

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde ein glasfaserverstärkter Rotor für einen Elektromotor entwickelt, welcher bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen verwendet werden soll. Ziel ist eine kostengünstige Serienversion des Motors auf Basis eines bereits bestehenden Baumusters. Im Wesentlichen waren dabei zwei Anforderungsfelder zu erfüllen.

Als erstes mussten Verformungsrestriktionen unter Betriebslast eingehalten werden. Es wurde ein Finite-Elemente-(FE-) Modell erstellt, wobei eine Schnittstelle zwischen der Prozesssimulation der Fertigung und dem FE-Modell geschrieben wurde, um die Informationen zum Lagenaufbau zu transferieren. Sowohl in der Analytik als auch in der numerischen Simulation hat sich gezeigt, dass bei der im Betrieb auftretenden Fliehkraft die gewünschte Verformung nur mit Hilfe der zu verwendenden Glasfaser nicht eingehalten werden kann. Daraufhin wurde ein Konzept entwickelt, um die Verformung mittels einer adaptiven Steuerung mit Formgedächtnislegierungen zu begrenzen. Zunächst wurden Konzepte entwickelt, wie die Formgedächtnislegierung in Drahtform an den Rotor angebunden werden kann. Die Konzepte wurden experimentell überprüft, wobei gleichzeitig das Verhalten der Formgedächtnislegierung ermittelt wurde, um daraus ein numerisches Simulationsmodell zu entwickeln, welches mit dem Modell des Rotors verknüpft wurde. Dabei zeigte sich, dass dieses Konzept das Verformungsverhalten positiv beeinflusst und in Abhängigkeit von der verwendeten Menge die Verformungsrestriktion eingehalten werden kann.

Als zweites Anforderungsfeld wurde die Lasteinleitung zwischen dem Rotor und der Abtriebswelle ausgelegt. Dafür wurde ein Konzept für eine Verschraubung als Sonderform einer Bolzenverbindung erarbeitet, bei denen ein Gewinde in der dickwandigen glasfaserverstärkten Kunststoff (GFK-) Struktur des Rotors mittels in-situ-Herstellung eingebracht wird. Um die Vor- und Nachteile eines solchen geformten Gewindes gegenüber einer geschnittenen Variante zu ermitteln, wurden umfangreiche quasistatische Versuche und zyklische Lebensdauerversuche an zwei verschiedenen Laminaten und zwei verschiedenen Gewindetypen durchgeführt. Gemessen wurde jeweils die (Ermüdungs-) Festigkeit bei axialer Kraft und bei Scherkraft. Dabei zeigte sich, dass bei quasistatischer axialer Belastung die geformten Gewinde im Mittel eine geringere Festigkeit aufweisen als die geschnittene Variante.

Bei der für den Anwendungsfall relevanteren Scherbelastung konnten im Mittel jedoch Festigkeitssteigerungen gemessen werden. Bei der Ermüdungsfestigkeit waren die Vorteile abhängig von dem geprüften Lastniveau. Die Wöhlerlinien bei den geformten Gewinden haben im Mittel einen deutlich flacheren Verlauf. Für die meisten Vergleichspaare bedeutet dies, dass die geschnittene Variante bei sehr hohen Lastniveaus beim Einstufenversuch eine größere Versagensschwingspielzahl erreicht als die geformte Variante. Bei Verringerung der Last haben ab einem individuellen Kreuzungspunkt jedoch die geformten Gewinde eine größere Schwingspielzahl erreicht.

Abschließend wurde ein voll parametrisches numerisches Einheitszellen-Modell erstellt, welches sowohl die geformten als auch die geschnittenen Gewinde abbilden kann. Hierbei wurden auch Degradationsmodelle integriert, die ein verändertes Werkstoffverhalten nach dem Auftreten insbesondere von Zwischenfaserbrüchen und Delaminationen abbilden sollen. Validiert wurden die Modelle, indem die quasi-statischen Versuche nachgebildet wurden und die globale Verformung mit den optischen Messungen aus den Versuchsreihen verglichen wurden. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung bis relativ nah an die Schraube heran. In diesem Bereich war die Simulation minimal zu steif, was auf eine noch nicht ausreichende Degradation in der Simulation hindeutet.

Abstract

In this study a GFRP rotor of an electric engine is developed. The engine shall be used in electric drive trains in cars. Major aim of the study is to develop a low-cost version of an existing prototype for serial production with a relatively high output of at least 50.000 units per annum. Two main aims must be achieved.

First of all, the structural deformation must be limited under operating load. To predict the deformation, a finite element model was set up. To import the lay-up information from a filament winding process simulation software into the FE-model, a compiler-tool was written. The numerical simulation and an analytical calculation have shown that the GFRP-laminate alone is not able to limit the radial deformation caused by centrifugal force under rotation. So a different approach was developed, using an adaptive control with shape memory alloys. For this, a concept was investigated, how the shape memory alloy wires can be attached on the GFRP structure. The strengths of the different concepts were measured experimentally and simultaneously the force-temperature behavior of the wire was investigated. Out of these empirical studies, a material model of the shape memory alloys for the numerical simulation was developed and combined with the existing simulation model of the rotor. The simulation showed that the shape memory alloys can be used to decrease the radial deformation below the given limits.

The second main requirement was to develop a proper load transfer from the metallic output shaft into the GFRP rotor. For serial rotor production with a high output, the direct forming of threads in the thick-walled GFRP was investigated. The direct forming of threads reduces the manufacturing costs by avoiding wear of drilling and cutting tools, although with a slight increase of tooling costs which are less relevant due to the economies of scale of high output manufacturing processes as the filament winding process. In this study the mechanical behavior of directly formed threads was compared to conventionally tapped threads. Two different GFRP laminate layups were investigated, a cross-ply-laminate and a quasi-isotropic laminate, both with a thickness of approximately 12 mm, impregnated with epoxy resin. A standard metrical thread and a more coarse thread were also compared, both with an outer diameter of 8 mm. Two different tests were investigated: a pullout

test of the screw perpendicular to the laminate and a bearing-pull-through-test in the laminate plane.

The quasi static test results show differences in fracture behavior, but in general very good strength and stiffness behavior compared to conventionally cut threads in thick-walled GFRP. The deformations of the surface of the GFRP laminates during the tests were measured with a three dimensional digital image correlation system. The measured deformations were used to validate the numerical simulations of the tests. These simulations were parametrical built up in order to adapt them easily to other application cases. They use a degradation mechanism to simulate the connection behavior very close to the total fraction and show a very good correlation to the experimental results.

As a second step, the fatigue behavior of the connection was also investigated. To compare the cyclic performance of the formed and cut threads for both kinds of tests, for both laminates and both threads - the metric and the coarse ones -, Woehler diagrams with a load aspect ratio of $R=0.1$ were measured. Especially the high cycle fatigue behavior with a relatively low maximum load, as commonly used in a real structure, improves a lot when forming the threads.

At last a full parametrical numerical model of the laminate with both the formed and the cut thread was generated. Also algorithms for material degradation were integrated. They can represent the behavior of the material after the appearance of inter fiber failures or delamination. The validation of the numerical model was achieved by remodeling the experimental tests and comparing the global deformation of the model with the optical measurement of the quasi static tests. The deformation of the simulation was very congruent to the tests, only very close to the screw the simulation shows a slightly more stiff behavior. This indicates a not sufficient degradation of the simulation due to damage effects in the material.