanisms can be triggered both intrinsically by the layup and the structure of the textiles used, and extrinsically by explicit measures for translaminar reinforcement. Comprehensive knowledge and the ability to model crack bridging and associated changes in FRP laminates are of great importance in order to fully utilize their lightweight design potential while ensuring the safety and reliability of the structures. The aim of this work is to contribute to the understanding and description of crack bridging as a result of fiber bridging and translaminar reinforcements in FRP laminates. A new approach is presented for the analytical modeling of crack growth in bridged cracks, which takes into account shear deformations and compliance in the uncracked area for a more precise description of the behavior. This approach achieves good agreement with numerical and experimental results and improves the applicability for shear-soft structures. In addition, the microstructure resulting from the introduction of transverse reinforcements in FRP laminates, which are decisive for both the resulting crack bridging and the mechanical properties in the laminate plane, is investigated. A comprehensive model, in which a new segmented description of the resin zones formed around the reinforcements is presented, helps to overcome unphysical assumptions of existing models by addressing, among other things, continuous fiber orientations, realistic fiber volume contents, and overlaps of the influence zones of adjacent reinforcements. A case study, which also demonstrates the applicability for rectangular cross-section pin geometries, illustrates the influence of different model assumptions on the resulting effective stiffness in the laminate plane. An experimental study also examines the transferability of a translaminar reinforcement method developed for carbon fiber reinforced plastics (CFRP) to natural fiber reinforced plastics (NFRP) with their textile characteristics. It is shown that the z-anchoring process, which reorients the laminate's own fibers in the thickness direction, does not result in any significant changes in interlaminar fracture toughness, tensile, and flexural properties with the process parameters used. However, a significant increase in fracture mechanical properties due to fiber bridging in the NFRP laminates is observed independently of the investigated process parameters and quantified in a crack bridging law.