

Thermisch gespritzte Heizschichten für das Kunststoffspritzgießen

Andreas Schacht

Januar 2024

Schriftenreihe Oberflächentechnik, Band 77

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. K. Bobzin

Partner im
LABORATORIUM
FÜGETECHNIK
OBERFLÄCHENTECHNIK



Thermisch gespritzte Heizschichten für das Kunststoffspritzgießen

Thermally Sprayed Heating Coatings for Plastic Injection Molding

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

Vorgelegt von

Andreas Schacht

Berichter/in: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Hopmann

Tag der mündlichen Prüfung: 14.11.2023

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Schriftenreihe Oberflächentechnik

Band 77

Andreas Schacht

**Thermisch gespritzte Heizschichten
für das Kunststoffspritzgießen**

Shaker Verlag
Düren 2024

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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2023)

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9361-2

ISSN 1864-0796

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

An dieser Stelle möchte ich Frau Prof. Kirsten Bobzin für das interessante Thema der Dissertation herzlich danken. Mein Dank gilt ebenso ihrer Unterstützung und Betreuung während des gesamten Prozesses. Herrn Prof. Christian Hopmann gebührt mein Dank für die Annahme des Zweitgutachtens, während ich Herrn Prof. Uwe Reisgen für den Vorsitz der Promotionskommission dankbar bin.

Meine Dissertation habe ich während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Oberflächentechnik (IOT) der RWTH Aachen University angefertigt. Sie basiert auf dem Teilprojekt A12 des öffentlich geförderten Sonderforschungsbereichs SFB 1120 „Präzision aus Schmelze“ (Deutsche Forschungsgemeinschaft – Projektnummer 236616214). Für die finanzielle Unterstützung des Projekts danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Bei Dr. Tobias Hohlweck und Daniel Fritsche möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit im Projekt bedanken.

Mein herzlicher Dank gilt außerdem allen Mitarbeitern des IOT, die mich bei meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter unterstützt haben. Besonderer Dank gilt Dr. Martin Andreas Knoch, Dr. Ali Dokhanchi, Dr. Marvin Schulz, Dr. Johannes Reim und Anna Schacht für die wertvollen Hinweise bei der Finalisierung der Dissertation. Bei Lukas Martin Johann, Kevin Jasutyn, Carsten Vogels, Dieter Koch, Elisa Olesch, Marvin Erck und Dr. Hendrik Heinemann bedanke ich mich darüber hinaus für die ausgiebigen fachlichen und nicht fachlichen Diskussionen. Gemeinsam schafften wir eine kollegiale und freundschaftliche Atmosphäre, die ich sehr zu schätzen weiß.

Bei meinen Freunden und meiner Familie bedanke ich mich von ganzem Herzen für die Unterstützung, das stetige Interesse und das entgegengebrachte Verständnis während meines Studiums und meiner Promotion. Ein großer Dank gebührt meiner Frau, Moe Schacht, für das wunderbare Zusammenleben und das viele Verständnis und Geduld in den letzten Jahren.

Zusammenfassung

Das Kunststoffspritzgießen ist das wichtigste Verfahren in der Kunststoffverarbeitung und ist geprägt von kurzen Zykluszeiten und einer hohen Wirtschaftlichkeit. Die Produktivität des Verfahrens wird insbesondere über kalt temperierte Formwerkzeuge für eine rasche Erstarrung der eingespritzten Formmasse erreicht. Ein zu hoher Temperaturgradient kann jedoch zu einer frühzeitigen Erstarrung der Formmasse und damit zur verminderten Formteilqualität führen. Durch variotherme Temperierung des Werkzeugs wird diesem Effekt entgegengewirkt. Während interne Systeme jederzeit steuerbar sind, sind diese aufgrund der thermischen Masse des Werkzeugs träge. Mit externen Systemen lässt sich eine höhere Dynamik erreichen, da lediglich die Werkzeugoberfläche erhitzt wird, jedoch kann dies lediglich im geöffneten Werkzeug stattfinden. Durch die Applikation eines wenige hundert Mikrometer dicken Heizelements direkt auf der Werkzeugoberfläche kann die Wärme genau dort eingebracht werden, wo und wann sie benötigt wird.

Ein solches Heizelement wurde mit dem Atmosphärischen Plasmaspritzen (APS), einer Verfahrensvariante des Thermischen Spritzens, entwickelt. Das Schichtsystem besteht aus einer $\text{TiO}_x/\text{Cr}_2\text{O}_3$ -Heizschicht, die von zwei Al_2O_3 -Isolationsschichten umschlossen ist. Die Entwicklung erfolgte in drei unterschiedlichen Technologie-Reifegraden. In der ersten Stufe wurde der Zusammenhang zwischen den APS-Prozessparametern und der Durchschlagfestigkeit der Isolationsschichten sowie des spezifischen Widerstands der Heizschicht mit Hilfe einer statistischen Versuchsplanung identifiziert und quantifiziert. Dabei zeigte die Durchschlagfestigkeit eine gewisse Unabhängigkeit von den Prozessparametern, wohingegen der spezifische Widerstand signifikant von der Stromstärke, dem H_2 -Sekundärgasfluss sowie dem Spritzabstand bestimmt wird. Für die zweite Stufe wurde ein Prüfstand zur Nachbildung der thermischen Beanspruchung des Kunststoffspritzgießens entwickelt. Darin wurden die Heizschichtsysteme mit Thermozyklen beaufschlagt. Mit dem Heizschichtsystem wurden hochdynamische Temperaturwechsel auf der Oberfläche realisiert und über 20.000 Thermozyklen ohne Beschädigung durchfahren. Um die Heizschicht innerhalb eines geschlossenen Werkzeugs ansteuern zu können, wurde eine Kontaktierung entwickelt, die eine rückseitige Energieeinspeisung ermöglicht. Damit wurden in der dritten Stufe Heizschichtsysteme auf Werkzeugeinsätzen appliziert und im Kunststoffspritzgießen erprobt. Abschließende Untersuchungen der hergestellten Formteile zeigten die positive Einflussnahme auf den Verzug und die Schwindung.

