

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE
Herausgegeben vom Rektor der TU Bergakademie Freiberg

B 351 Werkstofftechnologie

**Untersuchung der metallurgisch-technologischen
Einflüsse auf das Werkstoffverhalten einer
Superlegierung bei der Primärumformung**

Jan Terhaar

Inhaltsverzeichnis

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	V
Begriffsdefinitionen	IX
1 Einleitung.....	1
2 Stand der Technik und untersuchter Werkstoff.....	3
2.1 Metallkundliche Grundlagen der Superlegierungen	3
2.1.1 Legierungskonzepte und Gefüge-Eigenschaftsbeziehungen	3
2.1.2 Charakterisierung der Legierung IN718	7
2.2 Prozesskette zur Erzeugung von geschmiedetem Halbzeug.....	12
2.2.1 Umschmelzen.....	14
2.2.1.1 Technologie der Umschmelzprozesse	15
2.2.1.2 Entstehung einer gerichtet-dendritischen Erstarrungsstruktur	21
2.2.1.3 Beeinflussbarkeit der Erstarrung im Vakuum-Lichtbogenofen	24
2.2.1.4 Fehler in Vakuum-Lichtbogen-Umschmelzblöcken	30
2.2.1.5 Erstarrungsablauf von IN718	34
2.2.2 Homogenisieren	37
2.2.2.1 Werkstoffkundliche Vorgänge bei der Homogenisierungsglühung	37
2.2.2.2 Industrielle Homogenisierungsglühbehandlung von IN718	39
2.2.3 Umformen	41
2.2.3.1 Freiformschmieden.....	42
2.2.3.2 Beschreibung des Werkstoffverhaltens bei der Umformung.....	47
2.2.3.3 Besondere Aspekte der Primärumformung	54
2.2.3.4 Umformverhalten und Schmiedetechnologie von IN718.....	59
2.3 Werkstoffschädigung in der Umformtechnik.....	62
2.3.1 Einflussgrößen auf das Formänderungsvermögen.....	63
2.3.2 Möglichkeiten zur Ermittlung des Formänderungsvermögens	66
2.3.3 Schädigungsmechanismen	68
2.3.4 Möglichkeiten zur Schädigungsvorhersage	72
2.3.4.1 Schädigungshypothesen, -kriterien und -modelle	73
2.3.4.2 Bewertung der verschiedenen Ansätze.....	80
3 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	83
3.1 Zielsetzung der Arbeit	83
3.2 Experimentelles und simulatorisches Vorgehen.....	84

4 Untersuchungen zur Erzeugung der Erstarrungsstruktur im Rohblock	87
4.1 Experimentelle Untersuchungen im Produktionsmaßstab	87
4.1.1 Umschmelzversuche im Vakuum-Lichtbogenofen	87
4.1.2 Auswertung der Umschmelzprozessdaten	94
4.1.3 Charakterisierung des gussrohen Umschmelzzustandes	96
4.1.3.1 Beizscheibenauswertung	96
4.1.3.2 Metallographie (Licht- und Elektronenmikroskopie)	98
4.1.3.3 Kristallorientierungsmessungen (Rückstreuielektronendiffraktometrie) ..	100
4.2 Numerische Simulation des VL-Umschmelzverfahrens	106
4.2.1 Verwendetes Berechnungsprogramm	106
4.2.2 Eigenschaften von IN718 in der schmelzflüssigen Phase	109
4.2.3 Modelltechnische Nachbildung des Realprozesses	109
4.2.4 Kalibrierung der Randbedingungen des Prozessmodells	112
4.2.5 Ergebnisse der Umschmelzsimulation auf Basis realer Prozessdaten	116
4.2.6 Vergleich von simulatorisch ermittelter und realer Blockstruktur	118
4.3 Zwischenfazit aus umschmelzmetallurgischer Sicht	120
5 Untersuchungen zur Beeinflussung des Rohzustandes durch Homogenisieren....	123
5.1 Auswirkungen der Glühung auf die Erstarrungsstruktur	123
5.1.1 Versuchsprogramm und Vorgehensweise	123
5.1.2 Charakterisierung des homogenisierten Zustandes	125
5.1.2.1 Beizscheibenauswertung	125
5.1.2.2 Metallographie (LiMi und ElMi) zur Porositätsermittlung	127
5.1.2.3 Konzentrationsmessungen (ESMA)	132
5.1.2.4 Kristallorientierungsmessungen (EBSD)	136
5.2 Einfluss der Glühbehandlung auf die Umformbarkeit	137
5.2.1 Zugversuche mit unterschiedlicher Probenlage	137
5.2.2 Stauchversuche mit verschiedenen Probenformen und -orientierungen ..	140
5.2.3 Stauchversuche mit angepasstem Probenmaßstab	145
5.3 Zwischenfazit aus wärmebehandlungstechnischer Sicht	150
6 Untersuchungen zum Werkstoffverhalten bei der Primärumformung.....	153
6.1 Versuchsschmiedungen im Produktionsmaßstab	153
6.1.1 Prozessdatenerfassung an der Freiformschmiedepresse	154
6.1.2 Auswertung der Schmiedungen	156
6.1.3 Charakterisierung des geschmiedeten und ausgelagerten Zustandes	158
6.2 Numerische Simulation der Umformvorgänge	163

6.2.1	Verwendetes Berechnungsprogramm	163
6.2.2	Eigenschaften von IN718 in der festen Phase	165
6.2.3	Modellierung eigenschaftsrelevanter Merkmale des Rohzustandes	168
6.2.4	Simulation der Stauchversuche zur Kalibrierung des Materialmodells ...	173
6.2.4.1	Anpassung der Anisotropiekoeffizienten	175
6.2.4.2	Auswahl geeigneter Schädigungskriterien	178
6.2.4.3	Ermittlung kritischer Schädigungswerte.....	183
6.2.5	Reckschmiedesimulation auf Basis realer Prozessdaten.....	185
6.2.5.1	Modelltechnische Nachbildung des Realprozesses	185
6.2.5.2	Simulationsergebnisse zum Schmieden mit Zangenarmen.....	186
6.2.6	Reckschmiedesimulation auf Basis idealisierter Stichplanvorgaben	193
6.2.6.1	Prozessauslegung zur Durchführung von Parameterstudien	193
6.2.6.2	Simulationsergebnisse zum Schmieden mit Zangenbacken.....	198
6.3	Zwischenfazit aus umformtechnischer Sicht.....	207
7	Zusammenfassung und Ausblick	209
7.1	Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Teilprozessen	209
7.2	Ausblick	211
	Literaturverzeichnis	213
	Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	223
	Anhang	231
A	Umschmelzs simulationsparameter	231
B	Schädigungszustand der Stauchproben (makroskopisch)	233
C	Übergangsbereich Rohstruktur – Umformgefüge (mikroskopisch).....	237
D	Fließkurvenanalyse	239
E	Parameter für das Modell der effektiven Spannungen	246
	Bibliographische Beschreibung und Kurzreferat	247
	Abstract	248