

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>VII</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>3</b>
2.1 Definition und Abgrenzung der thermischen Spritztechnik .....	3
2.2 Einteilung der thermischen Spritzverfahren .....	5
2.2.1 Lichtbogenspritzen .....	6
2.2.2 Atmosphärisches Plasmaspritzen .....	9
2.2.3 Hochgeschwindigkeitsflammspritzen .....	10
2.3 Energieflüsse beim thermischen Spritzen .....	12
2.4 Thermisch gespritzte Schichtsysteme .....	14
2.4.1 Der Schichtaufbau .....	14
2.4.2 Haftung zwischen thermisch gespritzter Schicht und Substrat .....	15
2.5 Aluminium .....	17
2.5.1 Aluminiumlegierungen .....	17
2.5.2 Die Oberfläche des Aluminiums .....	19
2.6 Metallische Verbundwerkstoffe .....	20
2.6.1 Aluminium-Stahl-Hybride .....	20
2.7 Beschichten mittels thermischen Spritzens .....	22
2.7.1 Beschichten von Stahlwerkstoffen .....	22
2.7.2 Beschichten von Leichtmetallen .....	23
2.7.3 Beschichten von Verbundwerkstoffen .....	26
2.8 Verschleiß .....	28
2.8.1 Verschleißschutz mittels thermischen Spritzens .....	29
2.9 Temperaturwechselbeständigkeit .....	31
2.9.1 Begrifflichkeiten und Definitionen .....	31
2.9.2 Einflussgrößen auf die Temperaturwechselbeständigkeit .....	32
2.9.3 Prüfverfahren der Temperaturwechselbeständigkeit .....	33

2.9.4	Arten der Temperaturwechselschäden .....	34
2.10	Eigenspannungen thermisch gespritzter Schichten.....	35
2.10.1	Eigenspannungen thermisch gespritzter Schichten abgeschieden auf Hybridwerkstoffen .....	37
2.11	Messung von Eigenspannungen .....	38
2.11.1	Röntgendiffraktometrie .....	38
2.11.2	Bohrlochmethode .....	39
2.12	Auswertung der Eigenspannungsmessung nach der Bohrlochmethode .....	40
2.12.1	Mittelwertbestimmung .....	40
2.12.2	Differentialverfahren .....	41
2.12.3	Integralverfahren .....	43
2.13	E-Modulbestimmung bei thermischen Spritzschichten .....	45
2.13.1	Impulse Excitation Technique (IET) .....	45
2.13.2	4-Punkt-Biegeversuch .....	46
2.13.3	Nanoindentierung .....	46
2.14	Diagnostik und Temperaturmessungen beim thermischen Spritzen .....	47
2.15	Finite-Elemente-Methode .....	49
2.15.1	Gegenüberstellung Simulation und Experiment .....	49
2.15.2	Formen der Simulation .....	49
2.15.3	Vorteile der Simulation .....	51
2.15.4	Anwendungsfälle der FEM .....	52
2.15.5	Grundsätzlicher Aufbau eines FE-Programms .....	52
2.15.6	Thermische Analyse mittels FEM .....	53
2.15.6.1	Wärme .....	53
2.15.6.2	Temperaturfelder .....	54
2.15.6.3	Wärmetransportmechanismen .....	54
2.15.7	Einsatz der FEM / FVM-Simulation (CFD) beim thermischen Spritzen .....	57
<b>3</b>	<b>Zielsetzung und Vorgehensweise .....</b>	<b>59</b>
3.1	Motivation und Zielsetzung .....	59
3.2	Vorgehensweise .....	60
<b>4</b>	<b>Experimentelles und Analytik .....</b>	<b>63</b>
4.1	Grundwerkstoffe .....	63
4.2	Probenvorbereitung .....	64
4.3	Thermische Spritzverfahren .....	66
4.3.1	Verfahrkinematik .....	67
4.3.2	Lichtbogenspritzen .....	67
4.3.3	Atmosphärisches Plasmaspritzen .....	68
4.3.4	Hochgeschwindigkeitsflammspritzen .....	70
4.3.4.1	Thermico CJS .....	70

4.3.4.2	Sulzer WokaJet 400 .....	71
4.4	Spritzzusätze .....	73
4.4.1	NiCrBSi .....	73
4.4.2	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> 25NiCr .....	73
4.5	Versuchs- und Untersuchungsmethoden .....	74
4.5.1	Lichtmikroskopie .....	74
4.5.2	Rasterelektronenmikroskopie .....	74
4.5.3	Rauheitsmessung .....	75
4.5.4	Härtebestimmung .....	76
4.5.5	Haftzugprüfung nach DIN EN 582 .....	77
4.5.6	Tribometer-Verschleißtest .....	79
4.5.7	Taber-Abraser-Verschleißtest .....	81
4.5.8	Optische 3D-Profilometrie .....	82
4.5.9	Thermoschockuntersuchungen .....	83
4.5.10	Korrosionsuntersuchungen .....	84
4.6	Thermographie .....	85
4.6.1	Messaufbau .....	85
4.6.2	Einflussfaktoren bei thermographischen Untersuchungen .....	91
4.6.3	Temperaturmessung (NiCrNi) .....	93
4.6.4	Analytik und Vorgehensweise .....	96
4.7	Eigenspannungsmessung .....	104
4.8	FEM-Simulation .....	108
4.8.1	Simulationsaufbau und Einflussgrößen .....	108
4.8.2	Simulationsschema .....	108
4.8.3	Vergleich zwischen Simulation und Thermographie .....	109
4.8.4	Energiebilanz Spritzpistole .....	111
4.8.4.1	Thermische Energie .....	111
4.8.4.2	Kinetische Energie .....	112
4.8.4.3	Kühlung .....	113
4.8.4.4	Energiebilanz .....	113
4.8.4.5	Energiebilanz der Partikel .....	114
4.8.5	Vermessung des Verfahrenswegs der Lineareinheit und des Oversprays .....	116
4.8.6	Wärmespezifische Stoffeigenschaften von Schicht und Substrat .....	118
4.8.7	Annahmen für den Energieeintrag an der Substratoberfläche .....	119
4.8.8	Rückkühlung .....	120
4.8.9	Sonstige Randbedingungen .....	124
5	Darstellung und Diskussion der Ergebnisse .....	127
5.1	Schichteigenschaften .....	127
5.1.1	Einfluss der Substratvorbehandlung auf die Oberflächenrauheit .....	127
5.1.2	Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen .....	128

