

Abstract

In recent years, thermoplastic composites (TPCs) have been increasingly used for aerospace and automotive applications. But also other industrial sectors, such as the medical technology, have discovered the benefits of this material class. Compared to thermoset composites, TPCs can be recycled more easily, remelted, and welded. In addition to that, TPC parts can be produced economically and efficiently. As an example, short cycle times and high production rates of TPCs can be realised with the injection moulding processing technology. Injection moulded parts have the advantage that function integration is feasible with relatively little effort.

However, these parts are characterised by discontinuous fibre reinforcement. Fibres are randomly distributed within the part and fibre orientation can show significant local variations. Whereas the highest stiffness and strength values of the material are achieved parallel to fibre orientation, the lowest values are present in transverse direction. As a consequence, structural mechanical properties of injection moulded discontinuous fibre reinforced parts are lower compared to their continuous fibre reinforced counterparts. Continuous fibre reinforced components show excellent specific mechanical properties. However, their freedom in geometrical product design is restricted.

The aim of this work is to extend the applicability of TPCs for structural mass products due to the realisation of a high-strength interface between discontinuous and continuous fibre reinforced material. A hybrid structure with unique properties is produced by overmoulding a continuous unidirectional endless carbon fibre (CF) reinforced polyether ether ketone (PEEK) insert with discontinuous short CF reinforced PEEK. This approach enables the manufacturing of structural mass products in short cycle times which require both superior structural mechanical properties and sufficient freedom in product design. However, sufficient interface strength between the discontinuous and continuous component is required.

This research is based on the application case of a pedicle screw system which is a spinal implant used for spine stabilisation and fusion. Since the 1990s, CF-PEEK has been successfully used for spinal cages, and recently also for pedicle screws and pedicle screw systems. Compared to metallic implants, CF-PEEK implants show several advantages, such as the reduction of stress shielding, the prevention of artefacts in medical imaging technologies (X-ray, computer tomography scan, or magnetic resonance imaging) or the avoidance of backscattering during radiotherapy. Pedicle screws, which are used in the lumbar spine region, are subjected to high forces and moments. Therefore, a hybrid composite pedicle screw was developed which is based on the overmoulding process described before.

Different adherence tests were conducted to characterise the interface strength between short and endless CF reinforced PEEK. However, no standardised test method existed for interface strength characterisation of overmoulded structures. Sufficient interface strength could only be achieved if a cohesive interface was formed. Cohesive interface formation due to the melting of the surface of the endless CF reinforced PEEK insert after contact with the molten mass required an insert pre-heating temperature of at least 260 °C prior to overmoulding. Because no standardised test method existed for interface strength characterisation of overmoulded structures, a novel test body was developed. This cylinder pull-out specimen did not require any relevant rework steps after manufacturing so that the interface strength could be directly

tested after overmoulding. Pre-heating of the endless CF reinforced PEEK inserts resulted in a 73 % increase in interface strength compared to non-pre-heated inserts.

In addition to that, a parametric finite element pedicle screw-bone model was developed. By parametric optimisation, the optimal hybrid composite pedicle screw design in terms of pull-out resistance was found. Within the underlying design space, the difference in screw stability between the worst and the best screw design was approximately 12 %. The resulting design recommendations had to be opposed to the manufacturing requirements to define the final screw design. The moulds of the injection moulding machine were manufactured according to this design so that the hybrid composite pedicle screw could be produced.

The findings of extensive material and interface characterisation were crucial for the achievement of a cohesive interface between insert and overmould so that superior structural mechanical properties of the hybrid composite pedicle screw could be achieved. For example, the bending strength of hybrid composite screws was approximately 48 % higher than the bending strength of discontinuous short CF reinforced PEEK screws. Additionally, fatigue resistance was enhanced by the hybrid screw configuration so that the risk of premature pedicle screw failure could be reduced. In the breaking torque test, hybrid composite screws showed a reduction of 11 % in their breaking torque values compared to their discontinuous fibre reinforced counterparts. However, not only in this test but also in the quasi-static and cyclic bending test, structural integrity of the hybrid composite screws could be maintained which is important for implant components.

