

# 1 Relaxation

**4 Punkte**

---

Eine Schraube, die unter erhöhter Temperatur im Einsatz ist, wird auf die Spannung  $\sigma_i$  vorgespannt. Wenn die Spannung auf 80% dieses Wertes abgesunken ist, muss die Schraube gemäss Konstruktionsrichtlinie nachgezogen werden.

$$E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$A = 3.7 \cdot 10^{-5} (\text{mm}^2/\text{N})^5/\text{s}$$

$$\vartheta = 480^\circ\text{C}$$

$$n = 5$$

$$Q = 2.3 \cdot 10^5 \text{ J/mol}$$

$$R = 8.31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

- a) Wie gross darf  $\sigma_i$  sein, wenn das Wartungsintervall 200 Tage betragen soll?
- b) Bezeichnen Sie in der nachstehenden Liste mit "+" die Eigenschaften, dank welcher ein Werkstoff weniger kriecht, mit "-" die anderen.
- Grobkorn
  - Phasengemisch (Ausscheidungen)
  - Grosse Stapelfehlerenergie
  - Überstruktur

**2 Spannungsrelaxation****5 Punkte**

---

Eine Schraube wird auf  $\sigma = 70 \text{ MPa}$  vorgespannt. Wenn die Spannung auf 75% dieses Wertes abgesunken ist, muss die Schraube nachgespannt werden.

- a) Nach welcher Zeit ist dies nötig?
- b) Was kann man materialseitig tun, um das Kriechen einzudämmen?

$$E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

$$A = 3.8 \cdot 10^{-5} [(\text{mm}^2/\text{N})^5/\text{s}]$$

$$T = 460^\circ\text{C}$$

$$n = 5$$

$$Q = 2.2 \cdot 10^5 \text{ J/mol}$$

$$R = 8.31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$$

**3 Kriechen****3 Punkte**

---

Ein Rundstab soll bei einer Temperatur von 720 °C eingesetzt werden und dabei innerhalb eines Jahres die Kriechdehnung  $\epsilon_{zul} = 0.001$  nicht überschreiten.

Wie gross darf die Spannung sein, welcher er unterworfen ist?

Universelle Gaskonstante  $R = 8.314 \text{ J/mol K}$

Aktivierungsenergie  $Q = 2.25 \cdot 10^5 \text{ J/mol}$

Parameter für das Norton-Gesetz:

Konstante  $A = 3.26 \cdot 10^{-5} [(\text{mm}^2/\text{N})^5/\text{s}]$

Kriechexponent  $n = 5$

**4 Wärmebehandlung****5 Punkte**

Beschreiben Sie für Eisenwerkstoffe die Wärmebehandlungsverfahren

- a) Weichglühen
- b) Rekristallisationsglühen
- c) Anlassvergüten

bezüglich

- 1. Temperatur
- 2. ablaufende Vorgänge
- 3. beabsichtigte Wirkung

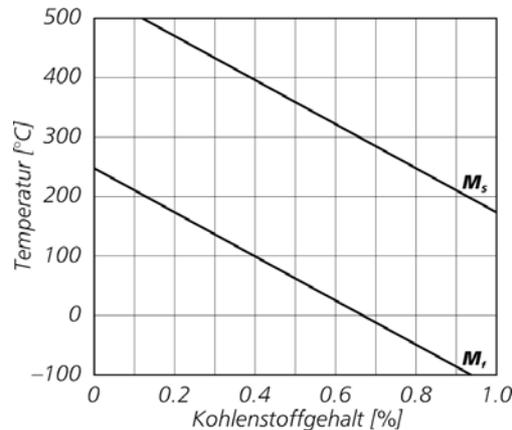
- d) Tragen Sie in der untenstehenden Liste bei jedem Wärmebehandlungsverfahren ein, welchen Einfluss es auf die Festigkeit hat (Senkung, Steigerung, kein Einfluss).

<b>Verfahren</b>	<b>Einfluss auf die Festigkeit</b>
Normalglühen	
Spannungsarmglühen	
Weichglühen	
Härten	
Rekristallisationsglühen	

- e) Welches Glühverfahren schlagen Sie vor, wenn Sie ein Material anschließend kaltumformen wollen?

