

Einsatz von wasserverdünsten Pulvern zum Auftragschweißen und Thermischen Spritzen

Dipl.-Ing. Andreas Pelz, Dipl.-Ing. Friedrich Bröer, Dr.-Ing. Bernd Reichmann, Thale

Abstract

Der Einsatz wasserverdünster Pulver als Zusatzwerkstoff für schweißtechnische Beschichtungsverfahren beschränkt sich zurzeit auf sehr wenige Sonderfälle beim Thermischen Spritzen. Im Allgemeinen besitzen diese Pulver eine spratzige Kornform und weisen relativ hohe Sauerstoffgehalte auf. Dadurch gelten sie als nicht schweißtechnisch verarbeitbar. Mit optimierten Verdüsungsmethoden und neuartigen Pulvernachbehandlungsverfahren wurden nun die Möglichkeiten zur Verbesserung der Schweißeignung von wasserverdünsten Pulvern erkundet. Die vorgestellten Pulverqualitäten ließen sich störungsfrei fördern und führten zu fehlerfreien Beschichtungen. Damit sind erstmalig schweißbare preisgünstige wasserverdünste Pulverqualitäten vorhanden, die als Wettbewerbsprodukt zu gasverdünsten Pulvern auftreten können.

1 Einleitung

Der Einsatz wasserverdünster Pulver zum Auftragschweißen und Thermischen Spritzen zählt nicht zum Stand der Technik. Über die direkte Verarbeitung von wasserverdünsten Pulvern in der Schweißtechnik ist bislang kaum berichtet und publiziert worden. Bekannt ist lediglich der Einsatz dieser Pulver als Legierungspulver für beispielsweise Fülldrähte. Es lassen sich außerdem einige Forschungsarbeiten zur Verwendung für spritztechnische Anwendungen finden [1][2]. Über den Einsatz von wasserverdünsten Pulvern für das Plasma-Pulver-Auftragschweißen (PPA) sind hingegen keine Quellen auffindbar.

Hohe Sauerstoffgehalte, spratzige Kornformen und unzureichende Verfügbarkeit geeigneter Legierungen standen der Verbreitung dieser Pulverqualitäten im Weg. Die heutzutage üblichen Wasserverdünungen zielen vorrangig auf die Versorgung der Sinterindustrie. Hier sind spratzige Kornformen zur Erzielung von Verklammerungseffekten erwünscht und höhere Sauerstoffwerte tolerierbar.

Gegenüber der Gasverdüsung können mit der Wasserverdüsung - vor allem bei Fe-Basislegierungen - Einspareffekte von bis zu 80% erzielt werden. Vor diesem Hintergrund hat die Corodur Verschleiss-Schutz GmbH Thale in den vergangenen Monaten in die Entwicklung zur Herstellung sauerstoffarmer und gut förderfähiger wasserverdünster Pulver investiert. Unter Beachtung materialspezifischer Kennwerte, Prozessoptimierungen und Pulvernachbehandlungsmethoden lassen sich hochlegierte Pulver herstellen, die sich gut bis hervorragend für Beschichtungszwecke im Verschleißschutz eignen.

2 Stand der Technik

Herstellung gas- und wasserverdünster Pulver

Es existiert eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Herstellung von Pulvern. Große Bedeutung haben die Verfahren der Zerstäubung mittels Fluid erlangt. Handelt es sich bei dem Fluid um ein Gas, spricht man von der Gasverdüsung. Im Falle der Wasserverdüsung wird Wasser unter Hochdruck zum Zerschlagen des schmelzflüssigen Metallstrahls verwendet. Die Abbildung 1 soll die beiden Verfahren schematisch veranschaulichen.

Die links dargestellte Gasverdüsung unterscheidet sich konstruktiv von der Wasserverdüsung (rechts). Die Anlagen zur Gasverdüsung sind geschlossene

Anlagen, um inerte Verdünungsbedingungen zu gewährleisten. Bereits der Schmelzprozess wird unter Schutzgas, im Vakuum, aber auch ohne besondere Schutzmaßnahmen realisiert. Bei der Wasserverdüsung wird die Legierung in offenen Schmelzaggregaten vorbereitet. Die Verdüsung erfolgt unter Schutzmaßnahmen, um den Luftsauerstoff nicht in unmittelbaren Kontakt mit der stark überhitzten Schmelze gelangen zu lassen.

Nachdem das flüssige Metall aus dem Ofen in den Trichter gegossen wurde, läuft es als Strahl mit definiertem Querschnitt aus der Trichterdüse. Im weiteren Verlauf erfolgt die Verdüsung mit dem jeweiligen Zerstäubungsmedium Wasser oder Gas. Das Fluid wird in beiden Prozessvarianten unter Hochdruck zugeführt. Über Düsenart und Düsengeometrie wird der Verdüsungswinkel α festgelegt.

