Das Kunststoff-Zentrum
Prüfung · Bildung · Forschung · Zertifizierung · Vernetzung

Simulation des Formfüllverhaltens von duroplastischen Formmassen

Kooperationspartner

Kunststofftechnik Chemnitz

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ

Nils Schmeißer, Thomas Zentgraf, Michael Gehde, Georg Schwalme,
Thomas Hochrein, Martin Bastian

Bildung & Forschung

www.skz.de

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Herausgeber)

Simulation des Formfüllverhaltens von duroplastischen Formmassen

1. Auflage

SKZ – Forschung und Entwicklung

SKZ – Das Kunststoff-Zentrum (Hrsg.)

Simulation des Formfüllverhaltens von duroplastischen Formmassen

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Die Autoren:

M. Sc. Nils Schmeißer
Dipl.-Ing. Thomas Zentgraf
Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde
Dipl.-Ing. Georg Schwalme
Dr. rer. nat. Thomas Hochrein
Prof. Dr.-Ing. Martin Bastian

Copyright Shaker Verlag 2021
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8290-6
ISSN 2364-754X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Das Vorhaben 19969 BG der Forschungsvereinigung Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e.V. (FSKZ) wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das Institut für Fördertechnik und Kunststoffe der Technischen Universität Chemnitz sowie die SKZ – KFE gGmbH danken dem BMWi und der AiF für die Förderung sowie der Forschungsvereinigung für die Unterstützung bei der Durchführung des Vorhabens.

Darüber hinaus danken die Forschungsstellen den Mitgliedern des projektbegleitenden Ausschusses für ihre Unterstützung bei der Bearbeitung des Projektes und für die konstruktiven Diskussionen bei den unterschiedlichsten Fragestellungen.

Kurzfassung

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Generierung von detaillierten Materialdaten zur verbesserten Charakterisierung des Werkstoffverhaltens duroplastischer Formmassen sowie die Optimierung der Vorhersagequalität der Formfüllsimulation durch Variation der Simulationsparameter. Die Verifizierung erfolgte dabei durch den Abgleich der Simulation mit realen Füllstudien unter Variation der Prozessparameter und anschließenden Faserverteilungs- und Faserlängenanalysen. Als Untersuchungsmaterialien dienten drei epoxidharzbasierte sowie zwei phenolharzbasierte Spritzgussformmassen. Die geplanten Versuchsreihen wurden an einem Probekörperwerkzeug (Fließspirale) sowie, zur Abbildung komplexer Formfüllvorgänge, an einem industrienahen Bauteil (Zündspule) durchgeführt. Umfangreiche Werkstoffcharakterisierungen bildeten die Grundlage zur Erstellung der Materialkarten aller Untersuchungsmaterialien. Auf Basis dieser Materialkarten erfolgten Füllsimulationen zur Definition der bestimmenden Parameter, die die Simulationsergebnisse maßgeblich beeinflussen. Diese wurden daraufhin gezielt variiert und deren Einfluss auf die Vorhersagequalität der Formfüllsimulation ermittelt.

Basierend auf den gewonnenen Ergebnissen konnten Handlungsempfehlungen für die Kennwertermittlung und Simulation des Spritzgussprozesses duroplastischer Formmassen erstellt werden. Die im Forschungsvorhaben erzielten Ergebnisse vertiefen somit das Wissen über das Materialverhalten duroplastischer Formmassen im Spritzgießverfahren und den daraus resultierenden Eigenschaften. Durch eine verbesserte Vorhersagequalität der Simulationsergebnisse können Fehler in der Entwicklung von Bauteilen aus duroplastischen Werkstoffen reduziert und Entwicklungszeiten verkürzt werden.

Abstract

The aim of the research project was the generation of detailed material data for the improved characterization of the material behavior of thermoset molding compounds as well as the optimization of the prediction quality of the mold filling simulation by varying the simulation parameters. The verification was carried out by comparing the simulation with real filling studies including the variation of the process conditions and subsequent fiber orientation and fiber length analyzes. Three epoxy resin-based and two phenolic resin-based injection molding compounds were used for the investigations. The planned tests series were carried out on a test specimen mold (flow spiral) and, to illustrate complex mold filling processes, on an industry-oriented part (connector module). Comprehensive material characterizations formed the basis for creation of material data files for all investigated materials. Based on these material data files, filling simulations were carried out to define the determining parameters that significantly influence the simulation results. These parameters were varied systematically to determine their influence on the prediction quality of the mold filling simulation.

