Werkstoffe und Fertigung II
Prof.Dr. K. Wegener
Sommersemester 2007

Seminarübung 8

Plastizität, Rekristallisation, Kriechen

Musterlösung

Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigung, ETH Zentrum
Übungsassistenz:, Michael Kelterborn, Florian Hofmann, Tobias Ott, Tobias Nösekabel, Jonas Schöndube, Daniel Sutter; Federico Wolff.
Koordination: Willi Müller, CLA F21.1, Tel. 01 633 23 84, wm@iwf.mavt.ethz.ch

Lernziele

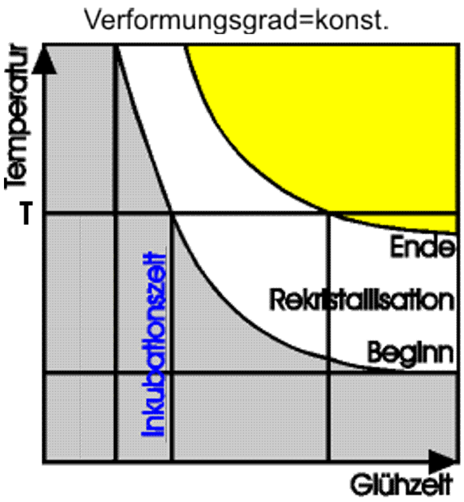
Werkstoffe und Fertigung I, Kap. 7, LZ 1-3, Kap. 8, LZ 1-3,

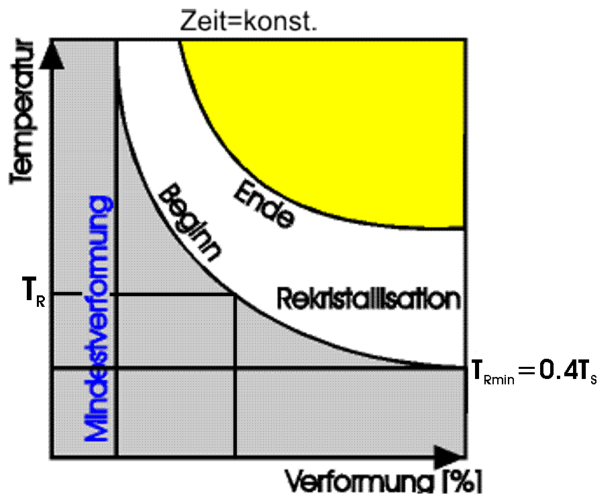
Kerninformationen

a) Plastische Verformung
Bei plastischer Verformung metallischer Werkstoffe kann für technische Anwendungen das Volumen als konstant betrachtet werden.

b) Rekristallisation
Unter gewissen Bedingungen bildet ein metallischer Werkstoff sein Kristallgefüge neu:

- Der Werkstoff muss vorgängig eine Kaltumformung erfahren haben
- Die Temperatur muss genügend hoch sein (mindestens 0.4 T_S, Schmelztemperatur [K]).





Das Diagramm gibt für einen bestimmten Verformungsgrad abhängig von der Glühzeit und von der Temperatur an, ob ein behandelter Werkstoff sich innerhalb der Inkubationsphase befindet, in Rekristallisation begriffen ist oder diese schon abgeschlossen hat.