Während bei der Gasverdüsung im geschlossenen Behälter unter und mit Schutzgas verdüst wird, ist der Systemaufwand bei der Wasserverdüsung wesentlich einfacher gehalten. Als Verdüungsmedium wird Wasser eingesetzt, das im Kreislauf geführt werden kann. Das verdünste Pulver kann hier kontinuierlich abgeführt werden. Die Gasverdüsung verlangt hingegen einen diskontinuierlichen Schleusenbetrieb, da es keinen Kontakt zur Umgebungsluft geben darf.

Gas- und wasserverdünste Pulver im Vergleich

Die markantesten Unterschiede zwischen gasverdünsten und wasserverdünsten Pulvern sind in der Teilchenform und im Reinheitsgrad definiert. Inertgasverdünste Pulver werden mit Sauerstoffgehalten von 0,02% hergestellt. Bei der Wasserverdüsung sind Sauerstoffgehalte von 0,2 – 0,8% normal - Ausnahmen bilden Ni-Basislegierungen.

Die Abbildung 2 zeigt die typischen morphologischen Unterschiede herkömmlicher wasserverdünster Pulver im Vergleich mit gasverdünsten. Gewöhnlich besitzen wasserverdünste Pulverteilchen eine spratzige unförmige Gestalt, die für eine relativ große Oberfläche sorgt und das Fließverhalten verschlechtert. Diese Eigenschaft stellt sich wegen der hohen Abkühlrate bei der Wasserverdüsung ein. Dahingegen haben gasverdünste Pulver eine kugelige Form. Bei der Gasverdüsung erfolgt die Abkühlung der verdünsten schmelzflüssigen Tropfen im freien Fall im Gasmedium. Dadurch sind die Abkühlzeiten lang genug, so dass die Form der geringsten Oberflächenspannung angenommen werden kann.

Die Pulver sind in der Regel kugelförmig und manchmal mit Satelliten behaftet.

Bei jeder Beschichtungstechnologie stehen Fragen zur Prozessstabilität und Beschichtungsqualität an

