



Arbeitsblatt

Wirtschaftliche Herstellung bzw. Beschichtung von Rohren mit kleinen Durchmessern (kleiner 100 mm) durch Sprühkompaktieren unter Anwendung alternativer Zerstäubungstechniken am Beispiel von Gleitlagerwerkstoffen

AiF-Nr.:
17191 N

Obmann:
Frank Reimer

beteiligte Unternehmen
Mitec Middeldorf GmbH, WKW automotive,

H. C. Starck, Air Products, Megatherm
Elektromaschinenbau GmbH, KKS Krefelder
Konstruktions Service, Heraeus, Dr. Heck
Consulting & Engineering, Indutherm
Erwärmungsanlagen GmbH, Zollern BHW,
ALD

Laufzeit:
01.07.2011 – 28.02.2014

Erstelldatum:
28.08.2014

Forschungsstelle:
Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen

Projektleiter:
Volker Uhlenwinkel

Sachbearbeiter:
Angelika Baierl

Forschungsvereinigung:
AWT

Projektbegleitender Fachausschuss
FA 22 (Sprühkompaktieren)

Zielsetzung und Lösungsweg

Im Rahmen des Vorhabens sollen Rohre mit Innendurchmessern kleiner 100 mm unter Anwendung von alternativen Zerstäubungstechniken durch Sprühkompaktieren hergestellt bzw. beschichtet werden, um damit die Wirtschaftlichkeit des Prozesses entscheidend zu verbessern. Dabei soll eine anwendungsorientierte Legierung verwendet werden, die gießtechnisch nicht mehr erfolgreich herstellbar ist.

Es wird von der Hypothese ausgegangen, dass sich der Overspray-Anteil mit alternativen Zerstäubungstechniken deutlich verringern lässt und die Ausbringung und damit die Wirtschaftlichkeit dadurch massiv zu steigern ist. Der geometrische Overspray-Anteil beim Sprühkompaktieren auf Substratrohre mit einem Durchmesser von beispielsweise 50 mm beträgt für einen Freifallzerstäuber über 30 % (s. Bild 1). Konkret wird das wirtschaftliche Ziel verfolgt, diesen Anteil auf unter 5 % zu verringern.

Um den Gesamtprozess besser zu verstehen, ist eine Messung der erzeugten Partikelgrößen notwendig. Neben den wirtschaftlich relevanten Größen ist aber auch die Produktqualität von entscheidender

Bedeutung. Als Qualitätsmerkmale stehen hier zunächst die Porosität sowie die Feinheit und Homogenität des Gefüges im Vordergrund.

Durch diese Maßnahmen der Prozessanalyse sollen die Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern, den Kompaktierbedingungen (kinetische und thermische Auftreffbedingungen) und der Produktqualität untersucht werden, um damit ein Modell zur Optimierung der Materialqualität zu entwerfen, das eine Übertragung auf andere Werkstoffe ermöglicht.

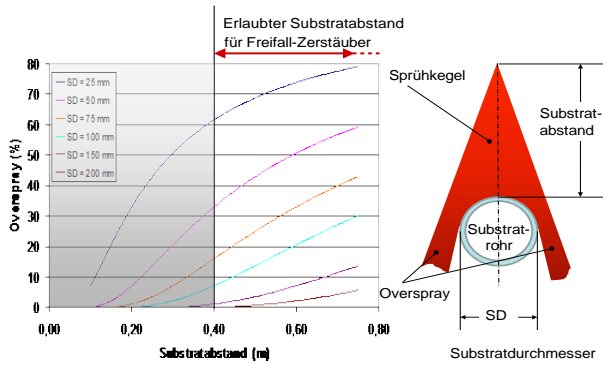


Bild 1: Zusammenhang zwischen geometrischem Overspray-Anteil, Zerstäuberabstand und Rohr-Substratdurchmesser (SD) (berechnet) für einen Freifall-Zerstäuber