Kurzfassung

In den letzten Jahren ist die Nutzung thermoplastischer Verbundwerkstoffe (TPCs) gerade in der Automobilindustrie und im Luftfahrtbereich stark gestiegen. Aber auch in anderen Industriebereichen, wie zum Beispiel in der Medizintechnik, wurden die Potentiale dieser Materialklasse erkannt. Im Vergleich zu duroplastischen Verbundwerkstoffen können TPCs leichter recycelt, wieder aufgeschmolzen und geschweißt werden. Außerdem können TPC Bauteile ökonomisch und effizient hergestellt werden. Als Beispiel sei an dieser Stelle die Spritzgusstechnologie genannt. TPC Spritzgussbauteile können in kurzen Zykluszeiten und in hohen Stückzahlen mit dieser Fertigungstechnologie hergestellt werden. Außerdem besitzen Spritzgussbauteile den Vorteil, dass Funktionsintegration mit vergleichsweise geringem Aufwand realisiert werden kann.

Allerdings bringt die Spritzgusstechnologie neben diesen Potentialen auch einige Nachteile mit sich. Zum Beispiel weisen spritzgegossene TPC Bauteile eine diskontinuierliche Faserverstärkung auf. Die Fasern liegen regellos verteilt im Bauteil vor und die Faserorientierung kann lokal starke Variationen aufzeigen. Während die höchsten Steifigkeits- und Festigkeitswerte des Materials parallel zur Faserorientierung erreicht werden, sind diese quer zur Faserorientierung am niedrigsten. In der Folge sind die strukturmechanischen Eigenschaften dieser spritzgegossenen diskontinuierlich faserverstärkten Bauteile niedriger im Vergleich zu kontinuierlich faserverstärkten Bauteilen. Letztere zeichnen sich durch exzellente spezifische mechanische Eigenschaften aus. Allerdings gibt es Restriktionen hinsichtlich ihrer geometrischen Produktdesignfreiheit.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Erweiterung der Verwendungsmöglichkeiten von TPCs für Strukturbauteile in großen Stückzahlen durch die Herstellung eines hochfesten Interfaces zwischen diskontinuierlicher und kontinuierlicher Faserverstärkung. Durch das Überspritzen eines kontinuierlich unidirektional endlos kohlenstofffaserverstärkten (CF verstärkten) Polyetheretherketon (PEEK) Einlegers mit diskontinuierlichem kurz CF verstärktem PEEK wird eine hybride Struktur mit besonderen Eigenschaften hergestellt. Dieser Ansatz ermöglicht die Fertigung struktureller Massenbauteile in kurzen Zykluszeiten, die sowohl hohe strukturmechanische Eigenschaften aufweisen als auch ausreichende geometrische Produktdesignfreiheiten besitzen. Allerdings ist hierfür eine ausreichende Interfacefestigkeit zwischen diskontinuierlicher und kontinuierlicher Komponente erforderlich.

Diese Forschungsarbeit basiert auf dem Anwendungsfall eines Pedikelschraubensystems, das als Spinalimplantat zur Stabilisierung und Fusionierung der Wirbelsäule eingesetzt wird. Seit den 1990er Jahren wird CF-PEEK erfolgreich für Zwischenwirbelkäfte verwendet. Neuerdings findet es auch Anwendung für Pedikelschrauben und Pedikelschraubensysteme. Im Vergleich zu metallischen Implantaten besitzen Implantate aus CF-PEEK einige Vorteile, wie zum Beispiel die Reduktion der Spannungsabschirmung, die Verhinderung von Artefakten bei verschiedenen bildgebenden Verfahren der Medizintechnik (Röntgen, Computertomographie oder Magnetresonanztomographie) oder die Vermeidung von Rückstreuungen bei der Strahlentherapie. Gerade bei Pedikelschrauben, die im lumbalen Wirbelsäulenbereich eingesetzt werden, treten große Kräfte und Momente auf. Daher wird in dieser Arbeit eine hybride Pedikelschraube aus Faserkunststoffverbund entwickelt, die mit dem oben beschriebenen Überspritzungsprozess hergestellt wird.

