

Dipl.-Ing. Klaus-Dieter Stein, Fürth

**Zeitstandverhalten  
und Mikrostruktur  
langzeitbeanspruchter  
Superlegierungen**

Reihe **5**: Grund- und Werkstoffe

Nr. **428**

# Inhaltsverzeichnis

<b>Symbole</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Werkstoffbeschreibung und Probenmaterial</b>	<b>3</b>
2.1 Das Phasengefüge von Superlegierungen . . . . .	5
2.2 Phasen in IN 738 LC . . . . .	5
2.2.1 Majorphasen . . . . .	5
2.2.2 Minorphasen . . . . .	6
2.3 Gefügevorgänge in IN 738 LC . . . . .	7
2.3.1 Änderungen der $\gamma'$ -Ausscheidungsphase . . . . .	7
2.3.2 Änderungen im Karbidgefüge . . . . .	9
<b>3 Experimentelles</b>	<b>11</b>
3.1 Verformungsversuche . . . . .	11
3.1.1 Kontinuierlich gemessener Kriechversuch . . . . .	11
3.1.2 Unterbrochener Zeitstandversuch nach DIN 50118 B . . . . .	12
3.1.3 CERT-Versuche . . . . .	13
3.2 Zugversuche zur Ermittlung des Werkstoffversagens . . . . .	15
3.3 Mikrostrukturelle Untersuchungsmethoden . . . . .	16
3.3.1 Probenpräparation . . . . .	16
3.3.2 Licht- und Rasterelektronenmikroskopie . . . . .	16
3.3.3 Transmissionselektronenmikroskopie . . . . .	18
<b>4 Kriechverhalten bei hoher Temperatur</b>	<b>19</b>
4.1 Verformungsverhalten einphasiger Werkstoffe . . . . .	19
4.1.1 Das stationäre Kriechen . . . . .	20

4.1.2	Beschreibung der Kriechkurve . . . . .	23
4.2	Kriechverhalten teilchenhaltiger Legierungen . . . . .	24
4.2.1	Teilchenüberwindungsmechanismen . . . . .	24
4.2.2	Abhängigkeit der Schneidspannung von der Teilchengröße . . . . .	29
4.2.3	Teilchenüberwindung bei hoher Temperatur . . . . .	32
<b>5</b>	<b>Das Isostrukturellenmodell</b>	<b>35</b>
5.1	Das Kriechverhalten bei instabilem Mikrogefüge . . . . .	35
5.1.1	Die Kriech- oder Zeitstandkurve . . . . .	35
5.1.2	Das Norton-Diagramm . . . . .	36
5.1.3	Das Zeitstanddiagramm . . . . .	36
5.2	Anwendung auf IN 738 LC . . . . .	38
5.2.1	Isostrukturellenkonstruktion an Kriechkurven . . . . .	38
5.2.2	Verformungsversuche an isostrukturell vorverformtem Material . . . . .	38
5.2.3	Beschreibung des Verlaufes der Isostrukturellen . . . . .	40
5.3	Diskussion der isostrukturellen Kriecheigenschaften . . . . .	42
<b>6</b>	<b>Anwendung des Isostrukturellenmodells</b>	<b>43</b>
6.1	Das Zeitstanddiagramm . . . . .	43
6.1.1	Zeitstandverhalten . . . . .	43
6.1.2	Das Zeitstandverhalten von IN 738 LC . . . . .	46
6.2	Das Zeitdehngrenzendiagramm . . . . .	50
6.2.1	Zeitdehngrenzenverhalten . . . . .	50
6.2.2	Beziehung zwischen Zeitdehngrenzen und Kriechdaten . . . . .	51
<b>7</b>	<b>Mikrostrukturelle Modellierung</b>	<b>53</b>
7.1	Grundzüge der HAI-Modellierung bei homogener Versetzungsstruktur . . . . .	53
7.1.1	Modellierung der stationären Verformung . . . . .	54
7.1.2	Das primäre Übergangskriechen einphasiger Werkstoffe . . . . .	54
7.2	Modellierung mit dem Verbundmodell bei heterogener Versetzungsstruktur . . . . .	56
7.2.1	Darstellung des Verbundmodells . . . . .	56
7.2.2	Formale Betrachtung der Dehnungen im Verbundmodell . . . . .	58

