

Interaktive Modellierung des Kriechverhaltens am Beispiel warmfester Stähle

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Inform. András Fehér

aus Budapest

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. C. Berger
Mitberichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. M. Schäfer
Tag der Einreichung:	27. 04. 2010
Tag der mündlichen Prüfung:	07. 07. 2010

Darmstadt 2010

D17

Berichte aus der Werkstofftechnik
Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Christina Berger

Band 2/2010

András Fehér

**Interaktive Modellierung des Kriechverhaltens
am Beispiel warmfester Stähle**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2010

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9467-0

ISSN 1617-3805

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde der Technischen Universität Darmstadt.

Der Leiterin des Instituts, Frau Prof. Dr.-Ing. C. Berger, möchte ich für die Möglichkeit der Durchführung dieser Forschungsarbeit und ihre wohlwollende Förderung besonders danken.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. M. Schäfer bedanke ich mich für sein Interesse an der Arbeit und die Übernahme der Mitberichterstattung.

Mein besonderer Dank gilt dem Leiter des Kompetenzbereiches Hochtemperaturwerkstoffe des Instituts für Werkstoffkunde, Herrn Dr.-Ing. A. Scholz, für seine wertvolle Unterstützung, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Weiterhin gilt mein Dank dem Obmann, Herrn Dr.-Ing. H. Bartsch, und den Mitgliedern des projektbegleitenden Arbeitskreises für die wertvollen Hinweise aus der Praxis, sowie der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und dem Stahlinstitut VDEh für die finanzielle Förderung.

Der Materialprüfanstalt Universität Stuttgart, Herrn Dr.-Ing. A. Klenk, sei für die Überlassung der Dokumentation der von ihr realisierten Datenaustauschnittstelle (Kapitel 8) gedankt.

Herrn Dr.-Ing. T. Mao danke ich für die Vorbereitung und teilweise Durchführung der Finite-Elemente-Berechnungen. Allen weiteren Kollegen und den von mir betreuten Studenten danke ich ebenfalls für ihren Beitrag zum Gelingen der Arbeit.

Meinen Eltern möchte ich für die Förderung meiner Hochschulausbildung danken.

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfen durchgeführt habe.

Darmstadt, April 2010

Deshalb sage ich, reich ist, wer Fragen hat, und ärmer als der Ärmste, wer nur Antworten.

(János Bolyai)

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis.....	VII
Gleichungsverzeichnis.....	XI
1 Einleitung	1
2 Stand des Wissens.....	3
2.1 Werkstoffe.....	3
2.2 Einfache Kriechgleichungen für Einzelwerkstoffe.....	9
2.3 Leistungsfähige Kriechgleichungen für Einzelwerkstoffe.....	13
2.4 Kriechgleichungen für Stahlsorten.....	25
2.5 Parameterbestimmung bei phänomenologischen Kriechgleichungen.....	28
2.6 Kriechlebensdauer und Kriechschädigung.....	31
2.7 Grundbegriffe der Softwareentwicklung.....	36
2.7.1 Prozessmodelle für das Software Engineering.....	36
2.7.2 Objektorientierte Softwareentwicklung und UML.....	37
2.7.3 Qualitätsbeurteilung von Software.....	38
3 Aufgabenstellung.....	43
4 Werkstoffe und Versuchstechnik.....	46
4.1 Versuchswerkstoffe und Versuchsprogramm.....	46
4.2 Versuchstechnik.....	52
5 Experimentelle Datenbasis.....	58
5.1 Gefügezustand.....	58
5.2 Kurzzeiteigenschaften.....	61
5.3 Zeitstandverhalten.....	65
5.4 Relaxationsverhalten.....	73
6 Interaktive Kriechmodellierung.....	74
6.1 Prozess der Softwareentwicklung.....	74
6.2 Programmmodellierung, Sprache und Entwicklungsumgebung.....	78
6.3 Anforderungen an grafisch-interaktive Kriechmodellierung.....	82
6.4 Leistungsmerkmale und Arbeitsweise der rechnergestützten Beschreibung.....	85
6.4.1 Allgemeine mathematische Hintergrundfunktionen.....	85
6.4.2 Einlesen und Darstellung von Kriechdaten.....	90
6.4.3 Interaktive Modellierung mit dem Norton-Bailey-Ansatz.....	94
6.4.4 Interaktive Modellierung mit der modifizierten Norton-Bailey-Gleichung.....	107
6.4.5 Interaktive Modellierung mit der Graham-Walles-Gleichung.....	115
6.4.6 Interaktive Modellierung mit der modifizierten Garofalo-Gleichung und der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung.....	123
6.4.7 Interaktive Modellierung mit dem Ansatz der Theta-Projektion.....	132
6.4.8 Datenaufbereitung vor der Modellierung.....	135
6.4.9 Diagramm-Anzeigeoptionen.....	146
6.4.10 Allgemeine Optionen.....	147

