

## Schlußbetrachtung

In abschließenden Gedanken zum Gegenstand dieses Buches soll versucht werden, auf der Basis des derzeitigen Kenntnisstandes Perspektiven der wissenschaftlichen und technologischen Weiterentwicklung anzudeuten.

Als Voraussetzung für einen wissenschaftlichen Beitrag zum technologischen Fortschritt erscheint die methodische Entwicklung einer komplexen Diagnose von Werkstoffen, die wesentlich über die Aufnahme von Zeit-Dehnungs-Kurven hinausgeht. Die praktisch eingesetzten Materialien sind nicht so einfach aufgebaut bzw. vorbehandelt, als daß man unter Verwendung einer Grundgleichung und tabellierter Materialkonstanten ihr Verhalten unter Betriebsbedingungen voraussagen könnte. Die Möglichkeiten zur Formulierung einer einheitlichen und umfassenden "Zustandsgleichung" (engl.: equation of state) der Hochtemperaturplastizität vom Typ

$$f(\dot{\varepsilon}, \sigma, T, S) = 0$$

sind daher begrenzt ( $S$  bedeutet den schon in Abschn.1.1. eingeführten allgemeinen Strukturparameter).

In technisch eingesetzten Werkstoffen läuft eine größere Anzahl von elementaren, z.T. voneinander abhängigen Verformungs- und Gefügeänderungsprozessen teils nebeneinander, teils nacheinander ab. Er führt zur Formänderung und letztlich zum Bruch; stationäre Zustände werden selten erreicht. Diese Einsicht bedeutet, daß eine Prognose des Verhaltens unter Langzeitbedingungen (insbesondere bei variablem

Lastprogramm) schwierig und fehlerbehaftet ist. Analoges gilt für eine Vorhersage über das Verhalten bei Warmformgebung im Fertigungsprozeß. Daß eine solche Form der Materialbeherrschung aussichtslos ist, kann dennoch nicht behauptet werden.

Im Prinzip kann eine Aussage über die Verformungsgeschwindigkeit eines Materials, welches mit einer von der Vorbehandlung her übernommenen Struktur  $S_0$  eingesetzt wurde, für jeden späteren Verformungszustand  $\varepsilon$  aus einer Integration gewonnen werden:

$$\dot{\varepsilon}(\varepsilon) = \dot{\varepsilon}(\sigma, T, S_0) + \int_0^{\varepsilon} \left( \frac{\partial \dot{\varepsilon}}{\partial S} \cdot \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} \right) d\varepsilon.$$

Der zweite Term rechts beschreibt dabei die akkumulierten strukturellen Änderungen  $\partial S / \partial \varepsilon$  während dieser Verformung und gewichtet diese je nach ihrem Einfluß auf die gesuchte Verformungsrate,  $\partial \dot{\varepsilon} / \partial S$ . Die strukturellen Änderungen hängen z.T. primär von laufenden Formänderungen ab, z.T. laufen sie auch ohne jede simultane Verformung zeitabhängig ab. Wir erkennen in dieser Aufteilung die in Kap.4 behandelte Aufteilung in Verfestigungs- und Erholungsprozesse wieder und beschreiben sie durch

$$dS = (\partial S / \partial \varepsilon) d\varepsilon + (\partial S / \partial t) dt.$$

Damit nimmt die Gleichung, welche eine Langzeitprognose des Werkstoffverhaltens beschreibt, formal die Gestalt:

$$\dot{\varepsilon}(\varepsilon) = \dot{\varepsilon}(\sigma, T, S_0) + \int_0^{\varepsilon} \frac{\partial \dot{\varepsilon}}{\partial S} \left[ \left( \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial S}{\partial t} \right) \dot{\varepsilon}^{-1} \right] d\varepsilon$$

an. Ob man mit einem derartigen Ausdruck praktisch viel weiter kommt, ist heute weniger eine Frage der Berechenbarkeit als des Informationsstandes über die strukturellen Terme des Integranden. Man muß dabei bedenken, daß das Integral sich letztlich als eine Summe von Teilintegralen darstellt, welche sich jeweils auf einen spezifischen Strukturparameter beziehen: Versetzungsdichte, Subkorndurch-

messer, Korngröße, Kornform, Ausscheidungsverteilung, Matrixzusammensetzung, Porosität usw. Ohne die Erfassung und Verwertung dieser Eingabedaten verbleibt die Beherrschung der Hochtemperaturplastizität eines Werkstoffes auf einem völlig unbefriedigenden Niveau. Hier stellt sich also die Aufgabe, unter Verwertung der umfangreichen Erfahrungen aus dem Schrifttum (Kap.2 und 3) experimentelle Pionierarbeit in das Stadium routinemäßiger Werkstoffprüfung zu überführen, wobei die Programmierung der optimalen Abfolge und der Bedingungen der Einzelmessung wesentlich ist.

