

Dipl.-Ing. Martin Meyer ter Vehn, Baden

**Unterkühlungsbedingte
Gefügeinhomogenitäten
einkristallin erstarrter
Turbinenschaufeln**

Reihe **5**: Grund- und Werkstoffe Nr. **516**

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	VII
1 Motivation und Zielsetzung	1
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Aktueller Stand der Turbinentechnik	3
2.1.1 Flugtriebwerkstechnik	3
2.1.2 Kraftwerkstechnik	8
2.1.3 Kurz- und mittelfristige Trends im Bereich der Gießtechnik	12
2.2 Einkristalline Turbinenschaufeln	13
2.2.1 Technische Vorteile einkristalliner Turbinenschaufeln	13
2.2.2 Der Herstellungsprozeß	16
2.2.2.1 Das Bridgman-Verfahren	18
2.2.2.2 Verfahrensmodifikationen	22
2.2.3 Herstellungsbedingte Gefügefehler	26
2.3 Unterkühlung und einkristalline Erstarrung	32
2.3.1 Wachstumsunterkühlung und thermische Unterkühlung	32
2.3.2 Makroskopische Krümmung der Liquidus-Isotherme	38
2.3.3 Einfluß der thermischen Unterkühlung auf das Gefüge	42
2.3.4 Modelle zur Beschreibung thermischer Unterkühlungsphänomene	44
2.3.4.1 Gleichgewichts-Modelle	46
2.3.4.2 Ungleichgewichts-Modell auf Basis des FEM-Programms CASTS	48
2.3.4.3 Ungleichgewichts-Modell auf Basis eines Zellularen Automaten	49
3 Experimentelle Methodik	56
3.1 Zielsetzung und Vorgehensweise	56
3.2 Erstarrungssimulation	58
3.3 Formschalenherstellung	60
3.4 Vakuum-Bridgman-Anlage	61
3.5 Meßwerterfassung	61
3.5.1 Temperaturmessung	61
3.5.2 Datenerfassung und -darstellung	62
3.5.2 Rekonstruktion der Liquidus-Isotherme	63
4 Legierungscharakterisierung CMSX-6	70
4.1 Liquidus- und Solidustemperatur	70
4.2 Erstarrungsfrontmorphologie	73
4.3 Abhängigkeit des Dendritenachsabstandes von den Erstarrungsparametern	74
4.4 Seigerungsverhalten	76

4.5	Maximale Unterkühlbarkeit	78
4.5.1	Levitationsversuche	80
4.5.2	Sessile-Drop-Versuche	81
4.5.3	Unterkühlungsversuche in keramischen Formschalen	81
5	Unterkühlungsbedingte Gefügeinhomogenitäten	87
5.1	Extreme Querschnittsübergänge in geometrisch einfachen Proben	87
5.1.1	Geometrie- und Versuchsbeschreibung	88
5.1.2	Qualitative Gefügeauswertung	91
5.1.3	Auswertung der Temperaturdaten und Korrelation mit dem Gefüge	96
5.1.3.1	Abkühlraten, Gradienten und Erstarrungsgeschwindigkeiten	96
5.1.3.2	Rekonstruktion der Liquidus-Isotherme	100
5.1.3.3	Höhe der Unterkühlung und Unterkühlungsdauer	105
5.1.3.4	Rekaleszenz und Erstarrungszeit	108
5.1.4	Diskussion der Ergebnisse	110
5.2	Einkristalline Erstarrung vereinfachter Flugzeugturbinenschaufeln	113
5.2.1	Geometriebeschreibung	113
5.2.2	Identifizierung kritischer Bauteilbereiche mittels Erstarrungssimulation	115
5.2.3	Versuchsbeschreibung	117
5.2.4	Inneres Deckband: Temperatur- und Gefügeauswertung	121
5.2.5	Äußeres Deckband	123
5.2.5.1	Temperaturauswertung	123
5.2.5.2	Gefügeauswertung	125
5.2.6	Einfluß variierter Absenkgeschwindigkeiten	127
5.2.6.1	Temperaturauswertung	127
5.2.6.2	Gefügeauswertung	128
6	Schlußfolgerungen und Ausblick	134
7	Literatur	137