

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Inhaltsverzeichnis | ix |
| Liste der Symbole und Abkürzungen | xiii |
| Abstract | xx |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Stand der Forschung | 5 |
| 2.1 Ausscheidungshärtung von Aluminiumnetzlegierungen | 5 |
| 2.1.1 Lösungsglühung | 6 |
| 2.1.2 Abschreckung | 6 |
| 2.1.3 Warnauslagerung | 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 Aluminiumnetzlegierungen | 17 |
| 2.4 Pressformhärtung von Aluminiumnetzlegierungen | 17 |
| 2.5 Von belastungsangepassten Halbzeugen zu funktional graduierten Bauteilen | 20 |
| 3 Wissenschaftlicher Arbeitsansatz | 23 |
| 3.1 Motivation und Zielsetzung | 23 |
| 3.2 Vorgehensweise | 25 |
| 3.2.1 Prozess-Eigenschafts-Korrelation beim Pressformhärteten von Aluminiumnetzlegierungen | 25 |
| 3.2.2 Einstellung von graduierten 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 Wärneverlust 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 Umforminggrade auf die Ausscheidungskinetik | 76 |
| 5.3.1 Einfluss der Warmverformung vor der Auslagerung | 76 |
| 5.3.2 Einfluss der Warmverformung nach Lösungsglühung 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 graduierten Eigenschaften | 109 |
| 6.1 | Gradierung durch differenzielle Abkühlung | 109 |
| 6.2 | Plastisches Verhalten und logarithmische Dehnungsverteilung der graduierten 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 | Formänderungsverteilung 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 |