

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	ix
Liste der Symbole und Abkürzungen	xiii
Abstract	xx
1 Einleitung	1
2 Stand der Forschung	5
2.1 Ausscheidungshärtung von Aluminiumknetlegierungen	5
2.1.1 Lösungsglühung	6
2.1.2 Abschreckung	6
2.1.3 Warmauslagerung	7
2.2 Thermisch aktivierte Mechanismen und mikrostrukturelle Vorgänge bei der Warmumformung von Aluminium	10
2.2.1 Kristallerholungsvorgänge und Rekristallisation	10
2.2.2 Einfluss der Umformtemperatur auf das plastische Verhalten	11
2.2.3 Portevin-Le Châtelier-Effekt	14
2.2.4 Plastisches Fließverhalten unter hohen dynamischen Lasten	15
2.3 Umformung von Aluminiumknetlegierungen	17
2.4 Pressformhärten von Aluminiumknetlegierungen	17
2.5 Von belastungsangepassten Halbzeugen zu funktional gradierten Bauteilen	20
3 Wissenschaftlicher Arbeitsansatz	23
3.1 Motivation und Zielsetzung	23
3.2 Vorgehensweise	25
3.2.1 Prozess-Eigenschafts-Korrelation beim Pressformhärten von Aluminiumknetlegierungen	25
3.2.2 Einstellung von gradierten Eigenschaften	27
3.2.3 Simulationsgestützte Prozessabbildung und konstitutive Berechnung der Warmfließkurven	27
	ix

4 Experimentelle Methoden, verwendete Materialien und wissenschaftliche Geräte	29
4.1 Versuchseinrichtung	30
4.1.1 Warmzugprüfstand	30
4.1.2 Versuchsfeld	32
4.2 Mechanische Eigenschaften	35
4.2.1 Zugprüfung	35
4.2.2 Härteprüfung	36
4.2.3 Warmfließkurven	36
4.3 Feldmessverfahren	37
4.3.1 Temperaturmessung	37
4.3.2 Digitale Bildkorrelation	38
4.4 Mikrostrukturelle Untersuchung	39
4.5 Modellbildung, Prozesssimulation und konstitutive Gleichungssysteme	40
4.5.1 Modellbildung und Simulation	40
4.5.2 Physikalisch basierte konstitutive Modellierung von Fließkurven zur Beschreibung deformationsinduzierter Phänomene	44
4.6 Verwendete Werkstoffe und Probenaufbereitung	49
5 Prozess-Eigenschafts-Korrelation beim Pressformhärten von Aluminiumknetlegierungen	55
5.1 Einrichtung des Versuchsfeldes	56
5.1.1 Ofenerwärmung	56
5.1.2 Wärmeverlust beim Transfer	57
5.1.3 Kontaktkühlung im Werkzeug	58
5.2 Ermittlung von Prozessfenstern für das Lösungsglühen	60
5.2.1 Einfluss unterschiedlicher Aufheizgeschwindigkeiten	60
5.2.2 Lösungsglühtemperaturen und -zeiten	64
5.2.3 Transferzeit nach dem Lösungsglühen	66
5.2.4 Abkühlgeschwindigkeit	67
5.3 Einfluss unterschiedlicher Umformgrade auf die Ausscheidungskinetik	76
5.3.1 Einfluss der Warmverformung vor der Auslagerung	76
5.3.2 Einfluss der Warmverformung nach Lösungsglühen auf Auslagerung	77
5.4 Fließverhalten bei unterschiedlichen Gefügezuständen	81
5.4.1 Ermittlung der plastischen Instabilität und des Fließverhaltens im W-Temper-Zustand	81
5.4.2 Verformungsverteilung unter statischer Last nach einer Auslagerung	85

5.4.3	Verformungsverteilung unter dynamischer Last nach einer Auslagerung	89
5.5	Prozessfenster bei der Auslagerung	94
5.5.1	Konventionelle Prozessführung bei der Auslagerung	94
5.5.2	Integration einer zweiten Auslagerung als Paint Bake-Prozess	97
5.6	Mikrostrukturuntersuchungen	101
5.6.1	Ausscheidungsverteilung nach Kontaktkühlung im Umformwerkzeug und Warmauslagerung	102
5.6.2	Ausscheidungsverteilung nach Kontaktkühlung mit beheiztem Umformwerkzeug und Warmauslagerung	104
6	Einstellung von gradierten Eigenschaften	109
6.1	Gradierung durch differenzielle Abkühlung	109
6.2	Plastisches Verhalten und logarithmische Dehnungsverteilung der gradierten Gefügestrukturen	112
6.3	Ausscheidungsverteilung nach differenzieller Kühlung	114
7	Virtuelle Prozessanalyse, Modellierung und Validierung	119
7.1	Prozesssimulation und Analyse einer integrierten werkzeuggebundenen Umformung	119
7.1.1	Thermo-mechanische Validierung	119
7.1.2	Fornänderungsverteilung und Materialfluss	122
7.1.3	Dynamische Überlagerung nach Temperaturänderungen	124
7.2	Physikalisch basierte konstitutive Modellierung zur Berechnung von Warmfließkurven	127
7.2.1	Bestimmung der Aktivierungsenergie für die mathematische Modellierung von Warmfließkurven	127
8	Zusammenfassung und Ausblick	141
	Literaturverzeichnis	145
A	Anhang	167
	Abbildungsverzeichnis	173
	Tabellenverzeichnis	180