## 5 Abschrecken von Stahl

Gegeben ist der Verlauf der Martensit-Start-Temperatur und der Martensit-Finish-Temperatur in Stählen in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehalts (siehe Abbildung). Die beiden Stähle A (0.35 % C) und B (0.77 % C) werden aus dem Austenitgebiet schnell auf Raumtemperatur abgeschreckt (keine Bainit-, Perlit- oder Ferritbildung).



Erwarten Sie, daß Restaustenit im Gefüge auftritt:

- beim Stahl A?
- beim Stahl B?
- Falls beim beschriebenen Vorgehen in einem Stahl Restaustenit auftritt, wie kann man diesen eliminieren?

Mögliche Theoriefragen:

- Wie heißen die Temperaturen, welche beim Abschrecken unterschritten werden müssen,
  - damit 1% Martensit entsteht
  - damit 100% Martensit entsteht
- Wie hängen diese Temperaturen vom Kohlenstoffgehalt des Stahles ab
- Ist die Menge des gebildeten Martensits von der Abkühlungsgeschwindigkeit abhängig? (Bedingungen angeben)
- Woraus kann das abgeschreckte Gefüge bei Raumtemperatur bestehen?
- Wie wirken sich elastische und plastische Verformungen des Werkstoffes aus?

# 1 Relaxation

# 4 Punkte

Eine Stahlschraube, die unter erhöhter Temperatur im Einsatz ist, wird auf die Spannung  $\sigma_i$  vorgespannt. Wenn die Spannung auf 80% dieses Wertes abgesunken ist, muss die Schraube gemäss Konstruktionsrichtlinie nachgezogen werden.

$E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$   
 $A = 3.7 \cdot 10^{-5} (\text{mm}^2/\text{N})^5/\text{s}$   
 $\vartheta = 480^\circ\text{C}$   
 $n = 5$   
 $Q = 2.3 \cdot 10^5 \text{ J/mol}$   
 $R = 8.31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$

- a) Wie gross darf  $\sigma_i$  sein, wenn das Wartungsintervall 200 Tage betragen soll?  
 b) Bezeichnen Sie in der nachstehenden Liste mit "+" die Eigenschaften, dank welcher ein Werkstoff weniger kriecht, mit "-" die anderen.
- Grobkorn
  - Phasengemisch (Ausscheidungen)
  - Grosse Stapelfehlerenergie
  - Überstruktur

**Lösung**

a)

$$B = A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad B = 3.7 \cdot 10^{-5} \cdot \exp\left(\frac{-2.3 \cdot 10^5 \text{ J/mol}}{8.31 \text{ J/mol}\cdot\text{K} \cdot (480 + 273) \text{ K}}\right) = 4.03 \cdot 10^{-21} (\text{mm}^2/\text{N})^5/\text{s}$$

Formel {0.5}<sub>0.5</sub>, Wert {0.5}<sub>1</sub>

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

$$\sigma_i = \left[ \left( \frac{1}{(x)^{n-1}} - 1 \right) \frac{1}{(n-1) \cdot B \cdot E \cdot t} \right]^{\frac{1}{n-1}} = \left[ \frac{\frac{1}{(0.8)^{5-1}} - 1}{(5-1) \cdot 4.03 \cdot 10^{-21} \frac{1}{\text{s}} \left( \frac{\text{mm}^2}{\text{N}} \right)^5 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa} \cdot 1.73 \cdot 10^7 \text{ s}} \right]^{\frac{1}{5-1}} = 70.5 \text{ MPa}$$

Formel {1.5}<sub>2.5</sub>, Wert {0.5}<sub>3</sub>

b) "+" kleine Kriechneigung, "-" grosse Kriechneigung.

- + Grobkorn {0.25}<sub>3.25</sub>
- + Phasengemisch (Ausscheidungen) {0.25}<sub>3.5</sub>
- Grosse Stapelfehlerenergie {0.25}<sub>3.75</sub>
- + Überstruktur {0.25}<sub>4</sub>

**2 Spannungsrelaxation****5 Punkte**

Eine Schraube wird auf  $\sigma = 70 \text{ MPa}$  vorgespannt. Wenn die Spannung auf 75% dieses Wertes abgesunken ist, muss die Schraube nachgespannt werden.