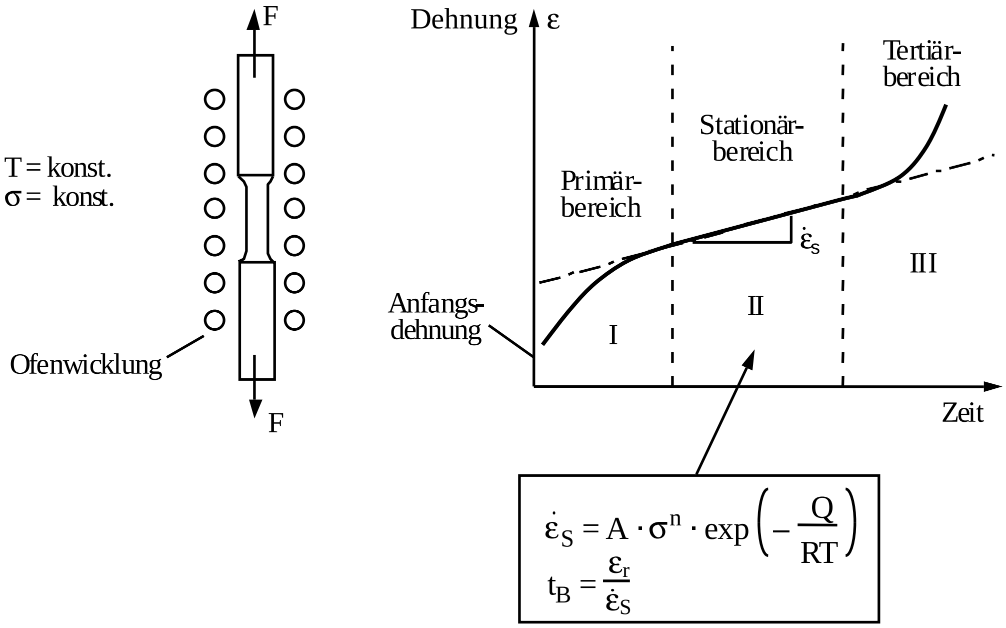
Das Diagramm gibt für eine bestimmte Rekristallisationszeit (Zeit ab Erreichen der Rekristallisationstemperatur) abhängig vom Verformungsgrad und von der Temperatur an, ob ein behandelter Werkstoff sich innerhalb der Inkubationsphase befindet, in Rekristallisation begriffen ist oder diese schon abgeschlossen hat.

c) Kriechen, Relaxation

Beim *Kriechen* bleibt die Last auf einem Bauteil konstant. Die Kriechverformung nimmt zu bis zum Bruch.

Bei der *Relaxation* wird ein Bauteil einer Dehnung unterworfen, welche über die Zeit konstant gehalten wird. Diese wird zunächst elastisch und allenfalls plastisch aufgenommen. Der elastische Anteil wird mit der Zeit durch Kriechen abgebaut unter proportionaler Verminderung der Spannung, die Gesamtdehnung bleibt konstant.

Kriechkurve



$\dot{\varepsilon}_S$ = $(\dot{\varepsilon}_{cr})$, stationäre Fliessgeschwindigkeit

ε_r = Grenzdehnung bei Versagen, Kriechbruchdehnung

t_B = Kriechzeit bis zum Bruch

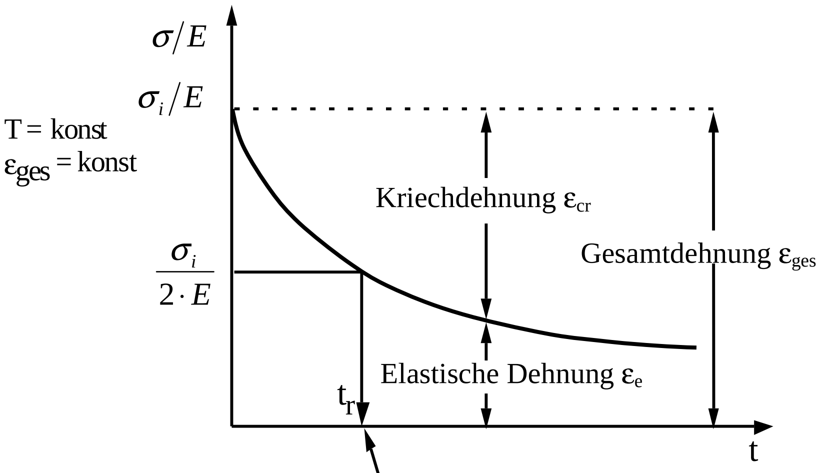
σ = Zugspannung

Q = Aktivierungsenergie

R = Universelle Gaskonstante

T = Temperatur

Relaxationskurve:



$$t_r = \frac{2^{n-1} - 1}{(n-1)\cdot B \cdot E \cdot \sigma_i^{n-1}}$$

Die Relaxationszeit t_r ist die Zeit, in welcher die Spannung (und damit die elastische Dehnung, vgl. Grafik) auf die *Hälfte* des Anfangswertes gefallen ist. (Hinweis: Bei den Kunststoffen ist die Relaxationszeit anders definiert)

