

Beitrag zum Pulverschmieden axial gradierter TRIP-Matrix-Composite

Von der Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie

der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von M. Sc. Markus Matthias Kirschner

geboren am 09.07.1991 in Nürnberg

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Ulrich Prah, TU Bergakademie Freiberg

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann, RWTH Aachen

Tag der Verleihung: Freiberg, den 29. September 2021

Inhaltsverzeichnis

III. Inhaltsverzeichnis

I.	KURZFASSUNG	3
II.	ABSTRACT	4
III.	INHALTSVERZEICHNIS	5
IV.	EINLEITUNG	9
V.	ARBEIT	10
1.	STAND DER TECHNIK	10
1.1	Metall Matrix Composite	10
1.1.1	Aktuell Prozesse der MMC Herstellung mittels Pulvermetallurgie anhand verschiedener Werkstoffe	11
1.1.1.1	Magnesium MMCs	11
1.1.1.2	Aluminium MMCs	12
1.1.1.3	Titan MMCs	12
1.1.1.4	Kupfer MMCs	13
1.1.1.5	Eisen/Stahl MMCs	13
1.1.1.6	Nickel MMCs	14
1.1.2	Werkstoffe dieser Arbeit	14
1.1.2.1	Matrix: Austenitische CrMnNi-Stähle	14
1.1.2.2	Verstärkungspartikel: ZrO ₂	17
1.2	Gradientenwerkstoffe	20
1.2.1	Gradientenwerkstoffe und die Herstellung mittels Pulvermetallurgie	23
1.2.2	Aktuelle Verfahren zur Herstellung von gradierten MMCs mittels Pulvermetallurgie	24
1.2.2.1	Gradientensystem 316L/430L	24
1.2.2.2	Gradientensystem Cu/TiC _p	24
1.2.2.3	Gradientensystem TiC/Ni	24
1.2.2.4	Gradientensystem ZrO ₂ /SUS316L	25
1.2.2.5	Gradientensystem Stahl/Wolframcarbid	26
1.3	Allgemeine Probleme von PM-Bauteilen	26
1.4	Pulverschmieden	30
1.4.1	Einflussfaktoren auf die Dichte beim Pulverschmieden	34
1.4.2	Verdichtungsprozess beim Pulverschmieden	35
1.4.3	Mathematische Modelle zur Beschreibung des Pulverschmiedevorgangs	38

Inhaltsverzeichnis

1.5	Pulverschmieden von MMCs	41
1.6	Der Werkstofffluss beim Pulverschmieden von MMCs	45
1.7	Diskussion des Stands der Technik	48
2.	FORSCHUNGSFRAGEN UND HYPOTHESEN.....	51
3.	MATERIALIEN UND METHODEN	54
3.1	ZrO₂.....	54
3.2	CrMnNi-Stahl.....	54
3.3	Probekörper.....	55
3.4	Schmiermittel	56
3.5	Ermitteln von Kennwerten.....	57
3.5.1	Dichtebestimmung.....	57
3.5.2	Ermittlung des Wärmeausdehnungskoeffizienten	57
3.5.3	Einstellen der Preformdichte	58
3.5.4	Ermittlung der Schwindung.....	58
3.5.5	Ermittlung Poisson-Zahl.....	59
3.5.6	Ermittlung E-Modul	59
3.5.7	Oxidationsverhalten.....	59
3.5.8	Fließkurvenermittlung	60
3.5.9	Prozesskartenerstellung	60
3.6	Simulationen	65
3.7	Pulverschmieden	67
3.7.1	Bestimmung des Materialflusses mittels der visioplastischen Methode	69
3.7.2	Ermittlung der Spannungszustände	70
3.7.3	Ermittlung des Gefüges und der Grenzflächenqualität.....	71
3.7.4	Partikelorientierung	71
3.7.5	Haftfestigkeitsprüfung.....	71
3.8	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften	72
4.	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	73
4.1	Bestimmung der material- und prozessabhängigen Parameter	73
4.1.1	Dichte	73
4.1.2	Verhältnis Presskraft zu Dichte	75

Inhaltsverzeichnis

4.1.3	Wärmeausdehnungskoeffizienten	77
4.1.4	Schwindung	79
4.1.5	Poisson-Zahl.....	81
4.1.6	Elastizitätsmoduls	84
4.1.7	Fließkurven	86
4.1.8	Oxidationsverhalten	88
4.1.9	Prozesskarten	93
4.2	Simulation.....	98
4.2.1	Vergleich theoretischer Pulverschmiedemodelle mit empirischen Daten.....	98
4.2.2	Beeinflussung der Schichtstrukturen untereinander.....	99
4.2.3	Schichtdickenoptimierung.....	100
4.3	Modellversuche zum Pulverschmieden.....	104
4.3.1	Visioplastische Methode	104
4.3.2	Spannungszustände	115
4.3.3	Metallographische Untersuchungen.....	122
4.3.3.1	Mikroskopische Untersuchungen.....	122
4.3.3.2	Partikelorientierung	127
4.3.3.3	Das Gefüge nach dem Pulverschmieden.....	129
4.3.3.4	Grenzflächenqualität nach dem Pulverschmieden	131
4.3.3.5	Grad der Restporosität	136
4.3.4	Dichteinflüsse.....	138
4.3.4.1	Einfluss der Spannungszustände auf die Dichte	138
4.3.4.2	Einfluss der Temperatur auf die Dichte	139
4.3.4.3	Einfluss der Ausgleichsspalten auf die Dichte.....	140
4.4	Erzeugung von gradierten Bauteilen mittels Pulverschmieden bei gleichzeitiger Umformung und Verdichtung.....	143
4.4.1	Dichtebestimmung	144
4.4.2	Schichtgrenzflächen- und Grenzflächenanalyse	145
4.4.3	Mechanische Eigenschaften der geschmiedeten Bauteile.....	148
4.4.3.1	Haftfestigkeit der Schichten.....	148
4.4.3.2	Härte	151
4.4.3.3	Zugfestigkeit.....	153
4.5	Einflüsse des Werkstoffsystems und der Prozessroute auf den TRIP-Matrix Composite.....	156

Inhaltsverzeichnis

4.6	Abschlussdiskussion.....	159
5.	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	162
VI.	LITERATURVERZEICHNIS	164
VII.	ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS	177
VIII.	FORMELVERZEICHNIS	181
IX.	TABELLENVERZEICHNIS.....	182
X.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	183
XI.	DIAGRAMMVERZEICHNIS	186
XII.	ANHANG	191
XIII.	VERSICHERUNG	198