- a) Nach welcher Zeit ist dies nötig?  
 b) Was kann man materialseitig tun, um das Kriechen einzudämmen?

$$\begin{aligned} E &= 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa} \\ A &= 3.8 \cdot 10^{-5} \text{ [(mm}^2/\text{N)}^5/\text{s}] \\ T &= 460^\circ\text{C} \\ n &= 5 \\ Q &= 2.2 \cdot 10^5 \text{ J/mol} \\ R &= 8.31 \text{ J/mol}\cdot\text{K} \end{aligned}$$

**Lösung**

a)

$$T = 460 + 273 = 733 \text{ K}$$

$$B = A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) = 3.8 \cdot 10^{-5} \cdot \exp\left(\frac{-2.2 \cdot 10^5 \text{ J/mol}}{8.31 \text{ J/mol}\cdot\text{K} \cdot 733 \text{ K}}\right) = 7.84 \cdot 10^{-21} (\text{mm}^2/\text{N})^5/\text{s}$$

Formel {1}\_1 Wert {1}\_2

$$\frac{1}{\sigma^{n-1}} - \frac{1}{\sigma_i^{n-1}} = (n-1) \cdot B \cdot E \cdot t \quad \text{Formel \{0.5\}_{2.5}}$$

$$t = \frac{1}{B \cdot E \cdot (n-1)} \cdot \frac{1}{\sigma_i^{n-1}} \cdot \left(\frac{1}{0.6^{n-1}} - 1\right)$$

$$= \frac{1}{7.84 \cdot 10^{-21} (\text{mm}^2/\text{N})^5/\text{s} \cdot 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa} \cdot 4} \cdot \frac{1}{70^4 \text{ MPa}^4} \cdot \left(\frac{1}{0.75^4} - 1\right) = 1.367 \cdot 10^7 \text{ s} = 0.433 \text{ a}$$

Formel {1}\_{3.5} Wert {1}\_{4.5}

b) *Kriechfeste Werkstoffe:*

- *Hoher Schmelzpunkt*
- *Phasengemisch mit feinverteilter Phase (Ausscheidungen), temperaturbeständiges Gefüge.*
- *Kleine Stapelfehlerenergie: Quergleiten und Klettern erschwert.*
- *Grobkorn*

$$4 \times \{0.25\}_{5.5}$$

maximal 5 Punkte

**3 Kriechen****3 Punkte**

Ein Rundstab soll bei einer Temperatur von 720 °C eingesetzt werden und dabei innerhalb eines Jahres die Kriechdehnung  $\varepsilon_{zul} = 0.001$  nicht überschreiten.

Wie gross darf die Spannung sein, welcher er unterworfen ist?

Universelle Gaskonstante  $R = 8.314 \text{ J/mol K}$

Aktivierungsenergie  $Q = 2.25 \cdot 10^5 \text{ J/mol}$

Parameter für das Norton-Gesetz:

Konstante  $A = 3.26 \cdot 10^{-5} [(\text{mm}^2/\text{N})^5/\text{s}]$

Kriechexponent  $n = 5$

*Lösung:*

$$a) \dot{\varepsilon} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \Rightarrow \varepsilon_{zul} \geq \varepsilon = \dot{\varepsilon} \cdot t = A \cdot \sigma^n \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right) \quad \text{Basisformel } \{1\}_1$$

$$\Rightarrow \sigma = \left( \frac{\varepsilon_{zul}}{A \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R \cdot T}\right)} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{Umformung } \{1\}_2$$

$$\Rightarrow \sigma = \left( \frac{0.001}{3.26 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\text{mm}^2}{\text{N}}\right)^{-5} \cdot \frac{1}{\text{s}} \cdot 3.15 \cdot 10^7 \text{ s} \cdot \exp\left(-\frac{2.25 \cdot 10^5 \text{ J/mol}}{8.314 \text{ J/molK} \cdot (720 + 273) \text{ K}}\right)} \right)^{\frac{1}{5}}$$

$$\Rightarrow \sigma = \left( \frac{0.001}{3.26 \cdot 10^{-5} \left(\frac{\text{mm}^2}{\text{N}}\right)^{-5} \cdot \frac{1}{\text{s}} \cdot 3.15 \cdot 10^7 \text{ s} \cdot \exp(-27.25)} \right)^{\frac{1}{5}} = 14.6 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Wert } \{1\}_3$$

....