6.4.11	Ausgabeformate.....	149
6.5	Bewertung der implementierten Kriechgleichungen.....	154
6.6	Eingliederung der rechnergestützten Kriechmodellierung.....	165
6.7	Grenzen der Anwendung und Weiterentwicklungsbedarf.....	167
6.8	Dokumentation.....	169
6.9	Programmkorrektheit.....	170
6.10	Programmrobustheit.....	176
7	Nachrechnung von Beanspruchungsfällen zur Validierung der Kriechbeschreibungen.....	180
7.1	Nachrechnung von Spannungsrelaxationsversuchen.....	180
7.2	Nachrechnung von Kriechversuchen an Gradientenproben.....	186
8	Schnittstelle INCA-ALIAS.....	194
8.1	Einführung.....	194
8.2	Export der Daten.....	196
8.3	Mögliche Parameter (Werte) für den Datenexport.....	197
8.4	Import der INCA-Ergebnisse in die ALIAS-Datenbank.....	199
9	Schlussfolgerungen und zukünftige Aufgabenstellungen.....	201
10	Zusammenfassung.....	205
11	Schrifttum.....	212

Symbolverzeichnis

1. Parameter der Kriechgleichungen:

A (-)	... Konstante der modifizierten Graham-Walles-Gleichung				Graham-Walles-Gleichung, der modifizierten Garofalo-Gleichung und der Theta-Projektionsgleichung
a_1 (-)	... Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung, der modifizierten Garofalo-Gleichung und der Theta-Projektionsgleichung	b_2 (-)	...	Konstante der modifizierten Norton-Bailey-Gleichung, der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung, der modifizierten Garofalo-Gleichung und der Theta-Projektionsgleichung	
A_1 (-)	... Konstante der modifizierten Graham-Walles-Gleichung	b_3 (-)	...	Konstante der Theta-Projektionsgleichung	
a_{10} (-)	... Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung	b_4 (-)	...	Konstante der Theta-Projektionsgleichung	
a_{11} (-)	... Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung	c_1 (-)	...	Konstante der Theta-Projektionsgleichung	
a_2 (-)	... Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung, der modifizierten Garofalo-Gleichung und der Theta-Projektionsgleichung	c_2 (-)	...	Konstante der Theta-Projektionsgleichung	
A_2 (-)	... Konstante der modifizierten Graham-Walles-Gleichung	c_1 (%)	...	Konstante der modifizierten Norton-Bailey-Gleichung	
a_{20} (-)	... Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung	c_2 (%)	...	Konstante der modifizierten Norton-Bailey-Gleichung	
a_{21} (-)	... Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung	c_3 (-)	...	Konstante der Theta-Projektionsgleichung	
a_3 (-)	... Konstante der Theta-Projektionsgleichung	c_4 (-)	...	Konstante der Theta-Projektionsgleichung	
a_4 (-)	... Konstante der Theta-Projektionsgleichung	C_{12} (-)	...	Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung	
b_1 (-)	... Konstante der modifizierten Norton-Bailey-Gleichung, der kombinierten Garofalo-	C_{23} (-)	...	Konstante der modifizierten Garofalo-Gleichung	
		d_1 (-)	...	Konstante der Theta-Projektionsgleichung	
		d_2 (-)	...	Konstante der Theta-Projektionsgleichung	
		d_3 (-)	...	Konstante der Theta-Projektionsgleichung	
		d_4 (-)	...	Konstante der Theta-Projektionsgleichung	