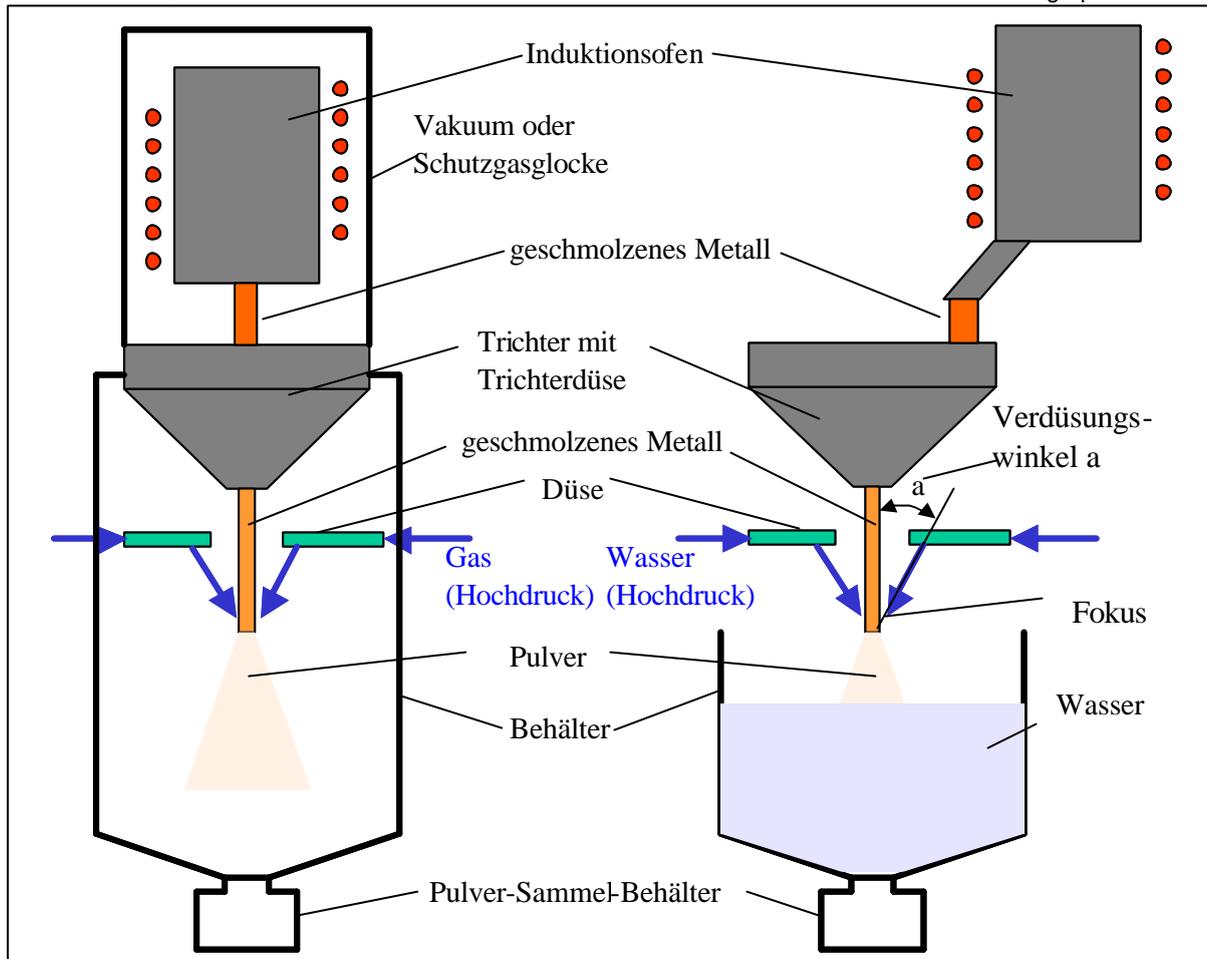


Abbildung 1: Anlagenvergleich einer Gasverdüsung (links) und einer Wasserverdüsung (rechts)

Wasserverdüste Pulver als pulverförmige Zusatzwerkstoffe für die Schweißtechnik

Wirft man einen genaueren Blick auf die Gründe zur Ablehnung bzw. Unterstützung von wasserverdüsten

erster Stelle. Die Prozessstabilität wird maßgeblich von der gleichmäßigen Zuführung der Pulver zum Schweiß- bzw. Spritzprozess bestimmt. Die Förderfähigkeit von pulverförmigen Werkstoffen wird allgemein mit der Rieselfähigkeit und damit der

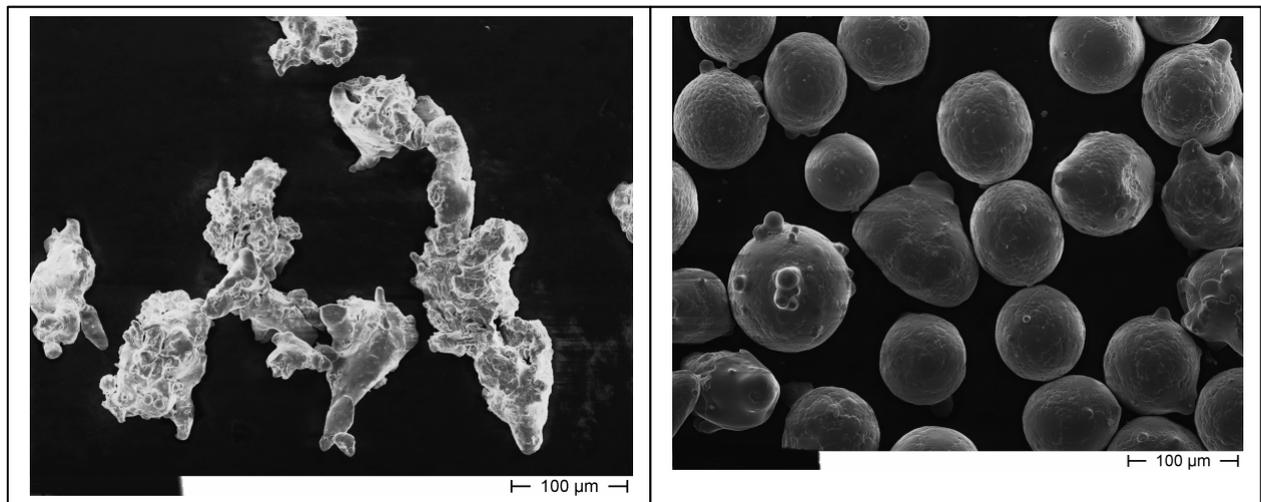


Abbildung 2: Gegenüberstellung herkömmlicher wasserverdüster Pulver (links) mit gasverdüsten Pulvern (rechts) bei 200facher Vergrößerung

Pulvern rücken die Verarbeitungseigenschaften der pulverförmigen Zusatzwerkstoffe in den Vordergrund.

Pulverkornform gleichgesetzt [2] [3] [4]. Wie bereits beschrieben, besitzen gasverdüste Pulver meist eine kugelförmig Gestalt, wodurch sie ausgezeichnet

rieselfähig und förderfähig sind. Dahingegen werden wasserverdünnte Pulver, auch in der Fachliteratur, als spritzige unförmige Pulver dargestellt und damit als zu riskant für einen stabilen Beschichtungsprozess eingestuft [3]. Allerdings fügt der selbe Autor ein, dass wasserverdünnte NiCrBSi-Pulverteilchen ein rundliches Erscheinungsbild haben und somit Verwendung finden können.

Andere Autoren [1][2][5] haben wasserverdünnte Pulver auf FeCrC,- aber auch NiCr-Basis spritztechnisch verarbeitet und getestet. Die irregulären Pulverformen setzten die Förderfähigkeiten zwar herab, dennoch konnten stabile Beschichtungsprozesse durch einfache Anpassung der Förderbedingungen erreicht werden. Die in [1] beschriebenen Plasmaspritzschichten aus einer FeCrC-Legierung erzielten viel versprechende Ergebnisse in den Verschleißuntersuchungen. Die Autoren aus [2] und [5] legten mehr Wert auf Korrosionsuntersuchungen ihrer Spritzschichten. Die Schichten zeigten etwas abgestufte Korrosionsfestigkeiten gegenüber den gasverdünnten Varianten. Dieser Effekt wird auf den höheren Oxidanteil in den Schichten zurückgeführt. Die Oxide sitzen demnach vorrangig auf den Pulverteilchenoberflächen und werden beim Spritzen mit in die Schicht eingebaut. Durch die Verwendung eines shrouds konnte [2] dennoch hochwertige und den gasverdünnten Pulvern gleichwertige Beschichtungen herstellen.

sollen bestmögliche Förderfähigkeiten erreicht werden.