Allgemein:

Spannungsabfall

$$\frac{1}{\sigma^{n-1}} - \frac{1}{\sigma_i^{\,n-1}} = (n-1)\cdot B \cdot E \cdot t$$

In der Zeit t fällt die Spannung vom Anfangswert σ_i auf den Wert σ ab

E : Elastizitätsmodul

$$B = A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

A, n, Q : werkstoffabhängige Konstanten

1 Plastische Deformation

Ein Rundstab des Durchmessers d=20 mm und der Länge l= 100 mm wird bis zum Erreichen der Maximalkraft (Spannung R_m) plastisch um ε = 20 % verlängert (lineare Dehnung).

a) Wie gross ist die logarithmische Dehnung?
b) Wie gross ist der Durchmesser des gedehnten Stabes?
c) Wie gross ist die eingetretene Querdehung?
d) Um wieviel hat sich die Querschnittsfläche des Stabes verändert?

Anschliessend wird er bis zum Bruch belastet, dabei entsteht auf Grund der Brucheinschnürung eine zusätzlich Längsdehnung (Einschnürdehnung) von 10 %.

e) Wie gross ist die Bruchdehnung eines Stabes der Länge l_2=0.5 m?

Lösung

a) $\varphi = ln(1+\varepsilon) = ln(1.2) = 0.182$

b) Volumenkonstanz bei plastischer Verformung $V = V'$ *:*

$$V \cdot \frac{4}{\pi} = d^2 l = d'^2 l' \rightarrow \frac{d'}{d} = \sqrt{\frac{l}{l'}} = \sqrt{\frac{100mm}{120mm}} = 0.913 \rightarrow d' = 0.913 \cdot 20\ mm = 18.26mm$$

c) Querdehnung: $\varepsilon = \frac{d'-d}{d} = \frac{18.26-20}{20} = -0.087 = -8.7\%$

d) Querschnittsflächenänderung

absolut: $\Delta A = (d'^2 - d^2) \cdot \frac{\pi}{4} = (18.26^2 - 20^2) \cdot \frac{3.142}{4} = -55.3 mm^2$

relativ: $\frac{\Delta A}{A} = \frac{(d'^2 - d^2)}{d^2} = \frac{d'^2}{d^2} - 1 = \frac{l}{l'} - 1 = \frac{100mm}{120mm} - 1 = 0.167 = 16.7\%$

e) $\varepsilon_r = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{\varepsilon_g \cdot l_2 + \varepsilon_E \cdot l}{l_2} = \frac{0.2 \cdot 0.5m + 0.1 \cdot 0.1m}{0.5m} = \frac{0.11}{0.5} = 0.22 = 22\%$

2 Rekristallisation

Gegeben ist ein Rekristallisationsdiagramm.
Bei der Temperatur T_1 beginnt ein Werkstück mit dem Verformungsgrad 13% die Rekristallisation zu der Zeit t_1 =1800 s (Inkubationszeit).

a) Wie gross ist die Temperatur T_1 ?

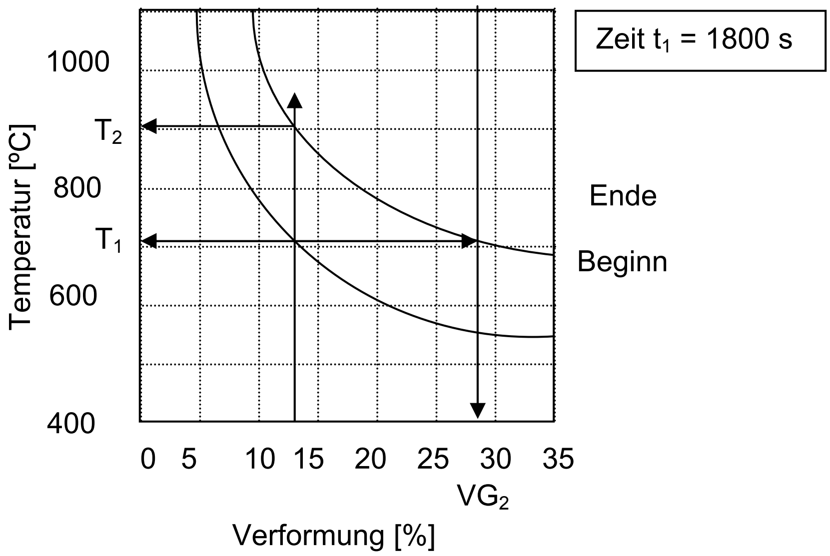
Sie möchten aber, dass zu diesem Zeitpunkt die Rekristallisation gerade abgeschlossen ist.

