

Teilprojekt A12

Titel

Experimentelle Analyse thermomechanischer Eigenschaften thermisch gespritzter Beschichtungen

Projektleitung/-bearbeitung

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

Projektbearbeitung: A. Schacht, M.Sc.

Institut für Oberflächentechnik (IOT)

Aufgabenstellung

- Bestimmung der signifikantesten Prozessparameter bei der Herstellung keramischer Heizschichten
- Entwicklung eines hybriden Fertigungsverfahrens zur präzisen Herstellung von Sensorbeschichtungen
- Analyse der Beständigkeit des entwickelten Schichtsystems in realen Spritzgießprozessen
- Untersuchung der Oberflächenabformung beschichteter Gießwerkzeuge auf Kunststoffbauteile

Vorgehensweise

Bei dem entwickelten Heizschichtsystem basierend auf dem keramischen Halbleiter $\text{TiO}_x/\text{Cr}_2\text{O}_3$ ist der spezifische elektrische Widerstand eine entscheidende Größe bezüglich der Heizfunktion. Diese Größe hängt einerseits von der Unterstöchiometrie des TiO_x und andererseits von der Mikrostruktur der thermisch gespritzten Beschichtung ab. Die drei Prozessparameter Stromstärke, H_2 -Gasfluss und Spritzabstand des atmosphärischen Plasmaspritzens wurden in einem statistischen Versuchsplan systematisch variiert, um deren Einfluss auf den spezifischen Widerstand der Beschichtung zu bestimmen.

Über den temperaturabhängigen, elektrischen Widerstand der Heizschicht kann diese zur flächigen Temperaturmessung verwendet werden. Zur präzisen Herstellung von Messfeldern

wurde während der Fertigung zwischen dem Thermischen Spritzen am IOT und der Laserablation am LLT alterniert.

Nachdem in den vergangenen Jahren die grundlegende Funktionsfähigkeit und Beständigkeit des entwickelten Schichtsystems in Laborversuchen bestätigt werden konnte, wurde dieses auf einem Werkzeugeinsatz für das Spritzgießen appliziert. Mithilfe dieser Untersuchungen wurden in Kooperation mit dem IKV die Beständigkeit gegenüber realen Spritzgießprozessen sowie die Abformung der beschichteten Oberfläche analysiert. Dabei wurden zwei Nachbehandlungen untersucht, um unterschiedliche Oberflächenstrukturen zu erzeugen.

Ergebnisse

Der statistische Versuchsplan brachte hervor, dass die drei variierten Parameter den spezifischen Widerstand der Heizschicht signifikant beeinflussen. Der H₂-Gasfluss und die Stromstärke weisen einen deutlich stärkeren Einfluss als der Spritzabstand auf. Mit den Erkenntnissen wurde ein Regressionsmodell mit dem Bestimmtheitsmaß $R^2_{adj} = 0,95$ zur Vorhersage des spezifischen Widerstands erstellt:

$$Y = 0,93 - 1,41X_1 - 2,06X_2 + 0,97X_3 + 1,65X_1X_2 - 1,27X_1X_3 - 1,06X_2X_3 + 0,74X_1^2 + 1,18X_2^2 + 0,40X_3^2$$

Y:	Spez. Widerstand	normiert [0,3 Ωmm; 1,6 Ωmm]
X ₁	Stromstärke	normiert [366 A; 534 A]
X ₂	H ₂ -Gasfluss	normiert [2 SLPM; 10 SLPM]
X ₃	Spritzabstand	normiert [95 mm; 145 mm]

Der darauf basierende Konturplot ist in Abbildung 1 abgebildet. Darin ist ersichtlich, dass der spezifische Widerstand in einem relativ weiten Prozessfenster nur geringfügig variiert. Bei Kombinationen mit geringen Stromstärken und gleichzeitig geringem H₂-Gasfluss steigt der spezifische Widerstand deutlich an. Dieser Effekt deutet auf eine höhere Porosität aufgrund eines geringeren Aufschmelzgrades des Spritzzusatzwerkstoffes bei reduziertem Energieeintrag hin.

