



Plastische Verformung

Merkmale der plastischen Verformung

Verformung eines Metalls

Verformung im Ein-/ Polykristall

Unterschiede elastische & plastische Verformung

Verformung in Polymeren

Verfestigung in Polymeren

Mechanismen zur Festigkeitssteigerung



Merkmale der plastischen Verformung

- Im σ - ε Diagramm: oberhalb $R_{p0,2} / R_e$
 - Irreversible Verformung
 - Festigkeitssteigerung



Vervielfachen von Versetzungen



Gegenseitiges Behindern der Versetzungen

- Versetzungswandern
- Bleibende Verschiebung der Atome



Verformung eines Metalls

1. „Kristallplastizitätstheorie“
(Versetzungen werden auf “Wanderschaft” geschickt)
2. Zusätzliche Versetzungen werden erzeugt
➡ erhöht die Festigkeit, da sich die Versetzungen gegenseitig behindern
3. Peierls Spannung wird überwunden (Spannung, die zum Aufbrechen von Bindungen und anschließendem Versetzungswandern erforderlich ist)
4. „Klettern“ von Versetzungen (Stufenversetzungen) Mechanismus des Leerstellenplatzwechsels = DIFFUSION
5. Versetzungswandern findet nur in Gleitebenen statt



Verformung im Ein-/ Polykristall

In einem Polykristall ist das Wandern von Versetzungen erleichtert, da es eine Vielzahl von unterschiedlichen Gleitsystemen (Gleitebene + Gleitrichtung) gibt. Gleichzeitig wird die Festigkeit erhöht, weil die Korngrenzen als Hindernisse für das Versetzungswandern dienen.

Durch Kornfeinung kann gleichzeitig Duktilität und Festigkeit gesteigert werden.



Zusammenfassung

Unterschiede elastische & plastische Verformung

Elastische Verformung:

[Steifigkeit] – Widerstand gegen elastische Formänderung

Reversible Verformung

(Werkstoff geht nach Entlastung in den Ausgangszustand zurück)

Aufweiten der Netzebenenabstände



Begründet in der Bindungsenergie der Atome



Zusammenfassung

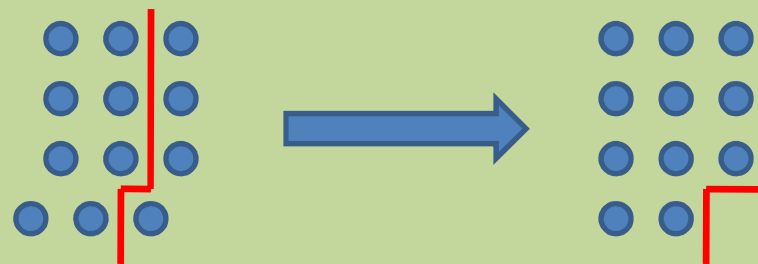
Unterschiede elastische & plastische Verformung

Plastische Verformung:

[Festigkeit] – Widerstand gegen Verformung und Bruch

Irreversible Verformung

Versetzungswandern



Begründet in der Überwindung der Fließspannung
(Aufbringen der kritischen Schubspannung)



Verformung in Polymeren

In amorphen Werkstoffen ist Versetzungswandern kein hilfreiches Modell



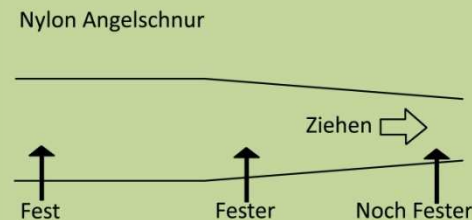
Stattdessen: Relativbewegung einzelner Segmente

1. Ausrichten der Polymerketten in Beanspruchungsrichtung



Verfestigung in Beanspruchungsrichtung

Bsp: Nylon Angelschnur



2. Mechanismus: Aufbrechen von Bindung

Glas: Starke Bindung (kovalente Ionenbindung) → fest/ spröde

Polymere: schwache Bindung (v.d. Waals Bindung) → in der Regel weich



Verfestigung in Polymeren

1. Blending (Gemisch von verschiedenen Polymeren)
z.B. Stoßstange PKW = PS + ABS + PMMA
2. Ziehen (Ausrichten der Ketten)
3. Crosslinking (Vernetzung der einzelnen C-C-Ketten)
4. Verstärken (Einbringen von Fasern / Partikeln (z.B. GFK))