Based on the results obtained, recommendations for the determination of the material data sets and the injection molding simulation process of thermoset molding compounds could be derived. The results obtained in the research project thus increase the knowledge about the material behavior of thermoset molding compounds in the injection molding process and the resulting properties. An improved prediction quality of the simulation results can reduce failures in the development of parts made of thermoset materials and shorten development times.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 12

1.1 Anlass für Forschungsvorhaben ... 12

1.2 Problemstellung ... 12

1.3 Zielsetzung ... 12

2 Stand der Technik ... 14

2.1 Spritzgießverarbeitung von Duroplasten ... 14

2.2 Fließverhalten duroplastischer Formmassen ... 14

2.3 Simulation des Spritzgießprozesses duroplastischer Formmassen ... 16

2.4 Materialmodelle zur Abbildung des Werkstoffverhaltens ... 17

2.5 Materialdatenermittlung für die Simulation ... 18

3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels ... 20

4 Durchgeführte Arbeiten ... 22

4.1 Definition und Auswahl geeigneter Versuchsmaterialien ... 22

4.2 Definition der Versuchsparameter zur Bestimmung der benötigten Materialkennwerte ... 22

4.3 Wissenschaftliche Datenermittlung ... 23

4.3.1 Datenermittlung zur Erstellung von Materialkarten ... 23

4.3.2 Ergänzende Messverfahren ... 30

4.4 Spritzgussversuche ... 31

4.4.1 Fließspirale ... 32

4.4.2 Zündspule ... 33

4.5 Bewertung der aktuell eingesetzten Materialmodelle zur rheologischen Simulation ... 35

4.5.1 Materialmodelle für die Viskosität ... 35

4.5.2 Modelle für die Reaktionskinetik ... 38

4.5.3 Modelle für PVT-Daten ... 39

4.6 Rheologische Simulation des Spritzgießprozesses ... 40

4.6.1 Modellaufbereitung für die Simulation ... 40

4.6.2 Prozesseinstellungen in der Simulation ... 45

4.6.3 Einstellung der Berechnungsparameter in der Simulation ... 45

4.7 Morphologische Untersuchungen der Faserverteilung ... 47

4.7.1 Bestimmung der Faserorientierung im Bauteil ... 47

4.7.2 Bestimmung der Faserlängenverteilung ... 48

4.8 Digitalisierung der Füllstudien 50

5 Diskussion der Ergebnisse 53

5.1 Wissenschaftliche Datenermittlung 53

5.1.1 Epoxidharze 53

5.1.2 Phenolharze 61

5.2 Erstellung Materialkarten 65

5.3 Simulation Fließspirale 66

5.3.1 Simulation des Füllverhaltens der Fließspirale 66

5.3.2 Vergleich der Druckverläufe mit der Simulation 73

5.3.3 Faserorientierung in der Fließspirale 78

5.3.4 Parametervariation 85

5.3.5 Zusammenfassung der Simulation der Fließspirale 93

5.4 Simulation des Vorspritzlings 94

5.4.1 Simulation des Füllverhaltens des Vorspritzlings 95

5.4.2 Ermittlung der Faserorientierung im Vorspritzling 97

5.4.3 Parametervariation beim Vorspritzling 99

5.5 Simulation des Steckers 100

5.5.1 Simulation des Füllverhaltens des Steckers 101

5.5.2 Temperatur und Vernetzungsgrad des Steckers 105

5.5.3 Ermittlung der Faserorientierung im Stecker 106

5.5.4 Parametervariation bei der Simulation der Zündspule 108

5.6 Faserlängenanalyse 118

5.6.1 Faserlängenverteilung in der Fließspirale 118

5.6.2 Faserlängenverteilung in der Zündspule 120

6 Zusammenfassung 122

6.1 Wissenschaftliche Datenermittlung 122

6.2 Simulation des Spritzgießprozesses 123

6.3 Ausblick 126

7 Literaturverzeichnis 127

8 Abbildungsverzeichnis 132

Abkürzungsverzeichnis

C_i	Coefficient of Interaction = Faser-Interaktionskoeffizient
CT	Computertomographie
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EP	Epoxidharz
HTC	Heat-Transfer-Coefficient
iARD	Improved anisotropic rotary diffusion
KMU	Klein- und mittelständische Unternehmen
PF	Phenolharz
PVT	Pressure-Volume-Temperature
RPR	Retard Principal Rate = Faser-Matrix-Interaktionskoeffizient
Step	Standard for the Exchange of Product model data
STL	Stereolithografie
TGA	Thermogravimetrische Analyse
WLF	Williams-Landel-Ferry