D (-)	... Schädigungsparameter der modifizierten Graham-Walles-Gleichung sowie Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung	m_3 (-)	... Konstante der Graham-Walles-Gleichung und der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung
f (-)	... Konstante der modifizierten Garofalo-Gleichung	n (-)	... Konstante in der Norton-Bailey Gleichung und der modifizierten Graham-Walles-Gleichung
K (%)	... Konstante der Norton-Bailey Gleichung	n_1 (-)	... Konstante der Graham-Walles-Gleichung, der modifizierten Graham-Walles-Gleichung, der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung
K_1 (%)	... Konstante der Graham-Walles-Gleichung, der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung	n_2 (-)	... Konstante der Graham-Walles-Gleichung, der modifizierten Graham-Walles-Gleichung, der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung
K_{10} (%)	... Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung	n_3 (-)	... Konstante der Graham-Walles-Gleichung und der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung
K_2 (%)	... Konstante der Graham-Walles-Gleichung, der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung	Q (-)	... Konstante der modifizierten Graham-Walles-Gleichung
K_{20} (%)	... Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung	Q_1 (-)	... Konstante der modifizierten Norton-Bailey-Gleichung und der modifizierten Graham-Walles-Gleichung
K_3 (%)	... Konstante der Graham-Walles-Gleichung und der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung	Q_2 (-)	... Konstante der modifizierten Norton-Bailey-Gleichung und der modifizierten Graham-Walles-Gleichung
K_{30} (%)	... Konstante der modifizierten Garofalo-Gleichung	Q_{k1} (-)	... Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung
m (-)	... Konstante der Norton-Bailey Gleichung, der modifizierten Norton-Bailey-Gleichung, der modifizierten Graham-Walles-Gleichung und der Garofalo-Gleichung		
m_1 (-)	... Konstante der Graham-Walles-Gleichung		

$Q_{k2} (-)$	... Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung
$Q_{k3} (-)$	... Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung
$t_0 (-)$	... Konstante der modifizierten Norton-Bailey-Gleichung
$\alpha_{12} (-)$	... Konstante der kombinierten Garofalo-Graham-Walles-Gleichung und der modifizierten Garofalo-Gleichung
$\alpha_{23} (-)$	... Konstante der modifizierten Garofalo-Gleichung
Θ_1 bis Θ_4	... Terme der Theta-Projektionsgleichung
$\omega (-)$	... Schädigungsterm der modifizierten Graham-Walles-Gleichung

