

3 Wahr oder Falsch?

- a) Eine Spannung, die direkt zum Versagen führt, überschreitet eine statische Festigkeit.
Richtig: Statische Festigkeiten (σ_S oder σ_B) geben Beschränkungen für alle Lasten unabhängig von der Anzahl Lastspielen an. Eine einmalige Überschreitung führt zum Versagen.
- b) Ein harmonisches Lastspiel wird durch zwei der vier Grössen Oberspannung, Unterspannung, Mittelspannung oder Ausschlagsspannung charakterisiert.
Richtig: Sind zwei dieser vier Grössen bekannt, können die anderen beiden berechnet werden.
- c) Die Wechselfestigkeit bezeichnet diejenige Festigkeit mit gleich grosser Zug- und Druckamplitude, die dauerhaft ertragen werden kann.
Richtig: Die Wechselfestigkeit bezeichnet die dauerhaft ertragbare Ausschlagsspannung, welche bei einer verschwindenden Mittelspannung gemessen wird ($\sigma_m = 0$). Somit ist sie die grösste dauerhaft ertragbare Zug-/Druckamplitude.
- d) Ein Dauerfestigkeitsschaubild könnte aus unendlich vielen Wöhler-Diagrammen, bei unterschiedlichen Lastspielen im Dauerfestigkeitsbereich, konstruiert werden.
Richtig: Das Dauerfestigkeitsdiagramm könnte aus unendlich vielen Wöhlerdiagrammen mit verschiedenen Mittelspannungen konstruiert werden. Dabei sind nur die Ausschlagsspannungen im Dauerfestigkeitsbereich von Interesse, da nur diese im Smith-Diagramm charakterisiert werden.
- e) Die Schadenslinie nach French darf nicht überschritten werden, wenn das Bauteil keine eingeschränkte Dauerfestigkeit aufweisen soll.
Richtig: Wird die Schadenslinie überschritten, so wird das Bauteil geschädigt. Diese Schädigung verringert die Dauerfestigkeit und verunmöglicht eine sehr hohe Anzahl Belastungszyklen.
- f) Ein Dauerfestigkeitsschaubild, welches nicht zentrisch symmetrisch aufgebaut ist, beschreibt Materialien, die auf Zug und Druck unterschiedlich reagieren.
Richtig: Erträgt ein Material viel mehr Druck als Zug (z. B. Gusseisen), so ist der linke Teil des Dauerfestigkeitsdiagrammes (mit negativen Mittelspannungen) viel grösser ausgeprägt.
- g) Bei der Berechnung der Gestaltwechselfestigkeit berücksichtigt der Grössenfaktor b_0 , dass grössere Bauteile aufgrund der höheren Wahrscheinlichkeit für Schwachstellen (Inhomogenitäten, Poren, Mikrorisse, bewegliche Versetzungen) wechselnde Spannungen schlechter ertragen als kleinere Bauteile.
Richtig: Deshalb geht er in die Berechnung der Kerbwechselfestigkeit ein und schwächt diese ab, je grösser das Bauteil.

- h) "Hochtrainieren" bezeichnet den Vorgang, bei dem die Belastung auf ein Bauteil stufenweise erhöht wird. Es resultiert eine erhöhte Ausschlagsspannung im Kurzzeitfestigkeitsbereich.
Falsch: Aus diesem Vorgang resultiert eine erhöhte ertragbare Dauerfestigkeit, also eine Steigerung der ertragbaren Ausschlagsspannung im Dauerfestigkeitsbereich.
- i) Duktile und porenfreie Werkstoffe mit fehlerfreien Oberflächenschichten, welche unter Zugspannungen stehen, sind geeignet, um wechselnde Beanspruchungen zu ertragen.
Falsch: Die Oberflächenschichten müssen unter Druckspannungen stehen, sodass Risse geschlossen, statt geöffnet werden.

