



Doctoral Thesis

Process developments and materials optimization of injection moulded anisotropic (CF/PEEK) hip joint endoprosthesis stems

Author(s):

Semadeni, Marco

Publication Date:

1999

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-003829177> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Process Developments and Materials Optimization of Injection Moulded Anisotropic (CF/PEEK) Hip Joint Endoprosthesis Stems

Dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

MARCO SEMADENI

Dipl. Mech. Eng. ETH
born September 12th 1968
citizen of Thalwil, ZH

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. E. Wintermantel, examiner
Prof. Dr. P. Niederer, co-examiner

1999

Summary

The proposed thesis aimed at the development of an anisotropic hip endoprosthesis stem using injection molding related processes as net shape technologies. This task was approached with (i) the development of a precursor material aiming at an optimized fiber content, (ii) the development of new injection molding processes aiming at process directed control of the fiber orientation distribution and, (iii) the application on hip endoprostheses showing the potential of the combination of an optimized material based on carbon fiber reinforced PEEK with a new process technology.

Twin screw extrusion was used to estimate the limits of reinforcement regarding processability and residual fiber length. Varying the fiber content between 30 and 68 w/w%, it could be shown that, all suggested fiber contents could be processed, however, leading with increasing fiber content to a pronounced deterioration of the fibers down to a residual length of 50 μm at 68 w/w%. The influence of the fiber content on the shear viscosity of the melt could be described by the relation of Geisbüsch and Schulze-Kadelbach. The subsequent injection molding process did not influence the mean fiber length significantly, but it caused narrowing of the fiber length distribution, thus indicating the deterioration of the injection molding process for higher fiber lengths. The analysis of the influence of fiber content and length on the structure-properties relations in the investigated tensile test specimens revealed that the highest mechanical strength is achieved at 50 w/w%. Above this value, structural inhomogeneities, e.g. domains and localized vortices, are strength limiting. It could be described that the occurrence of domains at high fiber contents can be related to the residual fiber length using a fiber deterioration hypothesis that, in contrast to the literature, takes fiber-fiber interactions into account.

The working principle of the new injection molding processes, called push out and push through molding, is the maintenance of a continuous flow in the part during consolidation, thereby, providing process integrated control over the fiber orientation distribution. The evaluation of this specific potential in comparison to push-pull molding and conventional injection molding indicated that the new technology provides additional mechanical performance if fiber content and fiber length are increased and when the process is applied to bulky parts, e.g. as the hip endoprosthesis stem. Compared to the commercially available carbon fiber reinforced PEEK (Victrex 450CA30) processed by conventional injection molding, the combination of the optimized material (APC2/IM7, 50 w/w% fiber content) with push-through injection molding allowed to increase modulus and strength by 171 and 80%, respectively.

Applying optimized material and processing technology to the endoprosthesis stem, which was specifically designed for this technique, an optimization of the shell to core ratio in the stem cross section could be achieved. Clinically even more relevant, a ratio of fatigue to static strength of 0.69 could be achieved. The investigation of the biomechanical behavior of the injection molded prostheses showed that a, presumably advantageous, relation between bending stiffness and reduction of surface strains could be achieved by the maximization of the shell to core ration in the stem.

Finally, it was possible to show that the combination of a highly filled, long carbon fiber reinforced PEEK and continuous flow processes by injection molding will allow the realization of highly load bearing, anisotropic orthopeadic implants being fully compatible with modern diagnostic imaging technologies, e.g. CT- and MRI-imaging. Also the material is free from metal ions, thus, making contribution to prevent patients from metal allergies.

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Doktorarbeit war die Realisierung eines anisotropen, aus kohlenstofffaserverstärktem PEEK hergestellten, Hüftendoprothesenschaftes auf der Basis neu zu entwickelnder Spritzgusstechnologien. Die Optimierung wurde auf drei Ebenen durchgeführt: (i) durch die Entwicklung eines hinsichtlich Fasergehalt- und -länge optimierten, spritzgussfähigen Granulates. (ii) durch die Entwicklung neuer Spritzgussverfahren, welche eine bessere Kontrolle über die Faserorientierung im Bauteil ermöglichen und (iii) durch die Anwendung von optimiertem Granulat und neuer Spritzgusstechnik auf einen neuen Endoprothesenschaft.

Es konnte gezeigt werden, dass sich Fasergehalte zwischen 30 und 68 Gewichtsprozent mittels eines Doppelschneckenextruders verarbeiten lassen, wobei mit zunehmendem Fasergehalt die Faserlängen auf 50 μm bei 68 Gew.% reduziert wurden. Der Einfluss des Fasergehaltes auf die Scherviskosität der Schmelze liess sich durch die bekannten Beziehungen von Geisbüsch und Schulze-Kadelnach beschreiben. In Versuchen an aus Laminaten gefertigten Langfasergranulaten konnte die Faserlänge auf etwa einen Achtel der Ausgangsfaserlänge von 4 mm im Bauteil gesteigert werden. Dies stellt eine erhebliche Steigerung dar. Spritzgussversuche an Schulterprüfstäben zeigten, dass sich das homogenste Gefüge und damit die höchsten Festigkeiten mit 50 Gew.% Langfasergranulat erreichen lässt. Höhere Gehalte und längere Fasern führen zu Gefügeheterogenitäten, wie die Bildung von lokalen Wirbeln und Domänen, welche die Festigkeit limitieren. In einer neuen Hypothese zur scherungsinduzierten Faserlängenreduktion konnte die Interaktion zwischen den Fasern mit einbezogen werden.

Die neu entwickelten Spritzgussverfahren sind dadurch zu charakterisieren, dass der Schmelzfluss in der plastischen Seele des Bauteils durch kontrolliertes Überspritzen so lange aufrecht erhalten wird, bis die zentralen Bereiche der Bauteile einfrieren und damit eine optimale Orientierung der Fasern erreicht werden kann. Im Vergleich zum konventionellen und zum Gegentaktspritzguss konnte gezeigt werden, dass sich diese Form der Prozessführung bei steigendem Fasergehalt und -länge, vorallem aber in Kombination mit grossvolumigen Bauteilen, vorteilhaft verhält. Im Vergleich zu einem konventionell gespritzten kohlenstofffaserverstärkten PEEK (Victrex[®] 450CA30) konnten durch die Kombination der neuen Verfahren mit dem optimierten Spritzgussgranulat E-Modul und Festigkeit um 171%, resp. 80%, angehoben werden.

Durch die Anwendung der optimierten Werkstoffe und Prozesse auf dem spritzgussgerecht ausgelegten Endoprothesenschaft konnte das Gefüge, insbesondere das Verhältnis von

hochorientierter Randzone zur Kernzone, optimiert werden. Dies äusserte sich auch in der biomechanisch bedeutsamen Reduktion der Oberflächendehnung. Im Vergleich zu konventionell spritzgegossenen kurzfaserverstärkten Polymeren konnte das hohe Wechselfestigkeitsverhältnis von 0.69 erreicht werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch die durchgeführten Entwicklungsschritte die Voraussetzungen für die Realisation von lasttragenden, faserverstärkten Implantaten durch den Spritzgussprozess geschaffen wurden. Kohlenstoffaserverstärktes PEEK gewährleistet dabei herausragende Langzeitbeständigkeit und ermöglicht zudem, klinisch besonders bedeutsam, die artefaktfreie Abbildung des Implantates durch diagnostische, bildgebende Verfahren wie Computer- und Magnetresonanztomographie, und der neue Werkstoff ist frei von Metallionen, die zu schädlichen Nebenwirkungen führen können.