Die weitere Feststellung ist, dass der Sauerstoff vor allem als Oxidhaut auf den Pulverteilchen vorliegt und die Beschichtungsqualität herabsetzt. Damit wird der Sauerstoffgehalt über zwei Faktoren festgelegt. Einen entscheidenden Einfluss hat die Affinität der jeweiligen Legierungsbestandteile. Zum anderen steigt mit zunehmender Oberfläche, d.h. der Spritzigkeit und der Pulverteilchen-Verteilung, der Sauerstoffgehalt der Pulver an.

Für die Versuche mussten demnach geeignete Legierungen bzw. Schmelzstrategien erarbeitet werden, um der Affinität der Legierungsbestandteile gerecht zu werden. Des Weiteren sollten die Verdünnungsbedingungen so gewählt werden, dass möglichst runde Pulverteilchen entstehen. Außerdem sollte versucht werden über geeignete Pulvernachbehandlungsschritte, die Oxidhäute von den Pulvern abzusprengen und damit den Sauerstoffgehalt weiter zu reduzieren.

Ferner müssen überhaupt Erkenntnisse über zulässige Sauerstoffgehalte für das Plasma-Pulver-Auftragschweißen gewonnen werden, da hierzu keinerlei Erkenntnisse aus der Fachliteratur vorliegen.

Legierungsauswahl

Es wurden verschiedene Ni-Basislegierungen und eine Fe-Basislegierung als Versuchslegierungen verdünnt.

Tabelle 1 Auflistung der bedeutendsten Legierungen im Versuchsprogramm

Ni-Basislegierung								
Bezeichnung	Gew.%C	Gew.%B	Gew.%Si	Gew.%Cr	Gew.%Fe	Gew.%O ₂	Gew.%Ni	Verdünnungsart
NiBSi-α	0,03	2,91	3,19	-	0,28	0,013	Rest	gasverdünnt
NiBSi-1	0,15	1,51	4,5	-	0,9	0,18	Rest	wasserverdünnt
NiBSi-hB	0,15	3,9	4	0,4	0,5	0,1	Rest	wasserverdünnt
NiCrBSi	0,9	3,2	4,1	15,4	4,3	0,05	Rest	wasserverdünnt
Fe-Basislegierung								
Bezeichnung	Gew.%C	Gew.%B	Gew.%Si	Gew.%Cr	Gew.%O ₂	Gew.%Fe		wasserverdünnt
59L-B-1	4	2,3	1,5	32	0,17	Rest		wasserverdünnt
59L-B-2	4,1	1,5	1	32	0,1	Rest		wasserverdünnt

Ebenfalls mit der Hilfe eines effektiven shroud Gases konnte [6] hochwertige Beschichtungen mit preisgünstigen wasserverdünnten Pulvern durch Laserauftragschweißen herstellen. Ebenso nimmt [7] die dünnen Oxidfilme der wasserverdünnten Pulverteilchen in seine Untersuchungen zur Loteignung auf. Trotz der Oxide ließen sich viele Anwendungsfälle für preiswerte wasserverdünnte Pulver aufzeigen.

2 Versuchsdurchführung

Versuchsbeschreibung

Die Auswertung der Fachliteratur zeigte, dass die Kornform Einfluss auf die Förderfähigkeit der Pulver nimmt. Dennoch können irreguläre Pulverteilchen nicht als absolute Einschränkung zur Verwendung wasserverdünnter Pulver gelten. Hier können Parameteranpassungen Abhilfe schaffen. Ebenso ist die Feststellung interessant, dass NiCrBSi-Legierungen auch bei der Herstellung mittels Wasserverdünnung sphärische Kornformen besitzen. Die eigene Pulverentwicklung musste demnach Verdünnungsbedingungen schaffen, die möglichst nah an denen der NiCrBSi-Legierungen liegen. Dadurch

Bei den Ni-Basislegierungen stand eine typische gasverdünnte Matrixlegierung für NiBSi/WSC Beschichtungen als Vergleichsvariante zur Verfügung. Die Legierung ist ähnlich der Wasserverdünnten und sollte hauptsächlich für Vergleichsuntersuchungen zum Beschichtungsverhalten herangezogen werden.

Weiterhin wurden alle Ni-Basislegierungen mit 60 Gew.% WSC vermischt, verarbeitet und getestet. Diese Versuche wurden durchgeführt, da ein Großteil an PTA Beschichtungen im Verschleißschutz aus diesen Pseudolegierungen besteht.