Ergebnisse

Zerstäubungsverfahren

Als Alternative zur konventionellen Freifall-Zerstäubung wurden die beiden Verfahren Druck-Gas-Zerstäubung und Close-Coupled-Zerstäubung in einem neuen experimentellen Aufbau implementiert und auf die prozessspezifischen Anforderungen angepasst. Es wurden Zerstäubungsversuche zur Ermittlung der Partikelgrößenverteilung der Metallpulvern durchgeführt. Die Analyse der erzeugten Pulver (**Bild 2**) zeigte, dass die mit Druck-Gas-Zerstäubung erzeugten Partikeln in Abhängigkeit des Zerstäubergasdruckes im Massenmedian im Bereich von 70 – 240 µm lagen, während die Partikeln der Close-Coupled-Zerstäubung einen Massenmedian von ca. 25 µm aufwiesen. Aus den resultierenden stark verschiedenen Abkühlraten ergaben sich für die Kompaktierung in der Folge gänzlich verschiedene Prozessfenster.

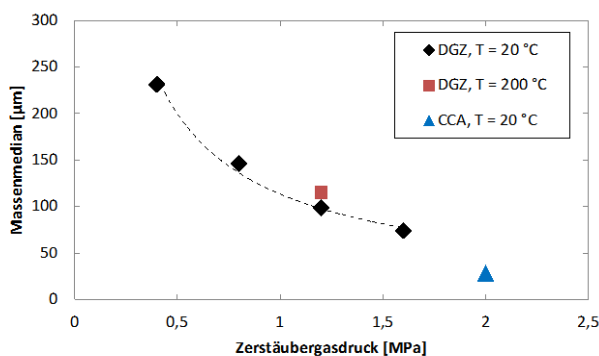


Bild 2: Massenmedian $d_{50,3}$ der mit Druck-Gas-Zerstäubung (DGZ) und der Close-Coupled-Zerstäubung (CCA) erzeugten Pulver

Anhand grundlegender Betrachtungen der Partikelabkühlung und des Wärmehaushaltes des Deposites soll ein Verständnis für Zusammenhänge zwischen Prozessparametern und erzeugten Materialeigenschaften ermöglicht werden.

Sprühkompaktierexperimente

Es wurden Sprühkompaktierexperimente mit der Druck-Gas- und Close-Coupled-Zerstäubung für verschiedene Sprühabstände, Zerstäubergasdrücke und Substratdurchmesser durchgeführt. **Bild 3** zeigt den Prozess und ein erzeugtes Produkt.

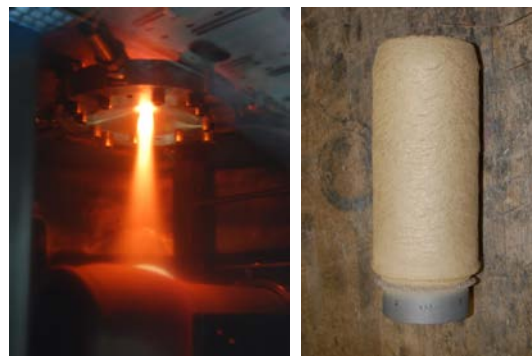


Bild 3: links: Sprühkompaktierung mit der Druck-Gas-Zerstäubung (Sprühabstand: 144 mm), rechts: gesprühtes Deposit (Substratdurchmesser: 90 mm)

Ausbringung

Durch eine Reduzierung des Sprühabstandes konnte bei der Druck-Gas-Zerstäubung eine Ausbringung von bis zu 96 % (**Bild 4**) erzielt werden, bei der Close-Coupled Zerstäubung maximal 92,4 % (**Bild 5**).

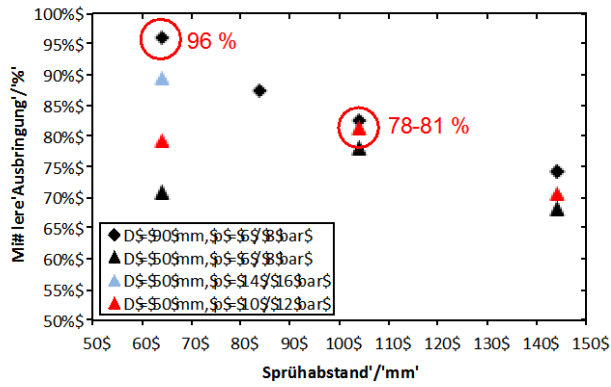


Bild 4: Erzielte Ausbringung bei der Druck-Gas-Zerstäubung für verschiedene Substratdurchmesser und Zerstäubergasdrücke

Der dabei verwendete Sprühabstand von 64 mm liegt eine Größenordnung unter den üblichen Sprühabständen von ca. 400 – 700 mm bei der Verwendung eines Freifall-Zerstäubers, wodurch sich komplett andere Prozessfenster ergeben.