7.2.3	Das weiche Subkorninnere . . . . .	58
7.2.4	Die harte Subkorngrenze . . . . .	59
7.3	Modellierung teilchenhaltiger Legierungen . . . . .	59
7.3.1	Konventionelles $\sigma_p$ -Konzept . . . . .	59
7.3.2	Modifiziertes $\sigma_p$ -Konzept . . . . .	60
7.3.3	Interpretation teilcheninduzierter Versetzungen . . . . .	62
7.4	Modellierung von teilchenhaltigen Legierungen mit instabilem Gefüge . . .	63
7.4.1	Änderungen im Minorphasengefüge – Negatives Kriechen . . . . .	63
7.4.2	Änderungen im Majorphasengefüge: $\gamma'$ -Vergrößerung . . . . .	63
7.4.3	Einfluß der Gefügeänderung auf $\sigma_p^*$ . . . . .	63
7.4.4	Einfluß der Gefügeänderung auf die Versetzungsdichte $\rho_m$ . . . . .	65
7.4.5	Einfluß der Gefügeänderung auf $\sigma_{pe}$ . . . . .	66
7.5	Anwendung des Verbundmodells . . . . .	68
7.5.1	Der weiche Bereich . . . . .	72
7.5.2	Der harte Bereich . . . . .	72
7.6	Vorgehensweise des Modellierens . . . . .	74
7.6.1	Parameter der Orowangleichung . . . . .	74
7.6.2	Stationäres – quasistationäres Kriechen . . . . .	74
7.6.3	Modellierung des Kriechverhaltens bis zum Kriechminimum . . . . .	77
7.6.4	Bestimmung der Größen im harten Bereich . . . . .	77
<b>8</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b> . . . . .	<b>79</b>
8.1	Kurzzeit-Kriechversuche . . . . .	79
8.2	Die Spannungs-Dehnungskurve von Kurzzeitversuchen . . . . .	82
8.2.1	Die Streckgrenze . . . . .	82
8.2.2	Die Fließspannung . . . . .	82
8.3	Langzeitkriechversuch . . . . .	84
8.3.1	Gesamtergebnis der Modellierung . . . . .	88
8.3.2	Diskussion zur Anwendung des Verbundmodells . . . . .	91
8.4	Anwendung einer Modellierung . . . . .	92
<b>9</b>	<b>Das tertiäre Kriechen</b> . . . . .	<b>93</b>

9.1	Theoretische Betrachtung zum Versagen des Werkstoffes . . . . .	95
9.1.1	Porenwachstum durch Korngrenzendiffusion . . . . .	95
9.1.2	Porenwachstum durch Oberflächendiffusion . . . . .	96
9.1.3	Porenwachstum durch Power-Law-Kriechen . . . . .	96
9.1.4	Behindertes Porenwachstum . . . . .	96
9.2	Modellierung des tertiären Kriechens . . . . .	97
9.3	Das tertiäre Kriechen von IN 738 LC . . . . .	98
9.3.1	Betrachtung der Korngrenzen . . . . .	99
9.3.2	Vergleich Rißparameter - Schädigungsparameter . . . . .	100
9.3.3	Schädigung durch Korrosion . . . . .	101
9.4	Modellierung der gesamten Kriechkurve . . . . .	102
9.5	Zundertheorie . . . . .	107
9.6	Zundern von IN 738 LC . . . . .	107
9.7	Diskussion des Schädigungsparameters . . . . .	108
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>109</b>
<b>11</b>	<b>Anhang</b>	<b>115</b>
11.1	Daten zu IN 738 LC . . . . .	115
11.1.1	Thermischer Ausdehnungskoeffizient . . . . .	115
11.1.2	Der Schubmodul G . . . . .	116
11.1.3	Reifungskonstante der $\gamma'$ -Teilchenvergrößerung . . . . .	116
11.1.4	Parameter des „Negativen Kriechens“ . . . . .	116
11.2	Das stationäre Kriechen der Matrix (Nimonic 75) . . . . .	117
11.3	Modellierungsgrößen . . . . .	118
11.3.1	Größen des weichen Bereiches der Verbundmodellierung . . . . .	118
11.3.2	Größen des harten Bereiches der Verbundmodellierung . . . . .	120
11.4	Parameter der Entwicklung der Versetzungsstruktur . . . . .	121
11.5	Parameter der Isostrukturellen . . . . .	122
11.6	Abnahme der Schneidspannung mit dem Teilchendurchmesser . . . . .	122
	<b>Literatur</b>	<b>123</b>