2. Weitere Symbole:

A_5 (%)	... Bruchdehnung	$\varepsilon_{a,el}$ (%)	... elastische Dehnungsamplitude
A_u (%)	... Zeitbruchdehnung	$\varepsilon_{a,pl}$ (%)	... plastische Dehnungsamplitude
C (-)	... Konstante des Larson-Miller-Terms	ε_d (%)	... dichteabhängige Dehnung
d_0 (mm)	... Prüfprobendurchmesser	ε_e (%)	... elastische Dehnung
E (MPa)	... Elastizitätsmodul	ε_f (%)	... Kriechdehnung
ΔL (mm)	... Gesamtverlängerung der Probe	$\varepsilon_{f1, max}$ (%)	... Maximalbetrag des Primärkriechens
L (mm)	... Prüfprobenlänge	ε_{ges} (%)	... gesamte Dehnung
L_r (mm)	... Bezugslänge	ε_t (%)	... Gesamtdehnung
n (-), n_0 (-)	Spannungsexponent	ε_i (%)	... Anfangsdehnung
P_{LM} (-)	... Larson-Miller Parameter	ε_k (%)	... anelastische Dehnung
R_m (MPa)	... Zugfestigkeit	ε_p (%)	... plastische Dehnung
$R_{p0,2}$ (MPa)	... Dehngrenze	ε_{per} (%)	... permanente Dehnung
$R_{p0,5}$ (MPa)	... Dehngrenze	$\dot{\varepsilon}$ (%/h)	... Kriechgeschwindigkeit
R_{p1} (MPa)	... Dehngrenze	$\dot{\varepsilon}_{pmin}$ (%/h)	... Minimale Kriechgeschwindigkeit
S^2 (-)	... Fehlerquadratsumme	ε_T (%)	... instationäre Kriechdehnung
t (h)	... Zeit	σ (MPa)	... äußere Spannung
t_u (h)	... Bruchzeit	σ_0 (MPa)	... Prüfspannung, Anfangsspannung
Δt (h)	... Zeitinkrement	σ_i (MPa)	... innere Spannung
T / ϑ / (°C)	... Temperatur	$\delta\sigma_R$ (MPa)	... Betrag der Relaxationsspannung
ΔT (K)	... Temperaturdifferenz	σ_{rt} (MPa)	... Restspannung der Relaxationsbeanspruchung
Z (%)	... Brucheinschnürung		
Z_u (%)	... Zeitbrucheinschnürung		
ε (%)	... Dehnung		
ε_a (%)	... Dehnungsamplitude		

Gleichungsverzeichnis

$$\dot{\varepsilon}_{pmin} = K \cdot \sigma^n \quad (2-1)$$

$$\varepsilon_f = f_1(\sigma) \cdot f_2(t) \quad (2-2)$$

$$f_1(\sigma) = A \cdot \sinh\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \quad (2-3)$$

$$f_1(\sigma) = a \cdot \left(\sinh \frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m \quad (2-4)$$

$$f_2(t) = F \cdot t^n \quad (2-5)$$

$$f_2(t) = \sum a_i \cdot t^{n_i} \quad (2-6)$$

$$f_2(t) = \Theta_1 \left(1 - e^{-\Theta_2 t}\right) + \dot{\varepsilon}_{pmin} \cdot t \quad (2-7)$$

$$\varepsilon_f = f_1(\sigma) \cdot f_2(t) \cdot f_3(T) \quad (2-8)$$

$$\varepsilon_f = K \cdot \sigma^n \cdot t^m \quad (2-9)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{f1} + \varepsilon_{f2}$$

$$\varepsilon_{f1} = c_1 \cdot e^{\left(\frac{Q_1}{T}\right)} \cdot \sigma \cdot e^{b_1 \cdot \sigma} \cdot \left(\frac{t}{t_o}\right)^m \quad (2-10)$$

$$\varepsilon_{f2} = c_2 \cdot e^{\left(\frac{Q_2}{T}\right)} \cdot \sigma \cdot e^{b_2 \cdot \sigma} \cdot \frac{t}{t_o}$$

$$\varepsilon_f = \sum_i K_i \cdot \sigma^{n_i} \cdot t^{m_i} \quad (2-11)$$

$$\dot{\varepsilon}_f = e^{(Q_1/T)} \cdot 10^{A_1} \cdot \left(\frac{\sigma(1+\varepsilon)}{1+\omega}\right)^{n_1} \cdot \varepsilon^{m_1} + e^{(Q_2/T)} \cdot 10^{A_2} \cdot \left(\frac{\sigma(1+\varepsilon)}{1+\omega}\right)^{n_2} \quad (2-12)$$

$$\dot{\omega} = e^{(-QD/T)} \cdot 10^{AD} \cdot (\sigma(1+\varepsilon))^{nD} \cdot \varepsilon^{mD}$$

$$\varepsilon_f = \Theta_1 (1 - e^{-\Theta_2 \cdot t}) + \Theta_3 \cdot t + \Theta_5 \cdot t^m \quad (2-13)$$

$$\varepsilon_f = \Theta_1 (1 - e^{-\Theta_2 \cdot t}) + \Theta_3 (e^{\Theta_4 \cdot t} - 1) \quad (2-14)$$

$$\theta_j = e^{a_j + b_j \cdot T + c_j \cdot \sigma + d_j \cdot \sigma \cdot T} \quad (2-15)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_T \cdot [1 - e^{-mt}] + \dot{\varepsilon}_{pmin} \cdot t \quad (2-16)$$