**4 Wärmebehandlung****5 Punkte**

Beschreiben Sie für Eisenwerkstoffe die Wärmebehandlungsverfahren

- a) Weichglühen
- b) Rekristallisationsglühen
- c) Anlassvergüten

bezüglich

1. Temperatur
2. ablaufende Vorgänge
3. beabsichtigte Wirkung

*Lösung*a) *Weichglühen*

1. Meist unterhalb  $A_{C1}$ , bei übereutektoiden Stählen Pendeln um  $A_{C1}$  {0.5}<sub>0.5</sub>
2. der lamellare und der Korngrenzen-Zementit bilden Kugeln. {0.5}<sub>1</sub>
3. bessere Zerspanbarkeit, (Feinschneidbarkeit) (Umformbarkeit), Härbarkeit. {0.5}<sub>1.5</sub>

b) *Rekristallisationsglühen*

1. Unterhalb  $A_{C1}$ , Mindesttemperatur erforderlich ( $0.4 T_S$ ) {0.5}<sub>2</sub>
2. Kornneubildung ohne Phasenumwandlung. {0.5}<sub>2.5</sub>
3. Aufhebung der Verfestigung durch Kaltumformung {0.5}<sub>3</sub>  
(Mindestkaltumformung (1-5%), (für erneutes Kaltumformen))

c) *Anlassvergüten*

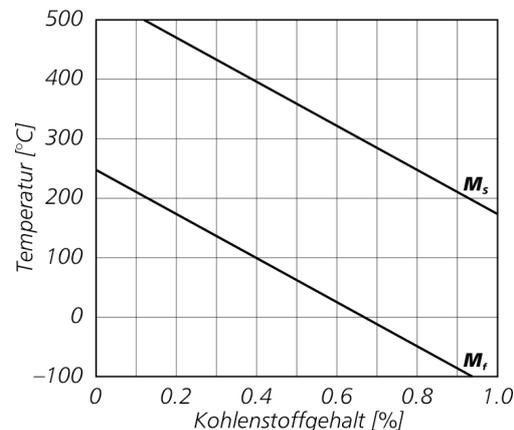
1. Oberhalb  $A_{C3}$  ( $A_{cm}$ ), Abschrecken unter  $M_S$ . Erwärmen (auf ca. 400-650 °C) {0.5}<sub>3.5</sub>
2. Austenitisieren, Bildung von tetragonalem Martensit, Bildung von kubischem Martensit aus diesem und aus Restaustenit. Bildung von  $\epsilon$ -Karbonid und ev. Sonderkarbiden. {1}<sub>4.5</sub>
3. Härte und Zähigkeit. {0.5}<sub>5</sub>

- |                          |                     |
|--------------------------|---------------------|
| d) Normalglühen          | Steigerung          |
| Spannungsarmglühen       | kein Einfluss       |
| Weichglühen              | Senkung             |
| Härten                   | (starke) Steigerung |
| Rekristallisationsglühen | Senkung             |

- e) Für Kaltumformung ist ein *weichgeglühtes* Ausgangsgefüge ideal: es besitzt eine tiefe Festigkeit und hohe Duktilität.

## 5 Abschrecken von Stahl

Gegeben ist der Verlauf der Martensit-Start-Temperatur und der Martensit-Finish-Temperatur in Stählen in Abhängigkeit des Kohlenstoffgehalts (siehe Abbildung). Die beiden Stähle A (0.35 % C) und B (0.77 % C) werden aus dem Austenitgebiet schnell auf Raumtemperatur abgeschreckt (keine Bainit-, Perlit- oder Ferritbildung).



Erwarten Sie, daß Restaustenit im Gefüge auftritt:

- beim Stahl A?
- beim Stahl B?
- Falls beim beschriebenen Vorgehen in einem Stahl Restaustenit auftritt, wie kann man diesen eliminieren?

Lösung:

- kein Restaustenit
- Restaustenit ( $M_f$  liegt unter Raumtemperatur)
- Durch Abschrecken unter  $M_f$  oder Anlassen.

### Lösung zu den Theoriefragen

- Martensitstart-Temperatur  $M_S$
  - Martensitfinish-temperatur  $M_F$
- Höherer Kohlenstoffgehalt senkt  $M_S$  und  $M_F$
- Nein, wenn die Abkühlgeschwindigkeit gross genug ist, dass die Nasen der Diffusionsvorgänge nicht geschnitten werden (dann nur abhängig davon, um wieviel  $M_S$  unterschritten wurde);  
sonst ja.
- Martensit, (Restaustenit),  
allenfalls Bainit (Zwischenstufengefüge) Perlit, Ferrit.
- elastische und plastische Verformungen des Werkstoffes bewirken eine **Erhöhung** der Martensitstarttemperatur.