4 Aufgaben

4.1 Kriechen

Es gilt:

$$\varepsilon_s = \dot{\varepsilon}_s \cdot t = A \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \cdot t$$

Für alle 3 Turbinenschaufeln gilt demnach:

$$\frac{1}{A \cdot \sigma^n} = \text{const} = \frac{t}{\varepsilon_s} \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right)$$

Für die Betriebszeit im neuen Triebwerk gilt also:

$$\begin{aligned} \frac{t_1}{\varepsilon_{S1}} \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_1}\right) &= \frac{t_3}{\varepsilon_{S3}} \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_3}\right) \\ \rightarrow \frac{t_3}{t_1} \cdot \frac{\varepsilon_{S1}}{\varepsilon_{S3}} &= \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_1} - \frac{-Q}{R \cdot T_3}\right) \end{aligned}$$

daraus folgt:

$$t_3 = t_1 \cdot \frac{\varepsilon_{S3}}{\varepsilon_{S1}} \cdot \exp\left(\frac{Q}{R} \cdot \left(\frac{T_1 - T_3}{T_1 \cdot T_3}\right)\right)$$

Es fehlt noch die Aktivierungsenergie Q . Diese kann mit Hilfe der Schaufeln 1 und 2 berechnet werden.

$$\begin{aligned} \frac{1}{A \cdot \sigma^n} &= \frac{t_1}{\varepsilon_s} \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_1}\right) = \frac{t_2}{\varepsilon_s} \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_2}\right) \\ \rightarrow \frac{t_2}{t_1} &= \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_1} - \frac{-Q}{R \cdot T_2}\right) \end{aligned}$$

daraus folgt:

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{1}{\frac{1}{R \cdot T_2} - \frac{1}{R \cdot T_1}} \cdot \ln \frac{t_2}{t_1} \\
 &= \frac{R \cdot T_1 \cdot T_2}{T_1 - T_2} \cdot \ln \frac{t_2}{t_1} \\
 &= \frac{8.314 \text{ J}/(\text{mol K}) \cdot 1423 \text{ K} \cdot 1323 \text{ K}}{1423 \text{ K} - 1323 \text{ K}} \ln \frac{8500 \text{ h}}{3200 \text{ h}} = 152.9 \text{ kJ/mol}
 \end{aligned}$$

Eingesetzt ergibt sich dann:

$$t_3 = 3200 \text{ h} \cdot \frac{0.9}{1} \cdot \exp \left(\frac{152900 \text{ J/mol}}{8.314 \text{ J}/(\text{mol K})} \cdot \left(\frac{1423 \text{ K} - 1393 \text{ K}}{1423 \text{ K} \cdot 1393 \text{ K}} \right) \right) = 3804 \text{ h}$$

4.2 Spannungsrelaxation

- a) Gesucht wird ein Vergleich der Spannungen $\frac{\sigma_a}{\sigma_b}$. Bekannt sind aber nur die beiden Zeiten.

Aus dem Skript wissen wir:

$$\frac{1}{\sigma^{n-1}} - \frac{1}{\sigma_1^{n-1}} = (n-1) \cdot B \cdot E \cdot t$$

in der Zeit t fällt also die Spannung vom Anfangswert σ_i auf σ runter. Für $\sigma = x \cdot \sigma_i$:

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

Eingesetzt für die Fälle A und B:

$$\frac{t_B}{t_A} = \frac{\frac{\frac{1}{x^{n-1}} - 1}{(n-1) \cdot B \cdot E \cdot \sigma_{iB}^{n-1}}}{\frac{\frac{1}{x^{n-1}} - 1}{(n-1) \cdot B \cdot E \cdot \sigma_{iA}^{n-1}}} = \frac{\sigma_{iA}^{n-1}}{\sigma_{iB}^{n-1}}$$

$$\frac{\sigma_{iA}}{\sigma_{iB}} = \left(\frac{t_B}{t_A} \right)^{\frac{1}{n-1}} = \left(\frac{4a}{2a} \right)^{\frac{1}{5-1}} = 2^{0.25} = 1.19$$

Die Schraube A wurde folglich mehr vorgespannt.

- b) Die Schraube A wurde um 19% auf den 1.19-fachen Wert von Schraube B vorgespannt.

4.3 Schadensakkumulation

a)