Mechanismen zur Festigkeitssteigerung

Einfluss der Mikrostruktur

Einbringen von Hindernissen für das Versetzungswandern

- Bereits Punktfehler können Versetzungshindernisse darstellen (Mischkristallhärtung)
- Die innere Energie eines Werkstoffes wird durch das Einbringen von Versetzungshindernissen erhöht. (Ausnahme: Punktfehler)

Mischkristallhärtung

Versetzungshärtung

Korngrenzenhärtung

Teilchenhärtung



Mischkristallhärtung

Einbringen von Fremdatomen = Legieren

Alle Legierungselemente verursachen

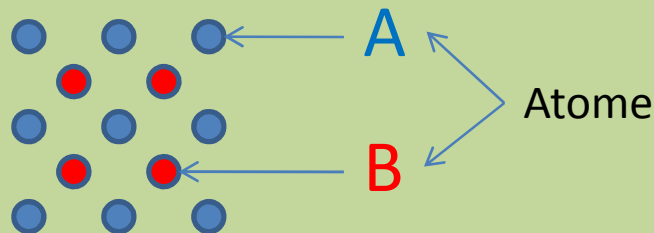
Verzerrungen des Gitters (Festigkeitssteigerung)

Das Wandern der Atome wird erschwert

$$\Delta\sigma_{MK} \approx \sqrt{C}$$

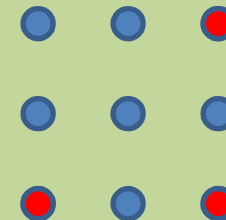
C = Konzentration der Mischkristalle

1. Einlagerungsmischkristalle



Legierungselemente liegen auf den
Zwischengitterplätzen
Kleine Legierungselemente (C, N, O)
Bsp: Stahl (Fe-C)

2. Substitutionsmischkristalle



Legierungselemente auf regulären
Gitterplätzen (ähnlich große Atomradien)
Große Legierungselemente
Bsp: Al-Mg



Versetzungshärtung

(Verformungshärtung)

Erzeugen einer hohen Versetzungsdichte
= Verformen

Anwendung: z.B.
Biegen, Walzen, Schmieden

$$\Delta\sigma_V \approx \sqrt{\rho}$$

ρ = Versetzungsdichte



Korngrenzenhärtung

(Feinkornhärtung)

Erzeugen von feinem Korn



Gezielt aus der Schmelze abkühlen
(je schneller abgekühlt wird, umso feiner wird das Korn)

$$\Delta \sigma_{KG} \approx \frac{1}{\sqrt{d_T}}$$

d_T = Korndurchmesser

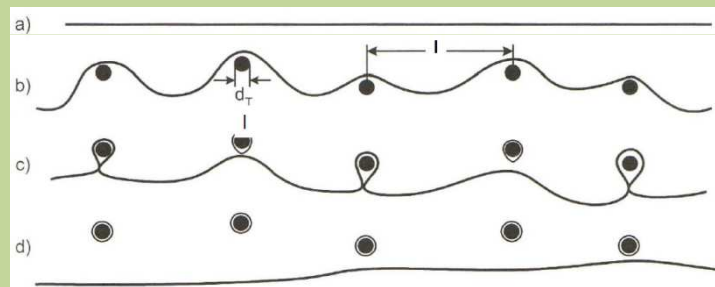


Teilchenhärtung

(Ausscheidungshärtung)

Verschiedene Phasen im Gefüge
= Legierungseigenschaft

Inkohärente Phasengrenzen



Die Wanderenergie
wird gebremst

Quelle: A. Pfennig

Umgehungsmechanismus nach Orowan

$$\Delta\sigma_T \approx \frac{1}{l} \quad l = \text{Teilchenabstand}$$

Bsp: Al-Cu-Legierungen z.B. 2025 (Airbus A380)