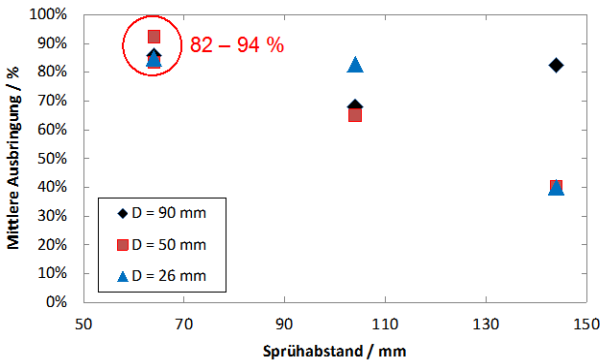


Bild 5: Erzielte Ausbringung bei der Close-Coupled-Zerstäubung für verschiedene Substratdurchmesser, Zerstäubergasdruck: 2,0 MPa

Porosität

Es konnten Porositäten deutlich unter 1 % erzielt werden, wobei bei der Druck-Gas-Zerstäubung die Porosität durch zu heiße und bei der Close-Coupled-Zerstäubung durch zu kalte Sprühbedingungen hervorgerufen wurde. Eine Größenanalyse der Porosität (Bild 6) zeigte, dass der Flächenmedian der Porosität der mit der Close-Coupled-Zerstäubung erzeugten Proben mit 2-8 µm deutlich unter dem der mit der Druck-Gas-Zerstäubung erzeugten Proben liegt (8 – 95 µm). Für die Weiterverarbeitung bedeutet dies, dass sich die nicht gänzlich zu vermeidbare Restporosität durch einen Umformschritt besser schließen lässt.

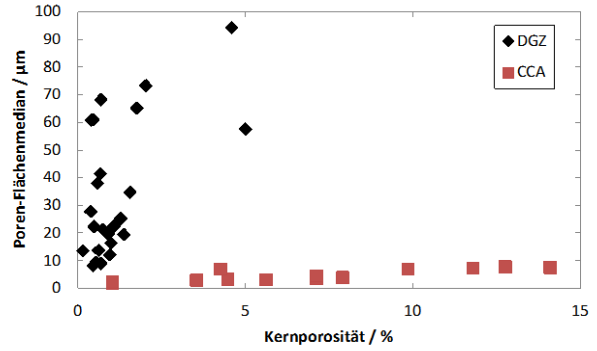


Bild 6: Vergleich von mittlerer Porengröße und Kernporosität

Mikrostruktur

Die Analyse der Mikrostruktur (Bild 7) zeigte bei der Close-Coupled-Zerstäubung eine stark verfeinerte Mikrostruktur (Flächenmedian der β-Phase: <2 µm) mit vereinzelt vorliegenden zinnreichen Phasen, während es bei der Druck-Gas-Zerstäubung zur Verkettung oder Agglomeration kam (Flächenmedian: 2,6 – 6,5 µm (agglomeriert), bis ca. 20 µm mit durchgehender Verkettung über mehrere mm), was entsprechende Nachteile in der Duktilität nach sich zieht.