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon} &= A \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T}\right) \\ &= 3.6 \times 10^{-5} \left(\text{mm}^2/\text{N}\right)^5 / \text{s} \cdot (45 \text{ MPa})^5 \cdot \exp\left(\frac{-220 \text{ kJ/mol}}{8.314 \text{ J}/(\text{mol K}) \cdot 923 \text{ K}}\right) = 23.530 \times 10^{-10} / \text{s}\end{aligned}$$

b)

$$\varepsilon_1 = \dot{\varepsilon} \cdot t_1 = 23.530 \times 10^{-10} / \text{s} \cdot 1\,800\,000 \text{ s} = 0.00424$$

c)

$$t_{\text{rest}} = \frac{\varepsilon_{\text{zul}}}{\dot{\varepsilon}} - t_1 = 680 \text{ h}$$

d) Als erstes werden die einzelnen Stücke der Belastung berechnet und anschliessend die durchschnittliche Belastung in einer Sekunde.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cr,1} &= A \cdot \sigma_i^n \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_1}\right) \cdot \Delta t_1 \\ &= 3.6 \times 10^{-5} \left(\text{mm}^2/\text{N}\right)^5 / \text{s} \cdot (44 \text{ MPa})^5 \cdot \exp\left(\frac{-220 \text{ kJ/mol}}{8.314 \text{ J}/(\text{mol K}) \cdot 892 \text{ K}}\right) \cdot 0.5 \text{ s} = 3.882 \times 10^{-10}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cr,2} &= A \cdot \sigma_i^n \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_2}\right) \cdot \Delta t_2 \\ &= 3.6 \times 10^{-5} \left(\text{mm}^2/\text{N}\right)^5 / \text{s} \cdot (48 \text{ MPa})^5 \cdot \exp\left(\frac{-220 \text{ kJ/mol}}{8.314 \text{ J}/(\text{mol K}) \cdot 894 \text{ K}}\right) \cdot 0.5 \text{ s} = 6.410 \times 10^{-10}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cr,3} &= A \cdot \sigma_i^n \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_3}\right) \cdot \Delta t_3 \\ &= 3.6 \times 10^{-5} \left(\text{mm}^2/\text{N}\right)^5 / \text{s} \cdot (46 \text{ MPa})^5 \cdot \exp\left(\frac{-220 \text{ kJ/mol}}{8.314 \text{ J}/(\text{mol K}) \cdot 896 \text{ K}}\right) \cdot 0.5 \text{ s} = 5.535 \times 10^{-10}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{cr,4} &= A \cdot \sigma_i^n \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_4}\right) \cdot \Delta t_4 \\ &= 3.6 \times 10^{-5} \left(\text{mm}^2/\text{N}\right)^5 / \text{s} \cdot (45 \text{ MPa})^5 \cdot \exp\left(\frac{-220 \text{ kJ/mol}}{8.314 \text{ J}/(\text{mol K}) \cdot 893 \text{ K}}\right) \cdot 0.5 \text{ s} = 4.491 \times 10^{-10}\end{aligned}$$

Die Kriechrate beträgt also:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon_{cr,1} + \epsilon_{cr,2} + \epsilon_{cr,3} + \epsilon_{cr,4}}{2s} = 10.159 \times 10^{-10} /s$$

Die gesamte Lebensdauer der Turbinenschaufel ist damit:

$$t_{ges} = \frac{\epsilon_{zul}}{\dot{\epsilon}} = 2734.3 \text{ h}$$

Die Schaufeln müssen also 1554 h später gewechselt werden.

4.4 Weichglühen

- Ziel des Weichglühens ist die Umwandlung des Korngrenzenzementit und des lamellaren Zementits in kugelig eingeformten Zementit sowie ein feines Korn. Damit erreicht man eine bessere Zerspanbarkeit und Feinschneidigkeit.
- Für untereutektoide Stähle bis dicht unterhalb A_{c1} . Bei übereutektoiden Stählen ein Pendeln um A_{c1} mit nachfolgendem langsamen Abkühlen zum Erzielen eines möglichst weichen Zustandes.
- Siehe Abb. 4.1

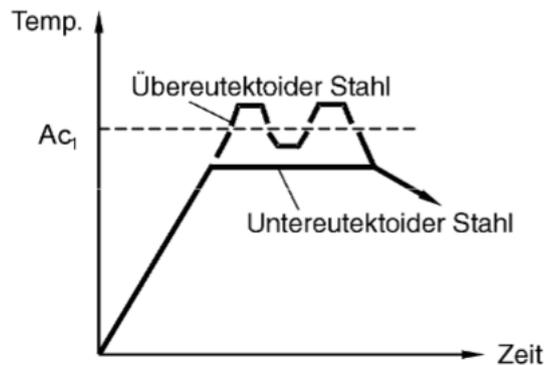


Abbildung 4.1: Temperaturverlauf Weichglühen

4.5 Spannungsarmglühen

Für beide Temperaturen gilt: Bei der Temperatur T_j fällt in der Zeit t_j die Spannung von σ_i auf $\sigma = \frac{\sigma_i}{4}$ ab.