Auf welchen Wert müssen Sie

b) den Verformungsgrad (Temperatur bleibt T_1)
c) die Rekristallisationstemperatur T_2 (Verformungsgrad bleibt 13%)

ändern, um dies zu erreichen?

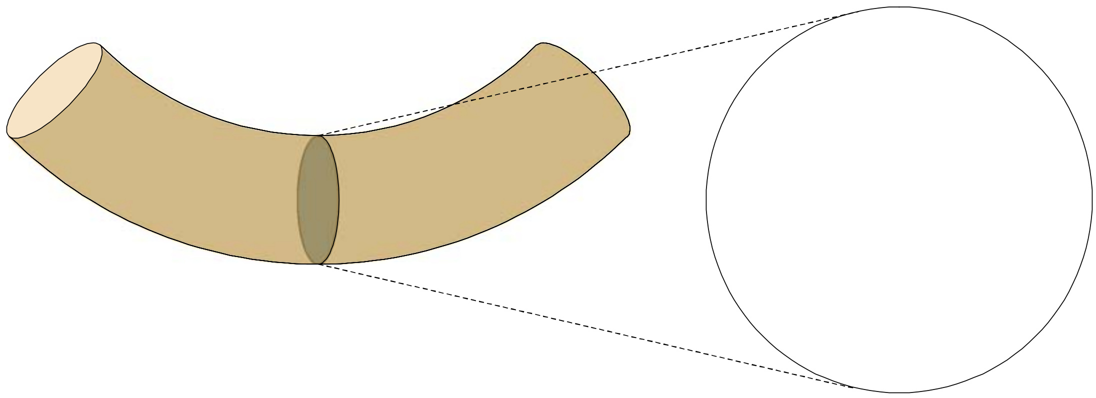
Lösung:



a. *T_1 = 710 ºC*
b. *Verformungsgrad VG_2 = 27%*
c. *T_2 = 905 ºC*

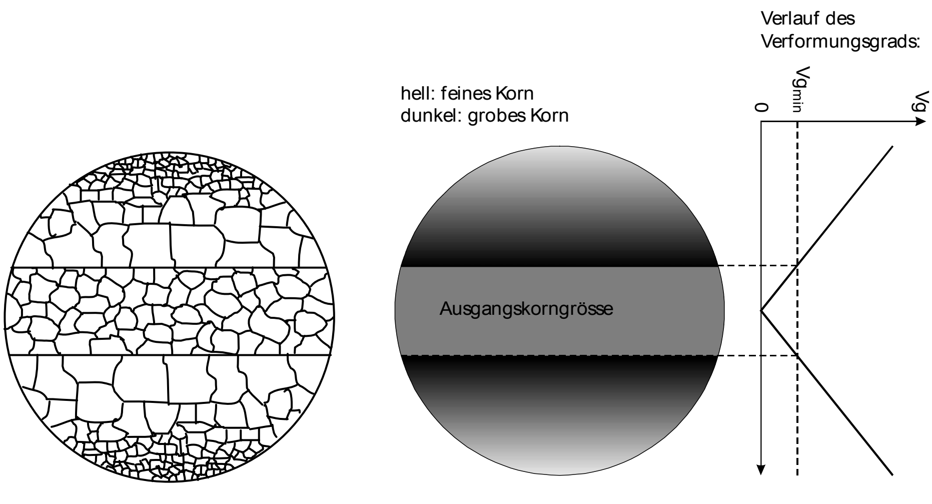
3 Korngrösse

Ein Stück Aluminiumdraht wird gebogen und anschliessend rekristallisiert (siehe Abbildung). Skizzieren Sie die Verteilung der Korngrösse über den Querschnitt des Drahtes nach der Rekristallisation, wenn keine Sekundärrekristallisation auftritt.



