

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Stand der Forschung	3
1.2.1	Thermodynamische Methoden	3
1.2.2	Modellierung der Viskoplastizität	6
1.2.3	Homogenisierung polykristalliner Materialien	8
1.2.4	Modellierung von Kornwachstum und Rekristallisation	9
1.2.5	Modellierung der Ausscheidungsbildung	12
1.3	Zielsetzung und Inhalt der Arbeit	13
1.4	Notation	14
2	Experimentelle Befunde	15
2.1	Werkstoff und Methoden	15
2.2	Ergebnisse	17
3	Kontinuumsmechanik und Thermodynamik	23
3.1	Kinematik	23
3.2	Bilanzgleichungen	26
3.3	Zustandsvariable und konstitutive Größen	28
3.4	Entropieungleichung	31
3.4.1	Methode der Lagrange-Multiplikatoren	32
3.4.2	Auswertung der Entropieungleichung	32
3.4.3	Entropiefluss	35
3.4.4	Thermodynamisches Gleichgewicht und absolute Temperatur	37
3.4.5	Freie Energie und thermodynamische Einschränkungen	39
3.4.6	Abschließende Bemerkungen zur Entropieungleichung	39
4	Materialmodellierung	41
4.1	Innere Variable und freie Energie	41
4.2	Viskoplastizität	49
4.2.1	Fließregel	49
4.2.2	Entwicklung der Verfestigungsvariablen	50
4.2.3	Inelastischer Multiplikator	57
4.2.4	Anfangsfließspannung	62
4.3	Entwicklung der Kornstruktur	64
4.3.1	Kornwachstum	64

4.3.2	Rekristallisation	67
4.4	Ausscheidungsbildung	69
4.4.1	Ausscheidungswachstum	70
4.4.2	Nukleation	72
4.5	Wärmeleitung und Energiebilanz	75
4.5.1	Wärmeleitung	75
4.5.2	Auswertung der Energiebilanz	76
4.6	Implementierung	78
4.6.1	Programmstruktur	78
4.6.2	Lösung der Ausscheidungsgrößenentwicklung	80
4.6.3	Lösung der Korngrößenentwicklung	81
4.6.4	Lösung des elastisch-viskoplastischen Problems	82
4.6.5	Berücksichtigung von Spannungsrandbedingungen	85
4.6.6	Numerische Auswertung der Energiebilanz	86
5	Diskussion des Materialmodells	89
5.1	Einordnung des Modells	89
5.1.1	Umfang und Anwendbarkeit	89
5.1.2	Einordnung in die Literatur	90
5.1.3	Mehrwert des gewählten Ansatzes	91
5.2	Verfestigung und Viskoplastizität	92
5.2.1	Verfestigungsmodell	92
5.2.2	Viskoplastizitätsmodelle	92
5.2.3	Spannungsrelaxation	95
5.2.4	Ausscheidungsverfestigung	98
5.3	Kornwachstum	99
5.3.1	Einordnung in die Literatur	99
5.3.2	Normales Kornwachstum	100
5.3.3	Pinning durch Teilchen	101
5.3.4	Solute Drag	105
5.3.5	Abnormales Kornwachstum	107
5.4	Rekristallisation	108
5.4.1	Statische Rekristallisation	108
5.4.2	Dynamische Rekristallisation	111
5.4.3	Unvollständige Rekristallisationsvorgänge	116
5.5	Ausscheidungsbildung	118
5.5.1	Einordnung in die Literatur	118
5.5.2	Chemische Triebkraft	119
5.5.3	Kinetik	120
5.6	Energetische Betrachtungen	124
5.6.1	Thermoelastizität	125
5.6.2	Plastische Spannungsleistung	127

5.6.3	Phasenumwandlungen	128
5.7	Abschließende Bemerkungen	131
5.7.1	Physikalische Bedeutung der Modellansätze und Parameter	131
5.7.2	Einschränkungen und Grenzen der Anwendbarkeit	132
6	Anwendung des Modells auf den untersuchten Werkstoff	135
6.1	Modellierung der Warmstauchversuche	135
6.2	Parameteridentifikation	135
6.2.1	Vorgehensweise	135
6.2.2	Verfestigungs- und Viskoplastizitätsmodell	136
6.2.3	Anpassung der übrigen Modellparameter	138
6.3	Ergebnisse und Verifikation	140
6.3.1	Fließkurven	140
6.3.2	Korngrößenentwicklung	141
6.4	Weiterführende Ergebnisse	145
6.4.1	Versetzungsdichte	146
6.4.2	Ausscheidungsbildung	146
6.5	Diskussion der Simulationsergebnisse	147
6.5.1	Qualität der Ergebnisse	147
6.5.2	Nutzen und Übertragbarkeit	150
7	Zusammenfassung und Ausblick	153
Anhang		157
A	Thermodynamik von Diffusion und Wärmeleitung	157
A.1	Entropiegleichung	157
A.2	Entropiefluss und Lagrange-Multiplikatoren	159
A.3	Konstitutivmodelle	163
B	Alternatives Modell mit Zerlegung des Deformationsgradienten in jedem Korn	165
B.1	Mikrostrukturmodell und thermodynamische Betrachtungen	165
B.2	Konstitutivgleichungen	166
B.3	Bewertung des Modells	168
C	Numerische Lösung des mechanischen Problems	168
C.1	Integration der Entwicklungsgleichungen	168
C.2	Algorithmische Tangente	171
D	Thermodynamische Daten und Mobilitätsparameter	175
Literaturverzeichnis		179