$$\frac{1}{\sigma^{n-1}} - \frac{1}{\sigma_i^{n-1}} = (n-1) \cdot A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_1}\right) \cdot E \cdot t_1$$
$$\frac{1}{\sigma^{n-1}} - \frac{1}{\sigma_i^{n-1}} = (n-1) \cdot A \cdot \exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_2}\right) \cdot E \cdot t_2$$

Gesucht wird der Faktor $\frac{t_2}{t_1}$ also:

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{\exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_1}\right)}{\exp\left(\frac{-Q}{R \cdot T_2}\right)} = \exp\left(\frac{Q}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right) = \exp\left(\frac{82000 \text{ J/mol}}{8.314 \text{ J/(mol K)}} \cdot \left(\frac{1}{853 \text{ K}} - \frac{1}{913 \text{ K}}\right)\right) = 2.14$$

Der Prozess dauert 2.14 mal länger und damit rund 128 min

4.6 Anlassvergüten

- Anlassvergüten bezweckt maximale Zähigkeit und Festigkeit des Werkstückes.
- Erwärmen:** oberhalb A_{c3} , Austenitisieren, der Kohlenstoff wird im Austenit gelöst.
Abschrecken: Der Kohlenstoff verbleibt im Gitter: Martensit. Hart und spröde.
Anlassen: wieder erwärmen, Härte und Festigkeit nehmen etwas ab, Zähigkeit nimmt zu.
- Legierungselemente senken die kritische Abkühlgeschwindigkeit und verbessern damit die Durchhärbarkeit der Bauteile.

4.7 Wärmebehandlung

- Diese Gefügestruktur ist vermutlich beim Rekristallisationsglühen entstanden.
- Vor der Wärmebehandlung wurde eine Kaltverformung gemacht. Dies ist an den drei Zonen A, B und C erkennbar. Wobei hier A nicht verformt, B schwach verformt und C stark verformt wurde.
- Siehe Abb. 4.2.

- d) Feinkörniges Gefüge entsteht beim Normalglühen.
- e) Das Korn wird dabei einheitlicher. Bei sehr grossen Unterschieden müssen aber mehrere Zyklen durchgeführt werden.
- f) Stahl wird knapp oberhalb von A_{c3} erwärmt (A_{c1} bei übereutektoiden Stählen). Dadurch wird das sich bildende Korn des Austenits feiner, beim anschliessenden Abkühlen das Ferrit-/Perlit Korn nochmals. Vorteile sind eine höhere Festigkeit, Beseitigung von Widmannstätten-Gefüge, Kaltverfestigung ist aufgehoben, eine verbesserte Zerspanbarkeit, sowie der Abbau von Eigenspannungen.

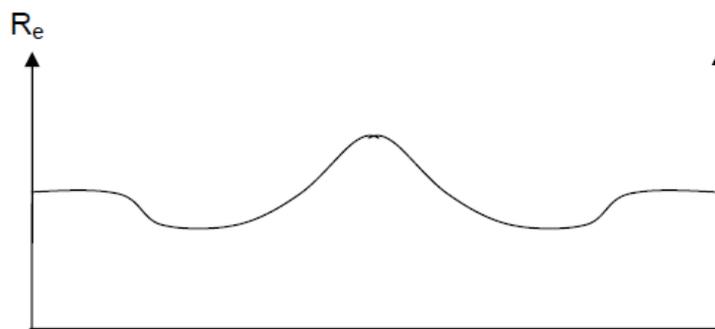


Abbildung 4.2: Festigkeitsverlauf

4.8 Martensitbildung

- a) Beim Stahl B wird Restaustenit entstehen, da die Martensit-Finish-Temperatur M_f unter der Raumtemperatur liegt. Da der Restaustenit wenig Versetzungen enthält, ist seine Härte gering. Insofern versucht man den Verbleib von Restaustenit zu minimieren.
- b) Dies kann jedoch durch Abschrecken des Werkstückes unterhalb von M_f oder durch Anlassen des Werkstückes umgangen werden. Beim Anlassen wird durch Erwärmen des Martensits auf etwa 150-200 °C die Verspannung durch Ausscheidung von Karbiden verringert, der Umklappvorgang des Restaustenits zu Martensit kann nachgeholt werden.