Abstract

Plastic injection molding is the most important process in plastics processing and is characterized by short cycle times and high cost-effectiveness. The productivity of the process is achieved in particular by cold-temperature molds for rapid solidification of the injected polymer melt. However, an excessively high temperature gradient can lead to premature solidification of the polymer melt and thus to reduced part quality. This effect is counteracted by variothermal temperature control of the mold. While internal systems can be controlled at any time, they are slow due to the thermal mass of the mold. External systems can achieve a higher level of dynamics by heating only the mold surface, but this requires the mold to be open. By applying a heating element of a few micrometers thickness directly to the mold surface, the heat can be generated precisely where and when it is necessary.

Such a heating element was developed using atmospheric plasma spraying (APS), a process variation of thermal spraying. The coating system consists of a $\text{TiO}_x/\text{Cr}_2\text{O}_3$ heating coating embedded in two Al_2O_3 insulation coatings. The development was carried out in three different technology readiness levels. In the first stage, the relationship between the APS process parameters and the dielectric strength of the insulation coatings as well as the resistivity of the heating coating was identified and quantified using a design of experiments. Thereby, the dielectric strength showed certain independence from the process parameters, whereas the resistivity is significantly determined by the electric current, the H_2 secondary gas flow as well as the spray distance. For the second stage, a test rig was developed to emulate the thermal stress of plastic injection molding. Thermal cycles were applied to the heating coating systems. The heating coating system was capable of highly dynamic temperature changes on the surface and was subjected to over 20,000 thermal cycles without damage. In order to be able to control the heating coating within a closed mold, a contacting solution was designed which allows a power supply from the back. In the third stage, heating coating systems were applied on mold inserts and tested in plastic injection molding. Final investigations of the molded parts showed the positive influence on warpage and shrinkage.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung und Zielsetzung | 1 |
| 2 | Stand der Technik und Forschung | 4 |
| 2.1 | Temperaturhaushalt beim Kunststoffspritzgießen | 4 |
| 2.1.1 | Variotherme Temperiersysteme | 6 |
| 2.1.2 | Oberflächennahe, elektrische Temperiersysteme | 12 |
| 2.2 | Thermisch gespritzte Heizschichten | 15 |
| 2.2.1 | Thermisches Spritzen | 15 |
| 2.2.2 | Werkstoffe für thermisch gespritzte Heizschichten | 19 |
| 2.3 | Fazit zum Stand der Technik und Forschungsziel | 35 |
| 3 | Lösungsweg | 38 |
| 4 | Prozesstechnischer Einfluss auf die eingesetzten Spritzzusatzwerkstoffe | 40 |
| 4.1 | Experimentelle Vorgehensweise | 40 |
| 4.1.1 | Statistische Versuchsplanung | 40 |
| 4.1.2 | Messung der Durchschlagfestigkeit | 43 |
| 4.1.3 | Messung des spezifischen elektrischen Widerstands | 44 |
| 4.1.4 | Schichtdickenmessung | 46 |
| 4.1.5 | Partikeltemperatur | 47 |
| 4.1.6 | Röntgendiffraktometrie | 47 |
| 4.1.7 | Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands | 47 |
| 4.2 | Durchschlagfestigkeit der Al ₂ O ₃ -Isolationsschicht | 48 |
| 4.3 | Spezifischer elektrischer Widerstand der TiO _x /Cr ₂ O ₃ -Heizschicht | 51 |
| 4.3.1 | Regressionsmodell | 51 |
| 4.3.2 | Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands | 61 |
| 4.4 | Fazit zum prozesstechnischen Einfluss auf die eingesetzten Spritzzusatzwerkstoffe | 63 |
| 5 | Modelluntersuchungen beschichteter Probekörper | 66 |
| 5.1 | Aufbau und Funktion des Thermozyklusprüfstands | 66 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.2 | Thermozyklusversuche im Modellprüfstand | 71 |
| 5.2.1 | Herstellung der Proben | 71 |
| 5.2.2 | Ergebnisse der Thermozyklusversuche | 74 |
| 5.3 | Fazit zu den Modelluntersuchungen beschichteter Probekörper | 90 |
| 6 | Integration in das Kunststoffspritzgießen | 92 |
| 6.1 | Formwerkzeug mit passivem Schichtsystem | 92 |
| 6.1.1 | Durchführung der Praxisversuche mit passivem Schichtsystem | 93 |
| 6.1.2 | Beanspruchung des passiven Schichtsystems | 95 |
| 6.1.3 | Oberflächenbeschaffenheit der Formteile | 97 |
| 6.2 | Formwerkzeug mit aktivem Schichtsystem | 99 |
| 6.2.1 | Durchführung der Praxisversuche mit aktivem Schichtsystem | 101 |
| 6.2.2 | Beanspruchung des aktiven Schichtsystems | 105 |
| 6.2.3 | Untersuchung der Formteile | 111 |
| 6.3 | Fazit zur Integration in das Kunststoffspritzgießen | 114 |
| 7 | Zusammenfassung und Ausblick | 116 |
| 8 | Literatur | 119 |
| 9 | Verzeichnisse | 130 |
| 9.1 | Abbildungsverzeichnis | 130 |
| 9.2 | Tabellenverzeichnis | 135 |
| 9.3 | Abkürzungsverzeichnis | 136 |
| 9.4 | Formelzeichen | 137 |