Aus einer Datenerfassung zum gegebenen Zeitpunkt oder zu einer Folge von Zeitpunkten auf das Werkstoffverhalten unter anderen Versuchsparametern bzw. zu größeren Zeiten zu schließen, erfordert jedoch mehr: Diese Aufgabe verlangt die quantitative Verknüpfung der Meßwerte zu funktionalen Abhängigkeiten, insbesondere Zeitfunktionen. Dies kann zwar im Prinzip durch formale Hochrechnungen erfolgen; aus einem "Ist-Punkt" für einen gegebenen Werkstoffzustand wird sich dann stets ein Aussageband entwickeln, dessen Streubreite oder Unsicherheit in der Vorhersage um so größer wird, je weiter sich der abgefragte Zustand vom Ausgangszustand entfernt. Schließlich wird die Unsicherheit so groß, daß die Vorhersage wertlos wird.

Dieses Auseinanderfächern der Aussagesicherheit kann entscheidend reduziert werden, wenn die Verknüpfung der Daten nicht durch formale Funktionen, sondern durch Ansätze erfolgt, welche aus experimentell geprüften theoretischen Modellen abgeleitet sind. In der Bereitstellung und Verbesserung von Informationen über realistische Verläufe von  $\partial \dot{\epsilon} / \partial S$ ,  $\partial S / \partial \epsilon$  und  $\partial S / \partial t$  liegt der entscheidende Beitrag der Grundlagenforschung zur Beherrschung des technologischen Problems Hochtemperaturplastizität.

Es ist absehbar, daß die verbesserten Möglichkeiten zur Prüfung und zur daraus hergeleiteten Berechnung des Verhaltens warmfester Werkstoffe einhergehen werden mit Verbesserungen der Werkstoffeigenschaften überhaupt. Hierzu wird die Erweiterung des Spektrums eingesetzter Werkstoffe (Beispiel:  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) ebenso gehören wie die

Perfektionierung bereits üblicher Werkstoffe, und zwar sowohl durch immer bessere Fertigungskontrolle und damit Steigerung der Zuverlässigkeit als auch durch verbesserte Legierungstechnik und thermomechanische Vorbehandlung. Die Diskussion der sich hier bietenden Möglichkeiten überschreitet jedoch die Thematik dieses Buches. Daß der technologische Fortschritt auch in diesem Bereich der Werkstoffentwicklung durch die planmäßige Verwertung wissenschaftlicher Erkenntnisse über die Grundvorgänge entscheidend gefördert wird, ist unbestreitbar.

# Werkstoffverzeichnis

- Al, Al-Legierungen 76, 84, 86/88, 92, 98, 110, 129, 132, 134/135, 141, 159, 162, 171/174, 198, 211/215, 219/220
- Al: SAP 146, 163
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 93, 95, 97, 117, 229
- Ag, Au 81, 113
- Be 76, 229
- BeO 229
- Co, Co-Legierungen 114, 146, 152
- CoO 118/120
- Cu 70, 71, 78, 80, 81, 82, 84, 91, 99, 101, 110, 113, 125, 135, 143, 194/195, 198, 211, 218, 229/230
- Cu-Zn, speziell Ms 107, 110, 111, 113, 116, 125, 197, 223
- Cu-Legierungen 81, 101, 113, 163, 214, 220
- Cr 110
- Fe 72, 74, 80, 81, 82, 94, 125, 139, 143, 196, 262
- Fe-Al, Fe-Si 83, 95, 97, 111, 116, 141, 216
- Fe-Mo 87, 94, 108, 111, 147, 162
- FeO 118/121
- Fe: Ferrit. Stähle 71, 76, 114, 127, 135, 143, 162, 165, 171, 178, 198, 210, 218
- Fe: Austenit. Stähle 74, 75, 80, 82, 127, 129, 141, 143, 159, 177
- Ge, Si 138, 143, 283
- In, InSb 87, 283
- Mg, Mg-Legierungen 76, 111, 129, 132, 161/162, 173, 194, 229
- MgO 57, 116, 117ff, 133, 135, 139, 143/144, 258
- Mo, Nb, Re, Ta, W 76, 91, 110/111, 135, 143, 146/147, 159, 197
- NaCl, LiF 76, 83, 91, 99/100, 102, 110, 118, 134/135, 140, 143, 229, 283
- Ni 72/74, 83, 87, 95, 113, 125, 177, 195, 198, 210, 213, 222, 258
- Ni-Cr 74, 75, 80, 146, 174, 177