Bei den Fe-Basislegierungen wurde sich zunächst auf eine Legierung konzentriert. Hieran sollten die verfahrenstechnischen Möglichkeiten zur Reduzierung des Sauerstoffgehaltes überprüft werden. Die Etablierung von wasserverdünnten Schweißpulvern auf Fe-Basis zählt zum Hauptanliegen des begonnenen Forschungsvorhabens. Bei dieser Legierungsklasse kann der Vorteil gegenüber den gasverdünnten Varianten am eindeutigsten ausgespielt werden. Zum einen ist es der klare Preisvorteil und zum anderen der Reinheitsvorteil, da bei Gasverdünnungsanlagen, die meist hochreine Nichteisen-Sonderlegierungen herstellen, das Verdünnen von Eisenlegierungen sorgfältige Nachreinigungsarbeiten erfordert.

Verdüsungsbedingungen

Die Beeinflussung der Teilchenform wird bei der Wasserverdüsung von einer Vielzahl an Parametern bestimmt. Am Beispiel eines normalen

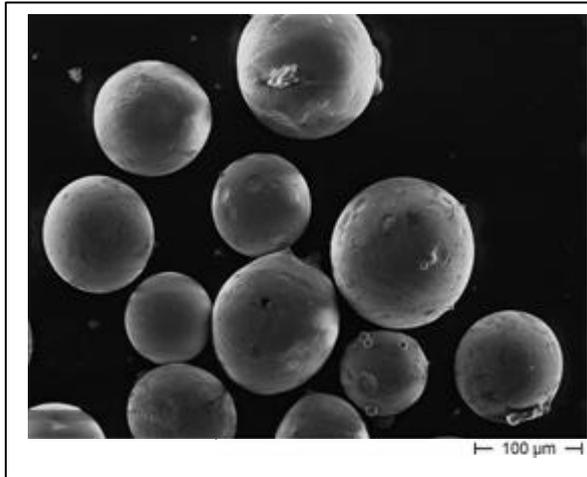
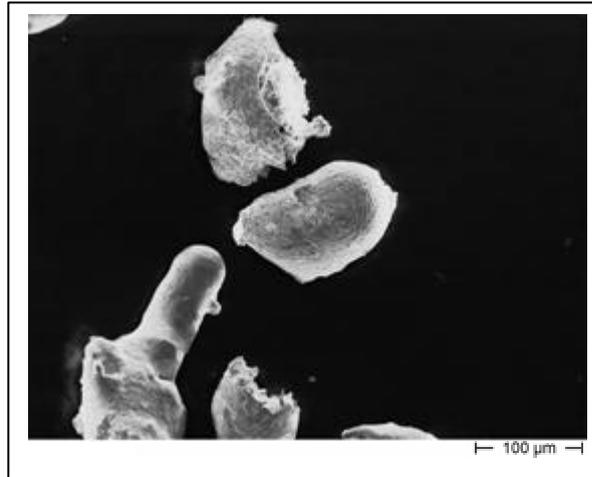


Abbildung 3: wasserverdüstes NiCrBSi-Pulver (links) und wasserverdüstete Fe-Basislegierung (rechts) bei 200facher Vergrößerung

Verdüsungsablaufes bedeutet das: Für eine möglichst reibungslose Wasserverdüsung erzeugt der Schmelzer eine stark überhitzte Schmelze. Wenn diese im weiteren Verlauf mit einem Überangebot an Wasser verdüst wird, entsteht im Resultat ein sehr spratziges Pulver. Dahingegen sind die Verhältnisse bei der Wasserverdüsung von NiCrBSi sehr günstig. Es handelt sich um ein Material mit einem niedrigen Schmelzpunkt (je nach Zusammensetzung ca. 1000°C) und selbstfließenden Eigenschaften. Der Wasserverdüser braucht sich demnach kaum Gedanken machen, dass die Schmelze durch den Trichter (Abbildung 1) läuft und heizt den Ofen nur ein Mindestmaß über den Schmelzpunkt der Legierung. Dadurch ist die Abkühlung beim Zusammentreffen von Schmelze und Wasser nicht so schroff und den innerlich noch flüssigen Pulverpartikeln verbleibt noch genügend Zeit die Form der geringsten Oberflächenspannung anzunehmen. Es ergibt sich ein rundliches Pulver, das dem gasverdüsten Pendant ähnelt (Abbildung 3-links und Abbildung 2-rechts). Was bedeutet dies aber für andere Legierungsklassen mit höheren Schmelztemperaturen?

