

Entwicklung eines Oberflächenkonzepts für Aluminiumdruckgussformen mittels Verschleißschutzschichten zur Reduzierung von Trennmittelauftrag und Sprühkühlung auf ein Nullniveau

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

Vorgelegt im Fachbereich Maschinenbau
der Universität Kassel

Von Dipl.-Ing. Marc Adam

Kassel, Februar 2016

Fortschrittsberichte aus der Produktionstechnik

Herausgegeben von:
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm
Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier
Universität Kassel

Band 7

Marc Adam

**Entwicklung eines Oberflächenkonzepts für
Aluminiumdruckgussformen mittels Verschleiß-
schuttschichten zur Reduzierung von Trennmittel-
auftrag und Sprühkühlung auf ein Nullniveau**

D 34 (Diss. Univ. Kassel)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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.

Zugl.: Kassel, Univ., Diss., 2016

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Martin Fehlbier, Universität Kassel
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Berthold Scholtes, Universität Kassel
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Hans-Peter Heim, Universität Kassel
	Prof. Dr.-Ing. Jens Hesselbach, Universität Kassel

Tag der mündlichen Prüfung: 10. Mai 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4586-4

ISSN 2195-5670

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei Herrn Prof. Fehlbier bedanken, der die Erstellung dieser Arbeit überhaupt ermöglicht hat. Herrn Prof. Scholtes für die Tätigkeit als zweiter Gutachter sowie den Herrn Professoren Heim und Hesselbach für die Tätigkeit als Prüfer.

Des Weiteren möchte ich Herrn Dr. Andreas Gebauer-Teichmann danken! Mit ihm war es möglich jederzeit über die Inhalte der Arbeit zu diskutieren. Ebenfalls bedanke ich mich für die von ihm erhaltenden fachlichen und überfachlichen Ratschläge.

Mein Dank geht an die Kollegen der Volkswagen Gießereientwicklung Kassel sowie den Kollegen des Fachgebiets Gießertechnik der Universität Kassel für die nette Zusammenarbeit.

Ich bedanke mich bei Tim Kropf, Nils Brücker und Hendrik Schmitz für die Unterstützung bei der Realisierung der Prüfstände sowie der Versuchsdurchführung.

Abstract

For the automotive industry, the ongoing development of lightweight construction is an essential component when it comes to designing the car of the future. The primary aim is to reduce fuel consumption in addition to increasing the agility of the vehicle. As a manufacturing process, aluminium die casting provides an effective method of reducing the weight of powertrains and body components. The productivity of the casting process is crucial to ensuring the economic viability of the manufacturing process for these lightweight products. The surface condition of the die-casting mould plays a decisive role in this respect. The mould is damaged by thermal, chemical and mechanical loads generated during the process.

The application of cooling and separating agents to the hot mould surface causes massive damage. The resulting tensile stresses in near-surface areas causes thermomechanical fatigue cracks. The application of these substances is required in the current process in order to regulate the temperature balance and prevent adherence of the aluminium alloys. This results in the formation of extensive networks of thermomechanical fatigue cracks. It therefore makes sense to refrain from applying these damaging cooling and separating agents and to use other mechanisms to achieve the cooling and separating effect.

The aim of this project is to develop a die-casting process that does not use cooling and separating agents. The idea is to achieve the required separation effect between aluminium alloy and die-casting mould by replacing the separating agent with hard material coatings. These coatings are applied to the moulded parts using the PVD or PACVD process. A load-based coating selection system will be developed in order to clarify the central issue of which of the available coatings are particularly suited to the aluminium casting process. To begin with, the primary damage mechanisms of the process will be analysed. Based on the results of the analysis, abstraction will then be applied to develop test rigs that simulate the stresses of aluminium casting process. A weighted evaluation matrix will be developed to calculate optimal coatings for the aluminium casting process. In the final phase, synthesis, the findings relating to the resistances of the coatings will be applied to the different areas of the die-casting mould.

The removal of the coolant application results in reduced external cooling of the die-casting mould. This must be replaced by an increase in performance in relation to internal mould cooling. Design methods will be applied to enable production of a large, near-surface heat sink in the die-casting mould. The increased performance of the internal mould cooling must ensure that a quasi-stationary heat balance can be achieved in the mould without applying coolant.

The process of die-casting without a separating agent will then be tested in a pilot experiment involving the surface design using hard material coating and enhanced internal mould cooling. The project will also include an economic analysis of the use of hard material coating in series production and a final review.