Ni, NiCr, -TD 146, 153/155,  
159, 160, 163, 167, 172

Ni-Au, Ni-Co, Ni-Fe, Ni-Pd  
70, 71, 81, 84, 101, 107,  
109, 113, 211, 213, 214

Ni-Legierungen, sonstige 74, 76,  
146, 152, 161, 166, 190,  
195, 207, 220

Pb 87

Pt 87/88

SiC 105, 230

Ti 184  
TiO<sub>2</sub> 84

UO<sub>2</sub> 98, 118ff, 121ff

UO<sub>2</sub>-Mo-Cermet 165, 175

V 97, 99

Zn 72, 73, 74

Zr-Legierung 230

# Sachverzeichnis

- Äquikohäsionstemperatur 127
- Akkommodationsprozesse 124, 130/131, 224
- Aktivierungsarbeit 96
  - analyse 42
  - energie 17f, 21, 56f, 90, 92ff, 106, 162, 265
  - energie der Warmverformung 212/213
  - fläche 96, 265/266, 269ff, 272/273
  - volumen 54, 87, 96, 107, 115, 188, 265
- Andrade-Chalmers-Vorrichtung 33
- Anfangsdehnung 1, 70
- Anfangskriechrate 73
- Anisotropie des Kriechens von Einkristallen 134
- Anrisse 194, 198
- Antiphasengrenzfläche 151
- Arrhenius-Funktion 2, 17, 90, 263
- Ashby-Diagramme 257/258
- Ausbauchung von Druckproben 8
- Ausheilbehandlung 207
  
- Biegeversuch (3, 4-Schneiden) 9ff, 14
  
- Bikristalle 130
- Boltzmann-Funktion 263
- Bruch, inter/transkristallin 194, 200
  
- Coble-Kriechen 230
- Curie-Temperatur 94
  
- Dehngrenzlinie (Def.) s. Zeitdehngrenze 20
- Dehnung (Def.) 6, 7, 24
- Diffusionskoeffizient 92, 119
- Dipole 115, 292
- Dip-test (Stufenrelaxation) 141
- Drehmoment 14, 18
- Druckerweichungsversuch 55ff
- Druckfeuerbeständigkeit 55
- Duktilität 176, 177, 221
- Duktilitätsminimum 178, 205, 220
- DVM-Kriechgrenze 25, 192
  
- Elastizitätsmodul 95, 107, 111
- Erholung 253, 259, 260, 277, 284, 300
  - dynamische 216f, 280
- Erholungstheorien 254ff, 258ff, 291

- Erzeugungsrate v. Versetzungen 252, 281
- Eutektika 174/175
- Extensometer 31, 37
- Extrapolation von Zeitstandwerten 187ff
- Faltungen an der Oberfläche 131
- Faserverstärkung 172ff
- Fehlordnung (Ionenkristalle) 118
- Fernordnung 116
- Fließspannung 211ff
- Formänderungsfestigkeit 49
- Frank- v. Mises-Kriterium 131
- Frank-Read-Quellen 291
- Gleitbänder 134
- Gleitsysteme 131ff
- Grain aspect ratio 160
- Grundgleichungen (Tabelle) 254
- Härtung, sekundäre von warmfesten Stählen 169
- Hydrostat. Druck (Meßverfahren) 40
- Inkubationszeit 206
- Innere Spannung, s. Spannung
- Intermetallische Verbindungen 121
- Jogs 115, 293ff
- Keilrisse 198, 200
- Kerbwirkung 31
- Klettertheorien 254ff, 289
- Klettern v. Stufenvers. 285ff
- Kornform 58ff, 123
- Korngrenzgleitung 103/104, 124, 130/131, 159/160
- Beitrag zur Reißbildung 181ff
- und Superplastizität 224
- Korngrenzen-Kriechen (Coble) 230
- Korngrenzenwanderung 124
- Korngröße 58ff, 101ff
- Kornwachstum 229
- Kriechbruchdehnung 176, Abh. von T 180
- Kriechen
- diffusionsgesteuertes 227
- Korngrenzen- 230
- logarithmisches 77ff
- Nabarro-Herring- 76, 82, 105, 227ff, 287
- quasistationäres 283
- stationäres 2, 28, 79, 282
- tertiäres 80ff
- Übergangs- 281, 284
- Larson-Miller-Parameter 189/190
- Laufweg von Versetzungen 144
- Lastwechselverfahren 261
- Leerstellen (Ionenkristalle) 116
- Leerstellen-Übersättigung 296/297
- Manson-Haford-Parameter 191
- Maschenbildung (knitting) 136, 144
- Meßeinheiten, Umrechnung 13, 16, 17
- Mischkristall-Einfluß 109ff, 117ff
- Modellkompatibilität 84, 191
- Monkman-Grant-Beziehung 177, 183, 193