Um an möglichst runde Pulverpartikel zu gelangen, sind die Abkühlbedingungen so moderat wie möglich zu halten. Es sollte demnach die Schmelztemperatur möglichst klein sein und das Verhältnis Schmelze – Wasser auf einem akzeptablen Wert eingestellt werden, so dass der Verdüsungsprozess noch stabil verläuft, der Abkühlgradient aber möglichst klein ist. Das Angebot an Schmelze wird über den Trichterdüsen-Durchmesser bestimmt und das Angebot an Wasser über Volumenstrom und Wasserdruck des Systems. Außerdem kann der Temperaturgradient verkleinert werden, indem man die Temperatur des Verdüsungswassers anhebt. Hierbei existieren allerdings Grenzen, die von den Förderpumpen vorgegeben sind. Eine weitere Möglichkeit zur Beeinflussung der Kornform und Korngröße besteht im Aufbau der Düsengeometrie. Üblicherweise wird mit einer 4-strahligen Düse gearbeitet, deren Strahlen auf einen Punkt fokussiert sind, in dem der

Schmelzstrahl zerschlagen wird. Je größer der Winkel (α in Abbildung 1 rechts), das heißt, je schärfer das Wasser auf den flüssigen Schmelzstrahl trifft, desto feiner sind die Teilchen und desto höher ist die



Abkühlrate. Dadurch erhält man ein spratzigeres Pulverteilchen. Zu flach darf der Winkel trotzdem nicht gewählt werden, da ansonsten der Prozess instabil wird und der Verdüsungstrichter einfriert.

3 Ergebnisse

Thermisches Spritzen

Von den in Tabelle 1 aufgeführten Legierungen wurde die wasserverdüstete NiCrBSi-Legierung mit einer JP5000 verspritzt. Die Pulverinjektion am Brenner erfolgte radial nach der Expansionsdüse. Das Pulver lies sich ausgezeichnet fördern und zeigte auch im Schichtaufbau keine negativen Merkmale in der Mikrostruktur (Abbildung 4).

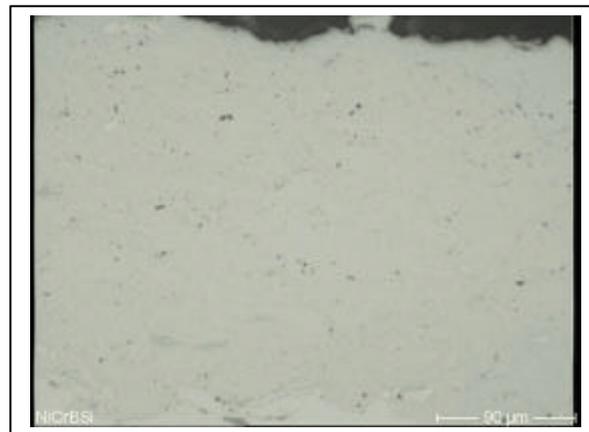


Abbildung 4: NiCrBSi-Spritzschicht bei 250facher Vergrößerung

Plasma-Pulver-Auftragschweißen (PPA)

Die PPA-Versuche wurden an einem NC-Probenschweißstand durchgeführt. Als Brenner kam ein wassergekühlter 300A Brenner zum Einsatz. Alle Pulver ließen sich störungsfrei über mehrere Versuchsschweißungen fördern. Die rundlichen Ni-Basis-Pulver und vor allem das NiCrBSi-Pulver

zeigten die höchsten Förderraten bei kleinen Förderparametern.



Abbildung 5: Schweißnaht des 59L-B-2 mit den korrespondierenden Schweißparametern

Mit allen Pulvern konnten makroskopisch fehlerfreie Beschichtungen erzeugt werden. Auch die Schweißversuche mit der Fe-Cr-C-B-Legierung fielen sehr zufrieden stellend aus. Hier standen 2 verschiedene Pulver mit unterschiedlichen Sauerstoffgehalten, der durch reine Prozessoptimierung von 0,17Gew.% auf

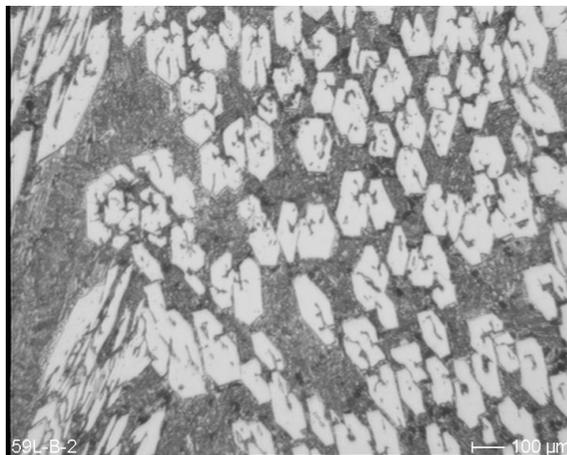


Abbildung 7: Makro- und Mikroschliff (200fach) der Fe-Basislegierung 59L-B-2 (links) und der NiCrBSi-Legierung (rechts)

0,1Gew.% reduziert werden konnte, zur Verfügung. Erstaunlicherweise zeigten beide Pulver kaum Unterschiede im Schweißverhalten und keine in der Mikrostruktur.

Links in der Abbildung 7 ist der Makro- und Mikroschliff der sauerstoffreduzierten Fe-Basislegierung zu sehen. In das Gefüge sind Chromreiche Hartphasen (weiß) eingelagert. Als Metalloid ist sowohl Kohlenstoff als auch Bor eingelagert. Außerdem liegt eine weitere Bor-dominierte Phase (schwarz) vor.