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{per} &= \varepsilon_i + \varepsilon_{f1} + \varepsilon_{f2} + \varepsilon_{f3} \\
&= \varepsilon_1 + \varepsilon_{f1max} \cdot \left(1 - e^{-D \left(\frac{t}{t_{12}} \right)^u} \right) + \dot{\varepsilon}_{pmin} \cdot t + C_{23} \cdot \left(\frac{t}{t_{23}} \right)^f
\end{aligned} \tag{2-17}$$

$$P_{LM} = (T + 273) \cdot (C + \log t) \tag{2-18}$$

$$\ln \varepsilon_p = \ln K + n \cdot \ln \sigma + m \cdot \ln t \tag{2-19}$$

$$v_i = \ln \varepsilon_{pi} - (\ln K + n \cdot \sigma_i + m \cdot t_i) \tag{2-20}$$

$$S = \sum_i \left[\ln \varepsilon_{pi} - (\ln K + n \cdot \ln \sigma_i + m \cdot \ln t_i) \right]^2 \tag{2-21}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial S}{\partial (\ln K)} &= 0 \quad \rightarrow \quad -2 \cdot \sum_i \left[\ln \varepsilon_{pi} - (\ln K + n \cdot \ln \sigma_i + m \cdot \ln t_i) \right] = 0 \\
\frac{\partial S}{\partial n} &= 0 \quad \rightarrow \quad -2 \cdot \sum_i \left[\ln \varepsilon_{pi} - (\ln K + n \cdot \ln \sigma_i + m \cdot \ln t_i) \right] \cdot \ln \sigma_i = 0
\end{aligned} \tag{2-22}$$

$$\frac{\partial S}{\partial m} = 0 \quad \rightarrow \quad -2 \cdot \sum_i \left[\ln \varepsilon_{pi} - (\ln K + n \cdot \ln \sigma_i + m \cdot \ln t_i) \right] \cdot \ln t_i = 0$$

$$t_{uv} = \sum_i \Delta t_i \quad \text{für} \quad \sum_i \left(\Delta \frac{t_i}{t_{ui}} \right) = L_t \tag{2-23}$$

$$t_{p\varepsilon v} = \sum_i \Delta t_i \quad \text{für} \quad \sum_i \left(\Delta \frac{t_i}{t_{p\varepsilon i}} \right) = L_{p\varepsilon} \tag{2-24}$$

$$\dot{\varepsilon}_p = A(\sigma_0) \cdot \left(\frac{|\sigma_0 - \sigma_i|}{1 - D} \right)^n \cdot \text{sign}(\sigma_0 - \sigma_i) \tag{2-25}$$

$$\varepsilon_p = c_1 \cdot e^{\frac{Q_1}{T}} \cdot e^{b_1 \cdot \sigma} \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^m + c_2 \cdot e^{\frac{Q_2}{T}} \cdot e^{b_2 \cdot \sigma} \cdot \frac{t}{t_0} \tag{6-1}$$

$$\ln(\varepsilon_p - \varepsilon_{f1max}) = \ln \left(c_2 \cdot e^{\frac{Q_2}{T}} \cdot \sigma \cdot e^{b_2 \cdot \sigma} \cdot \frac{t}{t_0} \right) \tag{6-2}$$

$$\ln(\varepsilon_p - \varepsilon_{f1max}) - \ln(t) - \ln(\sigma) = \ln(c_2) + \frac{Q_2}{T} + b_2 \cdot \sigma \tag{6-3}$$