Lösung

Die Korngrösse hängt vom Verformungsgrad ab:
In Stabmitte ist der Verformungsgrad kleiner als der für Rekristallisation minimal erforderliche, hier liegt das ursprüngliche Gefüge vor. An den Stellen grösster Dehnung bzw. Stauchung an der Drahtoberfläche liegt starke Verformung vor, d.h. viele Rekristallisationskeime, viele und daher kleine Körner. Dazwischen liegt die Zone mit schwacher Verformung, wenigen Keimen, daher wenigen aber grossen Körnern.



4 Spannungsrelaxation

Eine Stahlschraube wird auf σ = 65 MPa vorgespannt. Wenn die Spannung auf 70% dieses Wertes abgesunken ist, muss die Schraube nachgespannt werden. Nach welcher Zeit ist dies nötig?

E= 2.1 10^5 MPa
A = $3.8 \cdot 10^{-5}$ [$(mm^2/N)^5/s$]
T=450ºC
n = 5
Q= $2.2 \cdot 10^5$ J/mol
R=8.31 J/mol·K

Lösung

$$B = A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad B = 3.8 \cdot 10^{-5} \cdot \exp\left(\frac{-2.2 \cdot 10^5 J/mol}{8.31 J/molK \cdot 723 K}\right) = 4.76 \cdot 10^{-21} \left(mm^2/N\right)^5/s$$

$$\frac{1}{\sigma^{n-1}} - \frac{1}{\sigma_i^{\,n-1}} = (n-1) \cdot B \cdot E \cdot t$$

$$t = \frac{1}{B \cdot E \cdot (n-1)} \cdot \frac{1}{\sigma_i^{\,n-1}} \cdot \left(\frac{1}{0.7^{n-1}} - 1\right)$$

$$= \frac{1}{4.76\ 10^{-21}\left(mm^2/N\right)^5/s \cdot 2.1 \cdot 10^5 MPa \cdot 4} \cdot \frac{1}{65^4 MPa^4} \cdot \left(\frac{1}{0.7^4} - 1\right) = 4.44 \cdot 10^7 s = 1.4\ a$$

5 Kriechen

Ein Zugstab mit der Spannung σ = 40 MPa wird bei der Temperatur T=680 ºC eingesetzt.

a) Wie gross ist die Kriechrate $\dot{\varepsilon}$?
b) Wie gross ist seine Kriechdehnung ε_1 nach der Zeit t_1 = 720 Stunden ?
c) Wie gross ist der Schädigungsparameter D_1 bei t_1, wenn die kritische Dehnung ε_{zul}= 0.02 beträgt?
d) Bei welcher Zeit t_2 muss der Stab ersetzt werden?

A = $3.8 \cdot 10^{-5}$ [$(mm^2/N)^5/s$]
n = 5
Q= $2.2 \cdot 10^5$ J/mol
R=8.31 J/mol·K

Lösung

a) $\dot{\varepsilon} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) = 3.8 \cdot 10^{-5}\ \left(mm^2/N\right)^5/s \cdot 40^5 MPa^5 \cdot \exp\left(-\frac{2.2 \cdot 10^5}{8.31 \cdot 953}\right) = 3.35 \cdot 10^{-9} s^{-1}$

b) $\varepsilon_1 = \dot{\varepsilon} \cdot t_1 = 3.35 \cdot 10^{-9} s^{-1} \cdot 2.59 \cdot 10^6 s = 0.00869$

c)

$$D_1 = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_{zul}} = \frac{0.00869}{0.02} = 0.43$$

d)

$$t_2 = t_1 \cdot \frac{D_2}{D_1} = 720\ h \cdot \frac{1}{0.43} = 1660\ h$$