

Kurzfassung

Glasfaserverstärktes Sheet Molding Compound (G-SMC) wird seit mehreren Jahrzehnten vorrangig in der Automobilindustrie zur Herstellung von Außenhaut- und Verkleidungsbauteilen verwendet. Es handelt sich dabei hauptsächlich um ebene und großflächige Bauteile mit niedrigen oder semi-strukturellen Anforderungen. Aufgrund der hohen Designfreiheit von Bauteilen dieser Werkstoffklasse wird seit einigen Jahren versucht diese durch die Steigerung der mechanischen Kennwerte als strukturelle Komponenten zu befähigen und in Fahrzeugstrukturen zu integrieren. Die beiden wichtigsten Stellgrößen sind hierbei die Verwendung von Kohlenstofffasern (C-Fasern) zusammen mit einem hohen Faservolumengehalt (über 40 Vol-%). Mit dem Einsatz teurer C-Fasern und dem Wunsch nach effizientem Materialeinsatz steigt der Bedarf nach Simulationswerkzeugen, um die Formfüllung bzw. Bauteilherstellung zu beschreiben. Für G-SMC wurden bisher 2D-Prozesssimulationen entwickelt und validiert. Trotz allem ist der Einsatz in der industriellen Praxis bisher kaum verbreitet. Insbesondere lassen sie sich auf den Einsatz von Kohlenstofffaserverstärkten Sheet Molding Compounds (C-SMC) nicht anwenden, da hierbei komplexe, teilweise verrippte 3D-Bauteile vorliegen. Um die Material- und Produktkosten bei C-SMC zu senken, werden mittlerweile auch rezyklierte Halbzeuge angeboten und industriell eingesetzt. Diese Halbzeuge weisen in ihrem Umform- und Fließverhalten deutliche Unterschiede zu Neufasermaterialien auf.

Hier setzt die vorliegende Arbeit an. Sie leistet einen Beitrag zur Charakterisierung und phänomenologischen Beschreibung von C-SMC mit neuen und rezyklierten C-Fasern. Dabei stehen Methoden zur Erzeugung von Eingangs- und Validierungsdaten für die 3D-Prozesssimulation im Vordergrund. Zur Bestimmung der Faserorientierungen als wichtigste Kenngröße wird das Wirbelstromverfahren in Transmission verwendet. Dabei wird erstmalig eine Methode zur Messung von komplexeren 3D-Bauteilen gezeigt und eine Übertragung auf Finite-Elemente-Netze (FE-Netze) entwickelt.

Auf Basis der Materialcharakterisierung wird eine durchgängige, virtuelle 3D-Prozesskette (VPK) für den Pressvorgang bereitgestellt. Für die 3D-Simulation des Pressvorgangs wird der gekoppelte Euler-Lagrange-Ansatz (CEL) verwendet. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal gegenüber der bisherigen Modellierung von G-SMC ist der Festkörpermechanische Betrachtungsansatz des C-SMC beim Pressen. Insbesondere für rezykliertes C-SMC mit einer Wirrfaserstruktur und starken Kompaktierung kommen die bisher verwendeten fluidmechanischen Ansätze an die Grenzen ihrer Gültigkeit. Für die Simulation der Bauteilabkühlung nach dem Pressvorgang wird eine linear-elastische, orthotrope 3D-Verzugssimulation entwickelt.

Für die Verknüpfung der Presssimulation mit der anschließenden Verzugssimulation wird eine modulare Schnittstellenlösung bereitgestellt. Ein Fokus der Entwicklung ist die industrielle Einsetzbarkeit der VPK, weshalb Werkzeuge und Methoden bereitgestellt werden, um komplexere Modelle zu erstellen und diese zu verknüpfen. Die Anwendbarkeit und Prognosegüte der entwickelten VPK wird abschließend an einem Vorserienbauteil einer PKW-Stütze C-Säule ausführlich untersucht.

Abstract

For several decades glass fiber sheet molding compound (G-SMC) has been primarily used in the automotive industry for the manufacture of outer skin and panel components. Such parts are mainly large and flat with low or semi-structural requirements. Due to the high freedom of design for components made from this material class, there is an effort to increase their mechanical properties. The current goal is to qualify these type of components as structural components and integrate them into car body structures. The two most important parameters are the usage of carbon fibers (C-fibers) together with a high fiber volume content (over 40 Vol-%). With the application of expensive C-fibers and the desire of efficient material usage, there is a growing demand for simulation tools, which can describe mold filling behavior and respectively overall component production. Although for G-SMC there are 2D process simulation tools already developed and validated, their usage within an industrial environment is still rare. In particular, they cannot be utilized when dealing with carbon fiber sheet molding compounds (C-SMC), due to the high fiber volume fraction and desired part complexity (e.g. partially ribbed 3D components). In order to reduce material- and production costs of C-SMC, semi-finished, recycled materials are available and have already been used in an industrial environment. These materials show significant differences in their forming and flow behavior compared to materials with new fibers.

The present work is a scientific contribution to the material characterization and phenomenological description of C-SMC with both new and recycled C-fibers. The focus is to generate input- and validation data for a complete 3D process simulation. For the determination of the fiber orientation, as one of the most important material parameters, the eddy current measurement technique in transmission has been used. For the first time, a method for the fiber orientation measurement of complex 3D parts will be presented and the transmission of this information to finite element meshes (FE-meshes) will be developed.

Based on the material characterization, a consistent virtual 3D process chain (VPC) is created for the forming of C-SMC parts. For the 3D press simulation the Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) approach is used. An important and distinguishing feature compared to the modelling of G-SMC is that a solid mechanics approach has been used to describe the material forming behavior. For recycled C-SMC with its random woven like structure and strong compaction behavior, there is a limit of validity reached when using the fluid mechanics approach. For the simulation of the cooling behavior of the component after it is removed from the tool, a linear-elastic, orthotropic 3D warpage simulation has been developed.

For linking the filling simulation with the following warpage simulation, a modular interface solution is provided. A strong focus of the development, is the industrial usage of the VPC. This is why the tools and methods are both provided to help create and link complex models at different stages of the VPC. The applicability and validity of the developed VPC is examined in depth at the end by using a pre-series version of an automotive chassis c-pillar part.