Verschiedene Anbindungsuntersuchungen wurden durchgeführt, um die Interfacefestigkeit zwischen kurz und endlos CF verstärktem PEEK zu charakterisieren. Allerdings existierte kein standardisiertes Prüfverfahren, zur Bestimmung der Interfacefestigkeit überspritzter Strukturen. Eine ausreichende Interfacefestigkeit konnte nur durch die Herstellung eines kohäsiven Interfaces erreicht werden. Damit sich ein kohäsives Interface ausbilden konnte, musste ein oberflächennahes Aufschmelzen des endlos CF verstärkten PEEK Einlegers nach dem Kontakt mit der Schmelze erfolgen. Hierfür war eine Einlegervorheiztemperatur von mindestens 260 °C vor dem Überspritzungsvorgang erforderlich. Da kein standardisiertes Prüfverfahren für die Charakterisierung der Interfacefestigkeit von überspritzten Strukturen existierte, wurde ein neuartiger Prüfkörper entwickelt. Keinerlei nennenswerte Nachbearbeitungsschritte waren nach der Herstellung dieses Zylinderauszugsprobekörpers erforderlich, sodass die Interfacefestigkeit direkt nach dem Überspritzen geprüft werden konnte. Durch das Vorheizen des endlos CF verstärkten PEEK Einlegers wurde eine Steigerung der Interfacefestigkeit von 73 % gegenüber nicht vorgeheizten Einlegern erreicht.

Darüber hinaus wurde ein parametrisches Pedikelschrauben-Knochen Modell basierend auf der Methode der finiten Elemente entwickelt. Durch eine parametrische Optimierung konnte das optimale Design der hybriden Pedikelschraube aus Faserkunststoffverbund gefunden werden. Die Unterschiede in der Schraubenstabilität zwischen dem schlechtesten und dem besten Schraubendesign unter Beachtung des zugrunde liegenden Designraumes lagen bei etwa 12 %. Die resultierenden Designempfehlungen mussten den Anforderungen aus dem Herstellprozess gegenübergestellt werden, um das endgültige Schraubendesign definieren zu

können. Entsprechend diesem Design wurden die Werkzeuge der Spritzgussmaschine gefertigt, sodass die hybride Faserkunststoffverbundschraube produziert werden konnte.

Die Erkenntnisse umfassender Material- und Interfacecharakterisierung waren von großer Bedeutung für die Erzeugung eines kohäsiven Interfaces zwischen Einleger und überspritztem Material, welches die Voraussetzung für ausgezeichnete Eigenschaften der hybriden Faserkunststoffverbundschraube war. Beispielsweise war die Biegefestigkeit der hybriden Pedikelschrauben aus Faserkunststoffverbund etwa 48 % höher als die der diskontinuierlich kurzfaserverstärkten PEEK Schrauben. Des Weiteren konnte die Dauerfestigkeit der Schraube durch die hybride Schraubenkonfiguration verbessert werden, sodass das Risiko eines vorzeitigen Schraubenversagens reduziert wurde. Bei der Bruchmomentprüfung haben die hybriden Faserkunststoffverbundschrauben im Vergleich zu den diskontinuierlich faserverstärkten PEEK Schrauben ein um 11 % verringertes Bruchmoment aufgezeigt. Die Strukturintegrität der hybriden Faserkunststoffverbundschrauben war allerdings sowohl nach dieser als auch nach der quasi-statischen und zyklischen Biegeprüfung weiterhin gegeben, was für Implantatkomponenten von großer Bedeutung ist.