Inhaltsverzeichnis

0	Kurzfassung	7
0.1	Einleitung und Motivation	7
0.2	Entwicklung einer Schichtauswahlssystematik	7
0.3	Optimierung der internen Formkühlung	15
0.4	Trennmittelfreies Druckgießen	15
0.5	Ausblick	16
1	Einleitung und Motivation	17
1.1	Ausgangssituation	17
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	18
2	Grundlagen und Stand der Technik	21
2.1	Der Aluminiumdruckgussprozess	21
2.1.1	Prozessablauf	21
2.2	Einflüsse auf die Druckgussform über den Einsatzzyklus	23
2.2.1	Werkstoff für Druckgussformen	23
2.2.2	Einflüsse auf die Druckgussform im Gießprozess	23
2.2.3	Tribologische und mechanische Beanspruchungen	24
2.2.4	Chemisch-physikalische Beanspruchung	26
2.2.5	Thermisch-mechanische Wechselbeanspruchung	28
2.3	Einflüsse des Auftrags von wassermischbaren Trennmitteln auf den Prozess	31
2.3.1	Anforderungen an das Trennmittel im konventionellen Druckgussprozess	31
2.3.2	Thermisch-mechanische Auswirkung des Trennmittelauftrags	32
2.3.3	Einflüsse auf die Peripherie der Gießzelle	33
2.4	Verfahren zur Oberflächenbehandlung von Druckgussformen	34
2.4.1	Kugelstrahlen von Warmarbeitsstahl	35
2.4.2	Laserbehandlung von Warmarbeitsstahl	36
2.4.3	Nitrieren von Warmarbeitsstahl	37
2.5	Struktur und Eigenschaften der aus der Gasphase kondensierten Hartstoffsichten	38
2.5.1	Anforderungen des Al-Druckgussprozesses an Hartstoffbeschichtungen	38
2.5.2	Verfahren zum Auftrag von dünnen Hartstoffsichten aus der Gasphase	39
2.5.3	Arten und Eigenschaften des Substrat/Beschichtungs-Interfaces	42
2.5.4	Grundlagen der Keim- und Schichtbildung von dünnen Schichten	43
2.5.5	Substrat/Schicht-Verbindungen in der Interfacezone	45
2.5.6	Strukturzonenmodelle von PVD-Kondensaten	47
2.5.7	Anwendung von Hartstoffbeschichtungen im Druckguss	49

3	Systematische Hartstoffschichtauswahl für den Al-Druckguss	53
3.1	Zielsetzung	53
3.2	Schadensanalyse an einer Druckgussform	56
3.2.1	Thermomechanische Werkzeugschädigung	56
3.2.2	Werkzeugschädigung durch Legierungsanhaftungen	58
3.2.3	Lokal angepasstes Formkonzept	61
3.3	Auswahl des Grundwerkstoffes (Substrat)	62
3.4	Entwicklung einer Schichtauswahlssystematik für Hartstoffbeschichtungen	63
3.5	Überprüfung und Vorbewertung der Schichtsysteme	68
3.6	Schichtvorauswahl	70
3.6.1	Beurteilung der Schichteignung durch Eigenschaftsanalyse	70
3.7	Zusammenfassung der Schichtsystemüberprüfung	75
3.7.1	Ergebnisse Schichthaftung (Rockwell-Eindrucktest)	75
3.7.2	Ergebnisse Schichthärte (Nanoindenter)	78
3.7.3	Ergebnisse Abrasivverschleiß (Kalottenschliff)	80
3.7.4	Ergebnisse Haftneigung Schicht-Aluminium (Hochtemperaturtribometertest)	85
3.7.5	Ergebnisse Haftneigung Schicht-Aluminium (Benetzungswinkel)	88
3.7.6	Ergebnisse chemische Stabilität	90
3.7.7	Entwicklung einer Bewertungsmatrix	93
3.7.8	Ergebnisse der Schichtsystemsichtung	95
4	Anwendungsnahe Schichterprobung	99
4.1	Medienbeständigkeit im Kontakt mit AISi9Cu3(Fe)	99
4.1.1	Versuchsaufbau und Durchführung	99
4.1.2	Analyse	100
4.1.3	Ergebnisse (X38CrMoV5-1)	101
4.1.4	Ergebnisse (X32CrMoV0,1-3)	102
4.1.5	Auswertung	104
4.1.6	Schädigungskoeffizient gegenüber Al-Schmelze	109
4.2	Entwicklung und Durchführung eines Entformungstests	111
4.2.1	Versuchsaufbau und Durchführung	111
4.2.2	Analyse	112
4.2.3	Ergebnisse	113
4.2.4	Auswertung	114
4.2.5	Einfluss des Substrats	115
4.3	Durchführung thermomechanische Dauerschwingversuche	122
4.3.1	Versuchsaufbau und Durchführung	122
4.3.2	Analyse	123
4.3.3	Ergebnisse	123
4.3.4	Auswertung	127
4.4	Durchführung von Thermoschocktests	131
4.4.1	Versuchsaufbau und Durchführung	131
4.4.2	Analyse	132
4.4.3	Ergebnisse	133
4.4.4	Auswertung	136

4.5	Entwicklung und Durchführung eines Schmelze-Trennmitteltests	143
4.5.1	Versuchsaufbau und Durchführung.....	143
4.5.2	Analyse	145
4.5.3	Auswertung	148
5	Abschließende Betrachtung der Schichtauswahlssystematik.....	157
5.1	Zusammenfassende Betrachtung der anwendungsnahen Schichterprobung.....	157
5.2	Empfehlung der Hartstoffbeschichtung durch die Schichtauswahlssystematik.....	159
6	Entwicklung und Erprobung des „trennmittelfreien Druckgießens“	161
6.1	Optimierung der internen Formkühlung.....	162
6.2	Trennmittelfreies Druckgießen im Realprozess.....	164
6.2.1	Analyse	166
6.2.2	Ergebnisse	167
6.2.3	Auswertung	172
7	Einsatz von Hartstoffbeschichtungen in der Druckgussfertigung	177
7.1	Erprobung in der Al-Druckguss-Serienfertigung.....	177
7.2	Technische Betrachtung	178
7.3	Wirtschaftliche Betrachtung	182
8	Zusammenfassung und Ausblick	185
9	Literaturverzeichnis.....	VI
10	Symbole und Abkürzungen	XVII
11	Anhangsverzeichnis.....	XIX
12	Anhang	XX