- Multiplikation von Versetzungen 135
- Netzwerk von Versetzungen, 3-dim. 145, 158, 299
- Neutronenbestrahlung 208
- Normung 23/26
- Orowan-Ringe 153ff
- Ostwald-Reifung 164ff, 185
- Oszillationen der Kriechrate 218
- Peach-Koehler-Kraft 287
- Plastometer 45
- Polykristall, Verformbarkeit 131/132
- Poren 194ff, 198, 199, 203, 207
- Prismatic loops 156/157
- Quergleitung 133, 155/157
- Rekristallisation 125, 159, 216ff
- Rißbildung 181ff
- Sauerstoffpartialdruck 119/120
- Schiebung (im Torsionsversuch) 11
- Schmierung (Stauchversuch) 9, 32
- Schneiden (Scheren) von Teilchen 151/152
- Sherby-Dorn-Parameter 190
- Sigmoidal Creep 283
- Spannung
  - effektive 140, 141, 261, 278
  - innere 79, 139, 141, 261, 275ff
  - konstante (Versuchstechnik) 23, 33
- Spannungsabhängigkeit von  $\dot{\epsilon}$  82ff, 282, 290, 292, 298/299
- Spannungsexponent 21, 30, 82, 89, 107
  - bei mehrphasigen Stoffen 161
- Spannungsrelaxationsversuch 49ff, 78
- Sprünge in Versetzungen, s. Jogs
- Stapelfehlerenergie 107, 112, 137, 218
- Standzeit 176
- Stochastische Theorie 199
- Strukturparameter 3, 28, 63
- Subkörner 135/136, 214, 225, 300
- Subkorndurchmesser 137, 139, 214
- Subkorngrenzen 135/136, 214, 225, 300
- Substrukturen 135ff, 169f
- Superplastizität 175, 221ff
- Teilchen, inkohärent/kohärent 151, 153
- Teilchenvergrößerung s. Ostwald-Reifung
- Teilchengröße, Abstand 146, 164ff
- Torsionsversuche 11, 14, 46ff, 209
- Transportgleichung 250
- Tripelpunkte (v. Korngrenzen) 131
- Übergangsbereich 1, 2, 71, 76, 136, 170, 229, 281, 284
- Übergangsspannung 126
- Umwandlungsprozesse (bei Langzeiteinsatz) 164

- Verfestigung 70, 79, 253, 259, 277, 283, 300
- Verformungsgeschwindigkeit (Konstanthaltung) 45
- Verformungsversprödung 179, 180
- Vernichtungsrate von Versetzungen 252
- Versetzungsdichte (Messung) 62ff;  $f(\sigma)$  138ff
- Versetzungsgeschwindigkeit 281, 282, 284
- Versetzungspaare 152
- Vorbehandlung, thermomechanische 169
- Warmstreckgrenze 41
- Warmtorsionsversuch 11, 209
- Wechselversuche ( $T$ ,  $\sigma$ ,  $\dot{\epsilon}$ ) 27, 42
- Zeitbruchlinie 20, 25, 178, 182, 205
- Zeitdehngrenze 20
- Zeitkriechgrenze 21, 24
- Zeitstand
- festigkeit (Def.) 20, 25
  - schaubild 3, 7, 19, 25
  - versuche 3, 7, 19, 25
  - werte, Extrapolation 187ff
- Zener-Hollomon-Parameter 90
- Zwischengitterionen 294