

Dipl.-Ing. Jörg Wunder, Nürnberg

# **Mikrostrukturelle Beschreibung der Warmfestigkeit ferritischer Superlegierungen**

Reihe **5**: Grund- und Werkstoffe

Nr. **510**

---

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Experimentelles	3
2.1	Probenmaterial	3
2.1.1	ODS-Werkstoff PM 2000	3
2.1.2	Teilchenfreie Matrixmaterialien	5
2.2	Verformungsversuche	6
2.2.1	Weggesteuerte Verformungsversuche	6
2.2.1.1	Druckversuche	7
2.2.1.2	Zugversuche	7
2.2.2	Kraftgesteuerte Versuche	10
2.2.2.1	Druckversuche	10
2.2.2.2	Zugversuche	10
2.3	Mikrostrukturelle Untersuchungen	11
2.3.1	Lichtmikroskopie	11
2.3.2	Rasterelektronenmikroskopie	12
2.3.3	Transmissionselektronenmikroskopie	12
2.3.3.1	TEM - Proben	12
2.3.3.2	Foliendickenbestimmung	12
2.3.3.3	Bestimmung der mikrostrukturellen Größen	13
2.4	Einkristallverformung	16
3	Theoretische Grundlagen	17
3.1	Einleitung	17
3.2	Kriechverhalten einphasiger Werkstoffe	18
3.2.1	HAI-Modell	18
3.2.2	Verbundmodell	24

3.3	Kriechverhalten teilchengehärteter Werkstoffe	28
3.3.1	Das Schwellenspannungskonzept	28
3.3.2	Teilchenüberwindungsmechanismen	29
3.3.2.1	Der Orowanmechanismus	30
3.3.2.2	Klettermodelle	32
3.3.2.3	Interfacial Pinning	35
3.3.3	Überlagerung von Hindernissen	38
4	Hochtemperaturverformung einphasiger Legierungen	41
4.1	CERT-Druckversuche an Kanthal A1	41
4.2	Verformungsversuche an reinem $\alpha$ -Eisen	45
4.3	Stationäre Verformung von Kanthal A1	46
5	Verformungsverhalten von PM 2000	51
5.1	Hochtemperaturverformungsversuche	51
5.1.1	Monotone Verformung von PM 2000	51
5.1.1.1	CERT-Versuche an PM 2000 Plattenmaterial	51
5.1.1.2	Kriechversuche an PM 2000 Plattenmaterial	55
5.1.1.3	CERT-Versuche an PM 2000-Stabmaterial	56
5.1.2	Geschwindigkeitswechselversuche	69
5.1.3	Streckgrenzen von PM 2000	71
5.1.3.1	Temperaturabhängigkeit	71
5.1.3.2	Dehnratenabhängigkeit	74
5.1.3.3	Dehnratenabhängigkeit des Teilchenhärtungsbeitrages	75
5.1.4	Stationäre Verformung von PM 2000	83
5.2	Gegenüberstellung der beiden PM 2000-Halbzeuge	88
5.2.1	Orientierungsunterschied	88
5.2.2	Chemische Zusammensetzung	90
5.2.3	Teilchengefüge	90
5.2.4	Korngrenzgleitung	96
5.2.5	Diffusionsfließen	98
5.2.6	Deformationsaktiver Volumenbruchteil	103
6	Mikrostruktur	109
6.1	Charakterisierung des Ausgangszustandes	109
6.1.1	Teilchenfreie Referenzlegierungen	109
6.1.1.1	Reines $\alpha$ -Eisen	109
6.1.1.2	Kanthal A1	110

---

6.1.2	PM 2000	114
6.1.2.1	Plattenmaterial	114
6.1.2.2	Stabmaterial	116
6.2	Mikrostruktur in Abhängigkeit von der Verformung	118
6.2.1	Dehnungsabhängigkeit	118
6.2.1.1	Versetzungsdichte als Funktion der Dehnung	119
6.2.1.2	Versetzungsabstand $s$ in der Subkorngrenze	121
6.2.1.3	Volumenanteil $f_{\text{sub}}$ an Substruktur	124
6.2.2	Spannungsabhängigkeit	128
7	Mikromechanische Modellierung	131
7.1	Ermittlung der wahren Aktivierungsfläche $\Delta a^*$	131
7.1.1	Experimentelle Bestimmung	132
7.1.2	Spannungsabhängigkeit von $\Delta a^*$	133
7.2	Angewandte Modellierung	139
7.2.1	Modellierung von Kanthal A1	139
7.2.1.1	Modellierung der stationären Verformung	139
7.2.1.2	Modellierung von monotonen Verformungskurven	141
7.2.2	Modellierung von PM 2000-Platte	143
7.2.2.1	Modellierung der stationären Verformung	143
7.2.2.2	Modellierung der monotonen Verformungskurven	145
7.2.3	Haltezeitenmodellierung der stationären Verformung von PM 2000-Stab und Platte	149
8	Zusammenfassung	153
9	Anhang	155
9.1	Thermische Ausdehnungskoeffizienten	155
9.2	Elastische Konstanten und Schubmodul	156
9.3	Materialkenngrößen	157
9.3.1	Burgersvektor	157
9.3.2	Volumendiffusionskoeffizient	158
9.4	Verformungsversuche	159
9.4.1	Reines $\alpha$ -Eisen	159
9.4.2	Kanthal A1	159
9.4.3	PM 2000-Platte	162
9.4.4	PM 2000-Stab	166
9.4.5	Temperaturabhängigkeit der Streckgrenzen	168

---

9.5	Mikrostruktur	169
9.5.1	Mikrostrukturelle Kenngrößen	169
9.5.1.1	Kornstruktur	169
9.5.1.2	Versetzungsstruktur	169
9.5.1.3	Versetzungssubstruktur	171
9.5.2	'Mikrostrukturelle' Fitparameter	172
9.5.2.1	Versetzungsstruktur	172
9.5.2.2	Versetzungssubstruktur	173
9.6	Texturuntersuchungen	173
10	Literatur	175