$$\ln(\varepsilon_p - c_2 \cdot e^{\frac{Q_2}{T}} \cdot e^{b_2 \cdot \sigma} \cdot \frac{t}{t_0}) - \ln(t) \cdot m - \ln(\sigma) + \ln(t_0) = \ln(c_1) + \frac{Q_1}{T} + b_1 \cdot \sigma \quad (6-4)$$

$$\varepsilon_p = K_1 \cdot \sigma^{n_1} \cdot t^{m_1} + K_2 \cdot \sigma^{n_2} \cdot t + K_3 \cdot \sigma^{n_3} \cdot t^{m_3} \quad (6-5)$$

$$\varepsilon_{p1} = K_1 \cdot \sigma^{n_1} \cdot t_1^{m_1} + K_2 \cdot \sigma^{n_2} \cdot t_1 + K_3 \cdot \sigma^{n_3} \cdot t_1^{m_3}$$

$$\varepsilon_{p2} = K_1 \cdot \sigma^{n_1} \cdot t_2^{m_1} + K_2 \cdot \sigma^{n_2} \cdot t_2 + K_3 \cdot \sigma^{n_3} \cdot t_2^{m_3} \quad (6-6)$$

$$\varepsilon_{p3} = K_1 \cdot \sigma^{n_1} \cdot t_3^{m_1} + K_2 \cdot \sigma^{n_2} \cdot t_3 + K_3 \cdot \sigma^{n_3} \cdot t_3^{m_3}$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{f1 \max}(\sigma) \cdot \left(1 - \exp \left(-D \cdot \left(\frac{t}{(C_{12}/\dot{\varepsilon}_{p \min}(\sigma))^{\alpha_{12}}} \right)^u \right) \right) + \dot{\varepsilon}_{p \min} \cdot t$$

$$+ K_{30} \cdot \left(\frac{t}{(C_{23}/\dot{\varepsilon}_{p \min}(\sigma))^{\alpha_{23}}} \right)^f \quad (6-7)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{f1 \max}(\sigma, T) \cdot \left(1 - \exp \left(-D \cdot \left(\frac{t}{(C_{12}/\dot{\varepsilon}_{p \min}(\sigma, T))^{\alpha_{12}}} \right)^u \right) \right) + \dot{\varepsilon}_{p \min} \cdot t$$

$$+ K_{30} \cdot e^{-\frac{Q_{k3}}{T}} \cdot \left(\frac{t}{(C_{23}/\dot{\varepsilon}_{p \min}(\sigma, T))^{\alpha_{23}}} \right)^f \quad (6-8)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{f1 \max}(\sigma) \cdot \left(1 - \exp \left(-D \cdot \left(\frac{t}{(C_{12}/\dot{\varepsilon}_{p \min}(\sigma))^{\alpha_{12}}} \right)^u \right) \right) + \dot{\varepsilon}_{p \min}(\sigma) \cdot t$$

$$+ K_3 \cdot \sigma^{n_3} \cdot t^{m_3} \quad (6-9)$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_{f1 \max}(\sigma, T) \cdot \left(1 - \exp \left(-D \cdot \left(\frac{t}{(C_{12}/\dot{\varepsilon}_{p \min}(\sigma, T))^{\alpha_{12}}} \right)^u \right) \right)$$

$$+ \dot{\varepsilon}_{p \min}(\sigma, T) \cdot t + K_3 \cdot \sigma^{n_3} \cdot t^{m_3} \cdot e^{-\frac{Q_{k3}}{T}} \quad (6-10)$$

$$\dot{\varepsilon}_{p \min} = K_2 \cdot \sigma^{n_2} \cdot e^{a_2 \cdot \sigma^{b_2}} \quad (6-11)$$

$$\dot{\varepsilon}_{p \min} = K_{20} \cdot e^{-\frac{Q_{k2}}{T}} \cdot \sigma^{n_2} \cdot e^{(a_{20} + a_{21} \cdot T) \cdot \sigma^{b_2}} \quad (6-12)$$