5.1.2.1	Mikrostruktur der thermisch gespritzten Schichten .....	129
5.1.2.2	Porositätsmessung .....	132
5.1.2.3	Härtemessungen.....	133
5.1.2.4	Rauheitsmessungen .....	135
5.1.2.5	Fazit der metallographischen Untersuchungen.....	137
5.1.3	Haftzugfestigkeit der applizierten Beschichtungen.....	138
5.1.3.1	Fazit Haftzugprüfung.....	141
5.1.4	Verschleißbeständigkeit der Substratwerkstoffe und der Schichten .....	143
5.1.4.1	Gleitverschleißverhalten thermisch gespritzter Schichten .....	143
5.1.4.2	Abrasivverschleißverhalten thermisch gespritzter Schichten.....	152
5.1.4.3	Fazit Verschleißuntersuchungen .....	163
5.1.5	Thermoschockbeständigkeit nach ISO 14188.....	167
5.1.5.1	Fazit Thermoschockuntersuchungen.....	169
5.1.6	Korrosionsbeständigkeit nach DIN EN ISO 9227.....	170
5.1.6.1	Fazit Korrosionsuntersuchungen .....	173
5.2	Thermische Analytik .....	176
5.2.1	Temperaturverläufe.....	176
5.2.1.1	Wärmeübergänge im Substrat .....	176
5.2.1.2	Allgemeiner Temperaturverlauf.....	179
5.2.1.3	Zeitlicher Verlauf der Temperatur .....	181
5.2.1.4	Temperaturverlauf über die Breite der Proben.....	183
5.2.1.5	Temperaturverlauf über die Höhe der Proben .....	184
5.2.1.6	Temperaturverlauf über die Länge der Proben .....	186
5.2.2	Eigenschaften der Partikel im Flug.....	186
5.2.3	Temperaturverteilung während der Beschichtungsversuche .....	190
5.2.3.1	Sulzer SmartArc (LiBo) .....	191
5.2.3.2	Sulzer F4-MB (APS) .....	194
5.2.3.3	Thermico CJS (HVOF).....	197
5.2.3.4	Sulzer WokaJet 400 (HVOF) .....	200
5.2.4	Eigenspannungsverläufe.....	203
5.2.4.1	Allgemeiner Eigenspannungsverlauf .....	203
5.2.5	Fazit der thermischen Analytik .....	207
5.3	FEM-Simulation .....	216
5.3.1	Wärmeeintrag des Spritzstrahls auf das Substrat.....	216
5.3.2	Abbildung des Energieflusses von der Spritzpistole zum Substrat .....	217
5.3.2.1	APS: Brenner F4-MB der Fa. Sulzer.....	220
5.3.2.2	LiBo: Spritzpistole SmartArc der Fa. Sulzer.....	221
5.3.2.3	HVOF: Brenner CJS der Fa. Thermico .....	222
5.3.2.4	HVOF: Brenner WokaJet 400 der Fa. Sulzer.....	223

5.3.3	Temperaturverteilungen im Substrat .....	224
5.3.3.1	Allgemeine Temperaturverteilung .....	224
5.3.3.2	Temperaturverteilung APS mit $\text{Cr}_3\text{C}_2$ 25NiCr .....	229
5.3.3.3	Temperaturverteilung APS mit NiCrBSi .....	231
5.3.3.4	Temperaturverteilung LiBo mit $\text{Cr}_3\text{C}_2$ 25NiCr .....	232
5.3.3.5	Temperaturverteilung LiBo mit NiCrBSi .....	233
5.3.3.6	Temperaturverteilung HVOF (Thermico) mit $\text{Cr}_3\text{C}_2$ 25NiCr .....	234
5.3.3.7	Temperaturverteilung HVOF (Thermico) mit NiCrBSi .....	235
5.3.3.8	Temperaturverteilung HVOF (Woka) mit $\text{Cr}_3\text{C}_2$ 25NiCr .....	236
5.3.3.9	Temperaturverteilung HVOF (Woka) mit NiCrBSi .....	237
5.3.4	Fazit FEM-Simulation .....	238
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>243</b>
6.1	Zusammenfassung .....	243
6.2	Ausblick .....	247
	<b>Literatur .....</b>	<b>251</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>273</b>