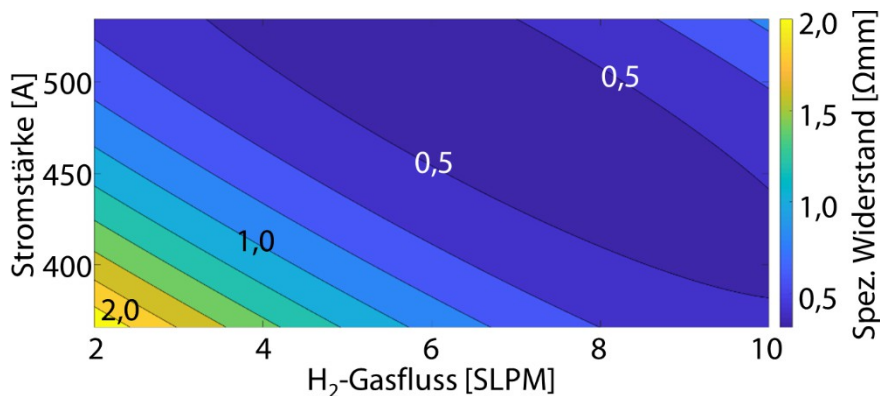


Abbildung 1: Konturplot des spezifischen Widerstands in Abhängigkeit von Stromstärke und H_2 -Gasfluss bei konstantem Spritzabstand von $d = 120 \text{ mm}$

Mittels Laserablation konnten einzelne Lagen im Schichtsystem präzise nachbearbeitet werden, sodass feine Leiterbahnen aus NiCr zur Kontaktierung einzelner Messinseln aus $\text{TiO}_x/\text{Cr}_2\text{O}_3$ hergestellt werden konnten. Funktionsfähige Sensorarrays mit jeweils drei Messinseln wurden erfolgreich hergestellt. Beispielhaft ist in Abbildung 2 ein solches Sensorarray mit $5 \times 5 \text{ mm}^2$ großen Messinseln dargestellt. Über den zwischen den Kontaktstellen gemessenen Widerstand kann die Durchschnittstemperatur der jeweiligen Messinsel bestimmt werden. Der Widerstand der NiCr-Leiterbahnen ist im Vergleich zu dem der Messinseln vernachlässigbar klein.

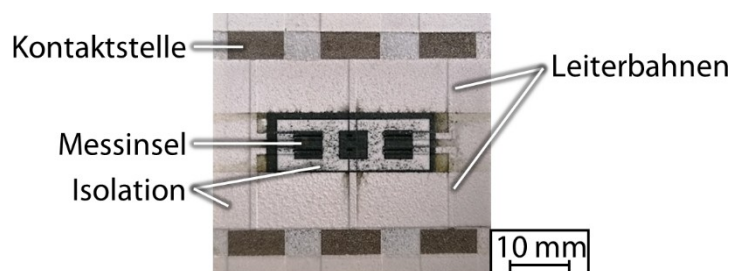


Abbildung 2: Gefertigtes Sensorarray mit drei Messinseln

Bei der Implementierung der Heizschicht in Spritzgießprozesse entstanden anfänglich bereits nach wenigen Zyklen kleine Ausbrüche der Beschichtung am Kavitätsrand des Spritzgießwerkzeugs beim Entformen der Kunststoffbauteile. Daraufhin wurde das bisherige System um eine Haftvermittlerschicht aus NiCr erweitert, siehe Abbildung 3. Dadurch konnte die Haftzugfestigkeit des Verbunds um über

50 % gesteigert werden, wodurch dieser gegenüber der mechanischen Belastung des Spritzgießens beständig wurde.

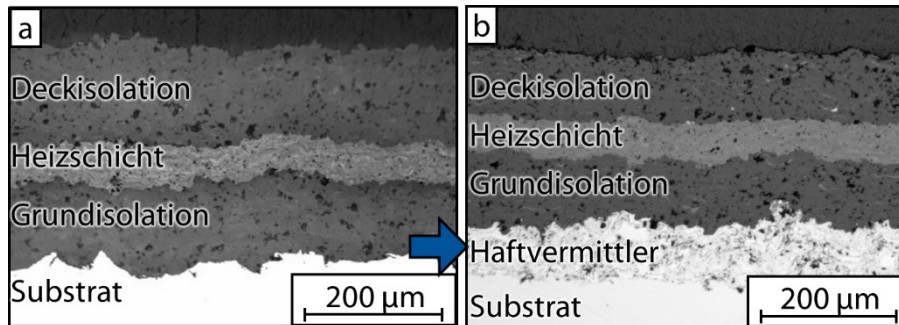


Abbildung 3: Querschliffe des bisherigen Schichtsystems (a) und des neuen Schichtsystems (b)

