

FREIBERGER FORSCHUNGSHEFTE
Herausgegeben vom Rektor der TU Bergakademie Freiberg

B 280 Werkstoffwissenschaft/Werkstofffertigungstechnologie

Modellierung der Substrukturentwicklung bei Warmumformung

*Von der Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie
der Technischen Universität Bergakademie Freiberg
genehmigte Dissertation*

vorgelegt von

Dipl.-Phys. Wolfgang Pantleon

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERGAKADEMIE FREIBERG

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Phänomenologie der Warmumformung	3
2.1	Charakteristische Fließkurven	3
2.1.1	Verhalten bei dynamischer Erholung	4
2.1.2	Verhalten bei dynamischer Rekristallisation	5
2.2	Entwicklung der Mikrostruktur	6
2.2.1	Ausbildung einer Substruktur	6
2.2.2	Evidenz für dynamische Rekristallisation	11
3	Modellvorstellungen	13
3.1	Grundlagen der plastischen Verformung	13
3.1.1	Fundamentale Beziehungen	13
3.1.2	Evolution der Versetzungsdichten	17
3.2	Modellierung der dynamischen Erholung	20
3.2.1	Modelle mit einer Strukturvariablen	20
3.2.1.1	Modell von JOHNSTON und GILMAN	20
3.2.1.2	Modell von ESSMANN und MUGHRABI	20
3.2.1.3	Modell von HERTEL	21
3.2.1.4	Modell von ZOUHAR	22
3.2.1.5	Modell von KOCKS	23
3.2.1.6	Modell von BERGSTRÖM und HALLÉN	24
3.2.1.7	Diskussion	25
3.2.2	Modelle mit mehreren Strukturvariablen	26
3.2.2.1	Modell von ESTRIN und KUBIN	26
3.2.2.2	Modell von STÜWE	28
3.2.2.3	Modell von MUGHRABI (Verbundmodell)	30
3.2.2.4	Modell von PRINZ und ARGON	33
3.2.2.5	Modell von NIX, GIBELING und HUGHES	34
3.2.2.6	Modell von ZEHETBAUER	36
3.2.2.7	Weitere Modelle	37
3.3	Modellvorstellungen für dynamische Rekristallisation	39
3.3.1	Notwendige Voraussetzungen für die Rekristallisation	39
3.3.2	Modellvorstellungen für die Keimbildung	39
3.3.2.1	Initiierung nach BAILEY und HIRSCH	40
3.3.2.2	Keimbildung nach ROBERTS und AHLBLOM	41
3.3.2.3	Subkornkoaleszenz nach HU und LI	42
3.3.2.4	Anomales Subkornwachstum	43
3.3.3	Modelle der dynamischen Rekristallisation	43
3.3.3.1	Modell der charakteristischen Dehnungen	43
3.3.3.2	Modell von STÜWE und ORTNER	44
3.3.3.3	Modell der relativen Korngrößen	45
3.3.3.4	Modell von SANDSTRÖM und LAGNEBORG	46
3.3.3.5	Modell von KAPTSAN <i>et al.</i>	47

4	Ausgangspunkt und offene Probleme	49
4.1	Rekristallisation von Einkristallen	49
4.2	Modelle für Instabilitäten	52
4.2.1	Modell von BOČEK	52
4.2.2	Modell der auslösenden Instabilität	55
4.3	Offene Probleme der Keimbildung	55
5	Modellbildung	59
5.1	Vorbemerkungen	59
5.1.1	Gegenstand der Modellierung	59
5.1.2	Experimentelle Befunde an Kupfer-Einkristallen	59
5.1.3	Anforderungen an das Modell	63
5.2	Modell der Versetzungsevolution	64
5.2.1	Grundlegende Annahmen	64
5.2.1.1	Gleitsysteme	64
5.2.1.2	Versetzungsdynamik	65
5.2.1.3	Inhomogene Versetzungsanordnung	67
5.2.1.4	Zellstruktur	68
5.2.1.5	Geometriefaktor	68
5.2.2	Festlegung der relevanten Variablen	69
5.2.2.1	Stufenversetzungen	69
5.2.2.2	Schraubenversetzungen	70
5.2.2.3	Leerstellen	71
5.2.3	Darstellung der einzelnen Elementarprozesse	71
5.2.3.1	Versetzungsakkumulation in den Zellwänden	71
5.2.3.2	Bildung von Leerstellen	73
5.2.3.3	Reduktion der Leerstellen	73
5.2.3.4	Annihilation der Stufenversetzungen	74
5.2.3.5	Annihilation der Schraubenversetzungen	75
5.2.4	Zusammenfassung der Formeln	79
5.2.5	Diskussion des Ansatzes von ARGON und HAASEN	79
5.3	Modell der Desorientierungsbildung	81
5.3.1	Modell der linearen Zellkette	81
5.3.2	Kontinuierliche Absorption	81
5.3.3	Versetzungsströme	84
5.3.4	Evolutionsgleichungen	85
5.3.5	Mathematischer Lösungsweg	86
5.3.6	Vorgabe von Deformationsprofilen	88
5.3.7	Geometrisch notwendige Versetzungen von ASHBY	93
5.3.8	Erweiterung des Modells	94

6	Resultate und Diskussion	97
6.1	Simulation der Versetzungsevolution	97
6.1.1	Untersuchung des Lösungsverhaltens	97
6.1.2	Diskussion des Stabilitätsverhaltens	101
6.1.3	Anmerkungen zum Verhalten von Aluminium	104
6.1.4	Verformungsverhalten	107
6.2	Simulation der Desorientierungsbildung	111
6.2.1	Inhomogene Einfanglängen	111
6.2.2	Keimbildung der DRX in Einkristallen	114
6.2.3	Inhomogene Ausgangsstruktur	114
7	Experimente an Kupfer-Einkristallen	119
7.1	Experimentelle Details	119
7.1.1	Probenmaterial	119
7.1.2	Fließkurven	119
7.1.3	Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahmen	122
7.2	Häufigkeitsverteilung der Desorientierungen	123
7.2.1	EBSP-Verfahren	123
7.2.2	Resultate	123
7.2.3	Versetzungsdichten	126
7.2.4	Vergleich mit Messungen von ORLOVÁ und BOČEK	127
7.3	Vergleich mit Simulationsergebnissen	127
7.3.1	Ausgangspunkt	127
7.3.2	Vergleich der Resultate	128
8	Zusammenfassung	131
	Anhang	135
A	Mikroskopische Verformungsgrößen	135
B	Lösungen der Modelle einer Strukturvariable	137
C	Lineare Stabilitätsanalyse	139
D	Beitrag des Zellinneren	143
E	Ergänzung zum Diffusionsproblem	147
F	Desorientierungsverteilungsfunktion	151
G	Ergebnisse des Modells der linearen Zellkette	153
	Literaturverzeichnis	157
	Abbildungsverzeichnis	165
	Abkürzungsverzeichnis	167