$$\dot{\varepsilon}_{pmin} = K_2 \cdot \sigma^{n_2} \quad (6-13)$$

$$\dot{\varepsilon}_{pmin} = K_{20} \cdot e^{-\frac{Q_{k2}}{T}} \cdot \sigma^{n_2} \quad (6-14)$$

$$\dot{\varepsilon}_{pmin} = K_2 \cdot e^{a_2 \cdot \sigma^{b_2}} \quad (6-15)$$

$$\dot{\varepsilon}_{pmin} = K_{20} \cdot e^{-\frac{Q_{k2}}{T}} \cdot e^{(a_{20} + a_{21} \cdot T) \cdot \sigma^{b_2}} \quad (6-16)$$

$$\dot{\varepsilon}_{pmin} = K_2 \cdot \sinh(\sigma) \cdot e^{a_2 \cdot \sigma^{b_2}} \quad (6-17)$$

$$\dot{\varepsilon}_{pmin} = K_{20} \cdot e^{-\frac{Q_{k2}}{T}} \cdot \sinh(\sigma) \cdot e^{(a_{20} + a_{21} \cdot T) \cdot \sigma^{b_2}} \quad (6-18)$$

$$\varepsilon_{f1max} = K_1 \cdot \sigma^{n_1} \cdot e^{a_1 \cdot \sigma^{b_1}} \quad (6-19)$$

$$\varepsilon_{f1max} = K_{10} \cdot e^{-\frac{Q_{k1}}{T}} \cdot \sigma^{n_1} \cdot e^{(a_{10} + a_{11} \cdot T) \cdot \sigma^{b_1}} \quad (6-20)$$

$$\varepsilon_{f1max} = K_1 \cdot \sigma^{n_1} \quad (6-21)$$

$$\varepsilon_{f1max} = K_{10} \cdot e^{-\frac{Q_{k1}}{T}} \cdot \sigma^{n_1} \quad (6-22)$$

$$\varepsilon_{f1max} = K_1 \cdot e^{a_1 \cdot \sigma^{b_1}} \quad (6-23)$$

$$\varepsilon_{f1max} = K_{10} \cdot e^{-\frac{Q_{k1}}{T}} \cdot e^{(a_{10} + a_{11} \cdot T) \cdot \sigma^{b_1}} \quad (6-24)$$

$$\varepsilon_{f1max} = K_1 \cdot \sinh(\sigma) \cdot e^{a_1 \cdot \sigma^{b_1}} \quad (6-25)$$

$$\varepsilon_{f1max} = K_{10} \cdot e^{-\frac{Q_{k1}}{T}} \cdot \sinh(\sigma) \cdot e^{(a_{10} + a_{11} \cdot T) \cdot \sigma^{b_1}} \quad (6-26)$$

$$\varepsilon_{f1max} = K_1 \quad (6-27)$$

$$\varepsilon_{f1max} = K_{10} \cdot e^{-\frac{Q_{k1}}{T}} \quad (6-28)$$

$$\varepsilon_{f1max} = \text{const} \quad (6-29)$$

$$\varepsilon_p = \theta_1 \cdot (1 - e^{-\theta_2 \cdot t}) + \theta_3 \cdot (e^{\theta_4 \cdot t} - 1) \quad (6-30)$$

$$\theta_j = e^{a_j + b_j \cdot \sigma} \quad (6-31)$$

$$\varepsilon_p = K_1 \cdot t^{m_1} + K_2 \cdot t + K_3 \cdot t^{m_3} \quad (6-32)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_{\theta} + \varepsilon_{\rho} + \varepsilon_f \quad (7-1)$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta} = -\dot{\varepsilon}_f \quad (7-2)$$

$$\dot{\sigma}_{\theta} = -E \cdot \dot{\varepsilon}_f \quad (7-3)$$

$$\sigma_{\theta} = \sigma_0 - E \cdot \int_0^{t_0} \frac{d\varepsilon_f}{dt} dt \quad (7-4)$$