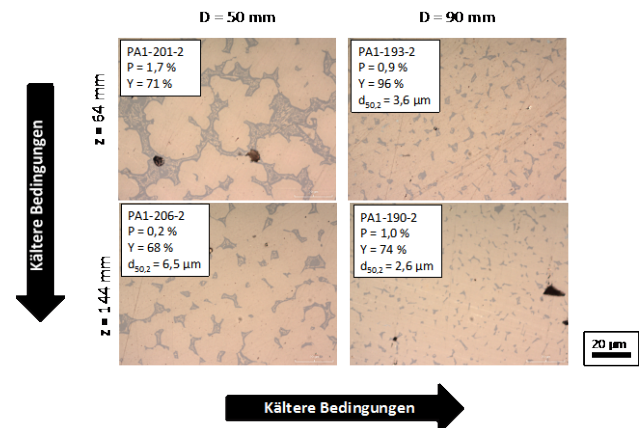


Bild 7: Mikrostruktur, Druck-Gas-Zerstäubung, ungeätzter Schliff, mit Angabe von Kernporosität P, mittlerer Ausbringung Y und Flächenmedian d_{50,2} der β-Phase. Für einen Substratdurchmesser von 50 mm und einem Sprühabstand von 64 mm war die Bestimmung der Ausscheidungsgröße aufgrund durchgängiger Verkettung nicht möglich.

Die thermischen Prozessbedingungen beeinflussen sowohl die Mikrostruktur des Deposites als auch dessen Porosität. Die Zusammenhänge sind in Bild 8 für beide Zerstäubungsverfahren zusammengefasst. Während bei der Close-Coupled-Zerstäubung die Größe der β-Phase bei verschiedenen Porositäten nahezu konstant zwischen 1 – 2 µm bleibt, korreliert bei der Druck-Gas-Zerstäubung die Porosität mit der Ausscheidungsgröße der β-Phase. Dies ist damit zu erklären, dass bei der Close-Coupled-Zerstäubung bereits so viel Wärme abgeführt wird, dass die β-Phase beim Auftreffen der Partikeln nahezu vollständig ausgebildet ist und nur noch im Festen wachsen kann. Bei der Druck-Gas-Zerstäubung

hingegen treffen die Partikeln mit einem deutlich höheren Flüssiganteil auf, so dass die Ausbildung der β -Phase durch die langsame Erstarrung der Restschmelze im Deposit geprägt wird.

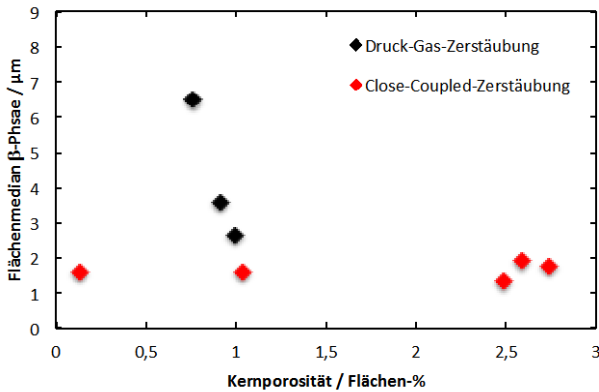


Bild 8: Zusammenhang zwischen Feinheit der Mikrostruktur und Kernporosität

Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen an zwei neuartigen Sprühkompaktierprozessen mit Zerstäubungsverfahren mit niedrigem Schmelzmassenstrom führten zu dem Ergebnis, dass ein Sprühkompaktierprozess mit hoher Ausbringung und gleichzeitig guten Produkteigenschaften im as-sprayed Zustand möglich ist. Die besten erzielten Ergebnisse sind in Tabelle 1 für beide Zerstäubungsverfahren und verschiedene Substratdurchmesser zusammengefasst.

Substratdurchmesser	Druck-Gas-Zerstäubung			Close-Coupled-Zerstäubung		
	Ausbringung	Porosität	Parameter	Ausbringung	Porosität	Parameter
	%	%	mm MPa	%	%	mm MPa
26 mm	- / -	- / -	- / -	84	1,04	z = 64 p = 0,2
50 mm	78	0,46	z = 104 p = 0,6	84	0,13	z = 64 p = 0,2
90 mm	96	0,91	z = 64 p = 0,8	67	6,6	z = 104 p = 0,2

Tabelle 1: Optimierte Prozessparameter für beide Zerstäubungsverfahren und verschiedene Substratdurchmesser