Bei den Nickellegierungen hingegen konnten die Auswirkungen des Sauerstoffgehaltes nachgewiesen werden. Im Mikroschliff der NiBSi-1 Legierung (Abbildung 6) sind vereinzelt Poren zu erkennen, während die NiCrBSi-Legierung ein absolut fehlerfreies Gefüge aufweist (Abbildung 7-rechts).

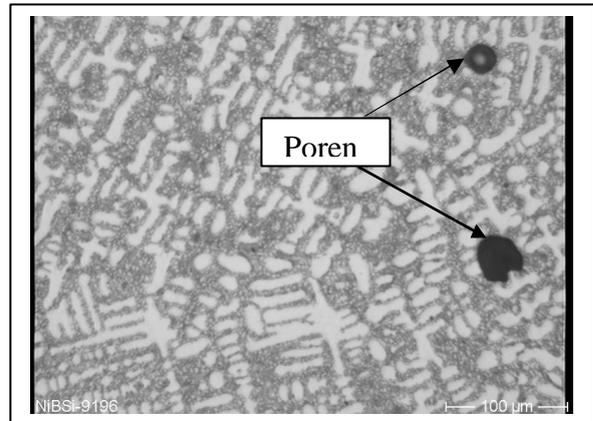
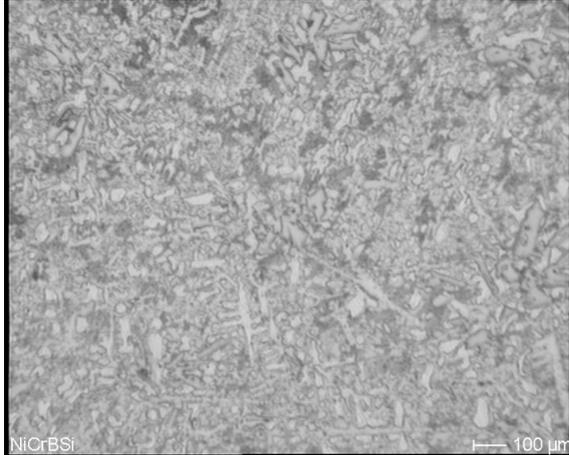


Abbildung 6: Mikroschliff der NiBSi-1 Legierung bei 200facher Vergrößerung



Verschleißuntersuchungen

Die Verschleißuntersuchungen wurden an Schweißproben der Pseudolegierungen, bestehend aus 40 Gew.% Ni-Basislegierung + 60 Gew.% WSC, durchgeführt. Als Ni-Matrix wurden alle zur Verfügung stehenden Ni-Basislegierungen der Tabelle verarbeitet und getestet.

Die Untersuchung sollte die prinzipielle Machbarkeit testen, ob wasserverdünnte Pulver als Matrixlegierung für Pseudolegierungen einsetzbar ist. Die Verarbeitung der Pulvermischungen verlief problemlos

und zeigte keine Unterschiede zu den Schweißversuchen mit der gasverdünsten Vergleichsvariante.

Basislegierungen auch für Pulvermischungen (Pseudolegierungen) nachgewiesen werden. Mittels HVOF wurde die wasserverdünste NiCrBSi-Legierung