Die Oberflächenbeschaffenheit der abgeformten Kunststoffbauteile sind in Abbildung 4 gegeben. Mit der Art der mechanischen Oberflächenbehandlung der Beschichtung kann die resultierende Bauteiloberfläche gezielt gesteuert werden. Die genarbten Oberflächen, die mit gebürsteten Werkzeugen hergestellt wurden, sind optisch matt. Diese detailreiche Abformung der Oberfläche entstand ohne einen zusätzlichen Wärmeeintrag durch die Heizschicht.

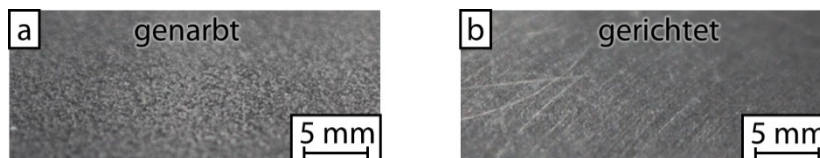


Abbildung 4: Oberflächenbeschaffenheit unterschiedlich behandelter Oberflächen der Spritzgießwerkzeuge (a) gebürstet; (b) geschliffen

Zusammenfassung und Ausblick

Ein Regressionsmodell, das den Einfluss der Prozessparameter Stromstärke, H_2 -Gasfluss und Spritzabstand auf den spezifischen Widerstand der Heizschicht wiedergibt, wurde erfolgreich mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2_{adj} = 0,95$ aufgestellt. Dieses Modell kann zukünftig zur Auslegung des Widerstands der Heizschicht dienen.

Um die geometrische Präzision der funktionalen Beschichtung zu erhöhen wurde ein hybrides Fertigungsverfahren entwickelt. Dabei werden einzelne Lagen des Schichtsystems mittels

Laserablation strukturiert. Geometrien kleiner 1 mm sind fertigbar.

Das Heizschichtsystem bewährte sich nach Ergänzung einer Haftvermittlerschicht gegenüber den Belastungen in realen Spritzgießprozessen. Durch mechanische Nachbearbeitung der thermisch gespritzten Beschichtungen konnten die abgeformten Bauteiloberflächen gezielt verändert werden.

In Zukunft werden Konzepte zur elektrischen Kontaktierung der Heizschicht im Spritzgießwerkzeug entwickelt und getestet. Dabei wird insbesondere auf eine ausreichende elektrische Isolierung des Werkzeugstahls von der Stromführung geachtet. Dadurch wird ein sicherer Betrieb des Spritzgießprozesses gewährleistet.

Veröffentlichungen

K. Bobzin, W. Wietheger, M.A. Knoch, A. Schacht, U. Reisgen, R. Sharma, L. Oster

Comparison of Residual Stress Measurements Conducted by X-ray Stress Analysis and Incremental Hole Drilling Method
Journal of Thermal Spray Technology 29 (2020) 1218-1228
[10.1007/s11666-020-01056-z]

K. Bobzin, W. Wietheger, M.A. Knoch, A. Schacht
Heating Behaviour of Plasma Sprayed TiO_x/Cr_2O_3 Coatings for Injection Moulding
Surface and Coatings Technology 399 (2020) 126199
[10.1016/j.surfcoat.2020.126199]

K. Bobzin, W. Wietheger, H. Heinemann, A. Schacht, Ch. Hopmann, T. Hohlweck, S. Hartmann, F. Trenkle, J. Blum, H. Kummer
Thermisch gespritzte Heizschichtsysteme für den Einsatz im Spritzgießen
DVS Berichte, Band 365 (2020) 717-724 [ISBN 978-3-96144-098-6]

Tagungsband DVS Congress: Große Schweißtechnische Tagung, 14.-18. September 2020, online

SFB 1120

Jahresbericht 2020



RWTHAACHEN
UNIVERSITY

K. Bobzin, W. Wietheger, M.A. Knoch, H. Heinemann, A.
Schacht, A. Gillner, M. Hummel

*Thermally Sprayed Sensor Coatings for Spatially Resolved
Temperature Detection*

Journal of Materials Processing Technology 291 (2021) 117043

[10.1016/j.jmatprotec.2021.117043]