Eine zusammenfassende Bewertung der beiden Zerstäubungsverfahren ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Close-Coupled-Zerstäubung zeigt gegenüber der Druck-Gas-Zerstäubung deutliche Vorteile in der Betriebssicherheit und in der Verwendbarkeit des Legierungsspektrums. Mit beiden Verfahren lassen sich insgesamt hohe Ausbringungen von bis zu 96

% erzielen bei zumeist geringen Porositäten < 1%. In den durchgeführten Experimenten zeigte sich, dass die Sprühbedingungen der Close-Coupled-Zerstäubung für Substratdurchmesser > 50 mm zu kalt sind. In Stichversuchen wurde gezeigt, dass es durch eine Erhöhung des Schmelzmassenstromes möglich sein sollte, auch hier ein geeignetes Prozessfenster zu finden. Deutliche Vorteile zeigt die Close-Coupled-Zerstäubung auch in der Porengröße, die mit 2 – 8 μ m deutlich geringer ist als bei der Druck-Gas-Zerstäubung (8 – 95 μ m), so dass sich diese Poren durch nachfolgende Umformschritte deutlich einfacher schließen lassen. Zudem zeigt die Close-Coupled-Zerstäubung eine deutlich feinere Mikrostruktur, bei der die β -Phase vereinzelt vorliegt, während sie bei der Sprühkompaktierung mit der Druck-Gas-Zerstäubung deutlich gröber und in den meisten Fällen entweder agglomeriert oder über mehrere Millimeter verkettet vorliegt.

Das Sprühkompaktieren mit der Close-Coupled-Zerstäubung bei stark reduziertem Schmelzmassenstrom und Sprühabstand stellt eine gänzlich neue Verfahrensvariante dar, die die Gesamtoökonomie des Prozesses durch einen stark verringerten Overspray-Anteil deutlich erhöht und gleichzeitig eine feine Mikrostruktur bei einer Porosität von unter einem Prozent liefert. Aufgrund dieser Vorteile und der höherehnen Prozesssicherheit und Flexibilität hinsichtlich verwendbarer Legierungen wird die Close-Coupled-Zerstäubung für künftige Untersuchungen favorisiert.

	Druck-Gas-Zerstäubung	Close-Coupled-Zerstäubung
Betriebssicherheit	O	+
Legierungsspektrum	O (Graphit, bis ca. 1100 °C, andere FTM schwierig)	+
Ausbringung	++ 78 % für D = 50 mm 96 % für D = 90 mm	++ 84 % für D = 26 mm 84 % für D = 50 mm 67 % für D = 90 mm
Porositätsniveau	++ <=0,5 % für D >= 50 mm	+
Porositätsform	Heißporosität	Kaltporosität
Porengröße (Flächenmedian)	O 8 – 95 μ m	++ 2 – 8 μ m
Porenverteilung	+	O
Mikrostruktur	- Verkettete oder agglomerierte Struktur der β -Phase	++ Sehr fein und homogen und vereinzelt verteilte β -Phase

Tabelle 2: Zusammenfassende Bewertung der Zerstäubungsverfahren (++ sehr gut, + gut, O befriedigend, - ungünstig)

Danksagung

Das IGF-Vorhaben Nr. 17191 N der Arbeitsgemeinschaft Wärmebehandlung und Werkstofftechnik e. V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Es wurde vom Fachausschuss 22 (Sprühkompaktieren) der AWT betreut.

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

4. Literatur

[1] Ellendt, N., Uhlenwinkel, V., Mädler, L.: High Yield Spray Forming of Small Diameter Tubes using Pressure-Gas-Atomization. Proc. 5th International Conference on Spray Deposition and Melt Atomization, Bremen, Sept. 23-25, 2013. 2013, Bremen.

[2] Ellendt, N., Uhlenwinkel, V., Mädler, L.: *High Yield Spray Forming of Small Diameter Tubes using Pressure-Gas-Atomization*, Journal of Materials Science & Engineering Technology, angenommen zur Veröffentlichung in Heft 8, 2014

Kontakt:

Dr. Volker Uhlenwinkel
Institut für Werkstofftechnik
Hauptabteilung Verfahrenstechnik
Tel.: 218-64506
Email: uhl@iwt.uni-bremen.de