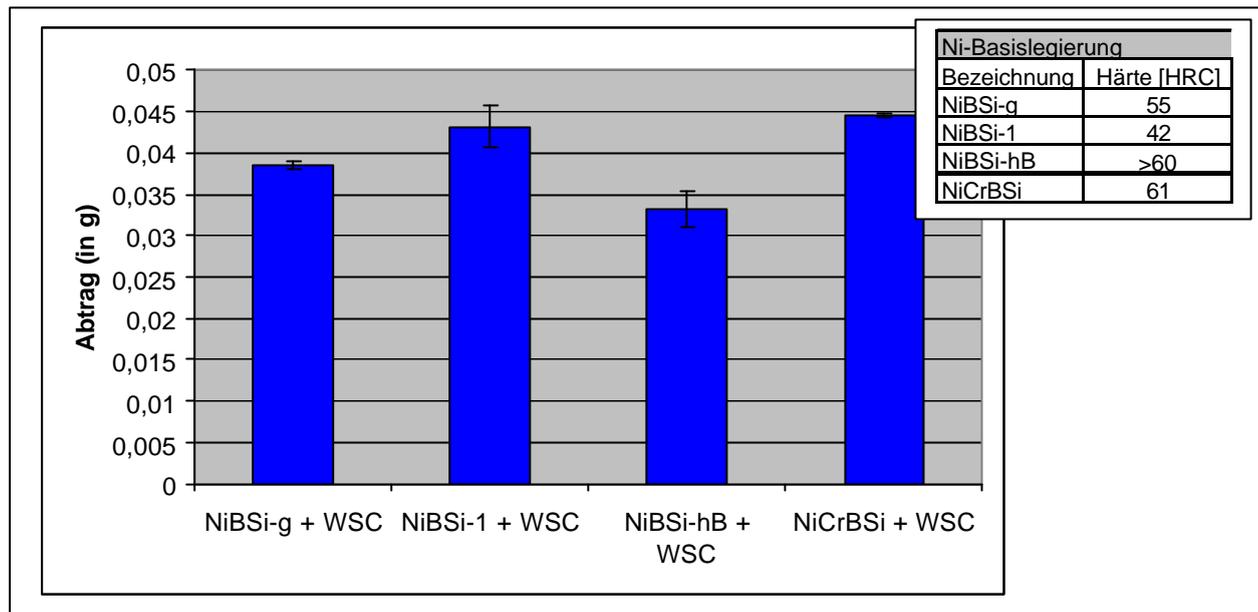


Abbildung 8: Ergebnisse der Verschleißuntersuchungen mit den korrespondierenden Härtewerten der jeweiligen Ni-Matrixlegierung

Als Verschleißtest kam das Reibradverfahren mit gebundenem SiC-Gegenkörper zum Einsatz und führte zu den in Abbildung 8 dargestellten Ergebnissen. Natürlich können diese Ergebnisse nicht als Grundlage für Aussagen über die Leistungsfähigkeit gas- oder wasserverdünster Pulver herangezogen werden. Schließlich hat jede Matrixlegierung eine unterschiedliche chemische Zusammensetzung. Dadurch ergeben sich unterschiedliche Härtewerte und Gefügestrukturen in den Matrixlegierungen, die sich auf die Verschleißfestigkeit auswirken. Außerdem hat jede Legierung einen anderen Schmelzpunkt, der zu unterschiedlichen Anschmelzungen der WSC führt. Dennoch kann sowohl aus den Ergebnissen der Verschleißuntersuchungen als auch aus den subjektiven und objektiven Begutachtungen der Schweißversuche ein positives Fazit für die wasserverdünsten Ni-Matrixpulver abgegeben werden. Die Verschleißfestigkeiten der Abbildung 8 liegen alle relativ nah beieinander. Auch zeigt die gasverdünste Variante nicht die besten Ergebnisse, wonach der Verschleiß vorrangig auf die Legierung und nicht auf die Verdünnungsart zurückzuführen ist.

4 Zusammenfassung/ Ausblick

In einer ersten Versuchsreihe mit wasserverdünsten Pulvern wurden 3 Ni-Basislegierungen und 2 Fe-Basislegierungen getestet. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der schweißtechnischen Verarbeitbarkeit der Pulver mittels PPA-schweißen. Alle Pulver ließen sich trotz ihrer teilweise irregulären Formen störungsfrei fördern und verarbeiten. Die angewendeten Maßnahmen zur Reduzierung des Sauerstoffgehaltes führten zu Pulvern, mit denen sich fehlerfreie Auftragschweißungen herstellen ließen. Die Verarbeitbarkeit konnte anhand der Ni-

spritztechnisch verarbeitet und führte zu makro- und mikroskopisch einwandfreien Schichten.

In folgenden Schritten werden die beschriebenen Pulverqualitäten unter Verarbeitung größerer Mengen und längerer Schweißzeiten getestet. An daraus entnommenen Proben müssen dann Verschleiß- und Korrosionsuntersuchungen, im Vergleich zu artgleichen gasverdünsten Legierungen, vorgenommen werden.

Momentan wird noch an der Entwicklung von nachbehandelten wasserverdünsten Pulvern gearbeitet. Die bislang zufrieden stellend verlaufenden Voruntersuchungen, sollen zu weiteren Substitutionsmöglichkeiten von gasverdünsten Pulvern bei anderen Legierungsklassen führen. Die Vorstellung dieser Ergebnisse wird Gegenstand weiterer Veröffentlichungen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] J.B. Correia, R. Colaco, E. Pires, T. Marques, R. Vilar; Fe-Cr-C powders for composite coatings produced via water atomization; Proceedings SDMA 2000; pages 579-590
- [2] Y. Tzunekawa, T. Ueno, M. Okumiya, T. Yashiro; Plasma sprayed coatings with water and gas atomized bearing steel powders; Surface Engineering 2003; Volume 19 No.1; pages 17-22
- [3] M. Oechsle, M. Junod ; Eigenschaften metallischer Pulver; Hochgeschwindigkeits-Flammspritzen, 5. Kolloquium (2000) Seite 57-65

- [4] Ellermeier, J.; Metallurgisch-technologische Untersuchungen von Hartlegierungen für das Plasma-Pulver-Auftragschweißen; Aachener Berichte Fügetechnik Band 5/96
- [5] S.J. Harris, M. Emamighomi, Influence of the HVOF spraying process on the microstructure and corrosion behaviour of Ni-20%Cr coating; Journal of Material Science 38 (2003); Heft 22; Seiten 4587-4596
- [6] A.J. Pinkerton, L. Li; The behaviour of water- and gas-atomised tool steel powders in coaxial laser freeform fabrication; Thin Solid Films 453-454 (2004); pages 600-605