

Aushärtbarkeit von Aluminiumlegierungen

Name: Matthias Jasch
Matrikelnummer: 2402774
Mitarbeiter: Mirjam und Rahel Eisele
Gruppennummer: 7
Versuchsdatum: 19. Mai 2009
Betreuer: Regina Hörth

1 Einleitung

Die Härte von metallischen Werkstoffen kann auf verschiedene Arten erhöht werden. Alle diese Härteerhöhungen beruhen auf der Behinderung der Versetzungsbewegungen.

2 Aufgabenstellung

Bei diesem Versuch soll die Härte einer Al-12%Si- und einer Al-4%Cu-Legierung und deren elektrischer Widerstand in Abhängigkeit von der Auslagerungsdauer bestimmt werden. Die Härte wird nach Vickers bestimmt, die Auslagerungstemperatur betrug 250°C.

3 Theorie

Es gibt prinzipiell zwei Möglichkeiten, die Härte von metallischen Werkstoffen zu steigern: Die Verformungsverfestigung und die Legierungsverfestigung. Beide Arten bewirken eine Einschränkung der Versetzungsbeweglichkeit, deshalb steigt die Härte.

3.1 Verformungsverfestigung

Die Verformungsverfestigung beruht darauf, dass die Versetzungsdichte durch Kaltverformen des Werkstoffs erhöht wird. Durch die erhöhte Versetzungsdichte behindern sich die Versetzungen gegenseitig - der Werkstoff wird härter.

3.2 Legierungsverfestigung

Hier wird die Versetzungsbeweglichkeit dadurch eingeschränkt, dass Fremdatome in den Kristall eingebracht werden und so ein Spannungsfeld entsteht, das mit dem der Versetzung wechselwirkt. Hier kann man ebenfalls wieder zwei Fälle unterscheiden.

3.2.1 Mischkristallhärtung

Bei der Mischkristallhärtung sind Fremdatome in der Matrix gelöst. Diese Legierungen werden auch als „nicht aushärtbar“ bezeichnet, da die Verfestigung hier zu gering für technische Anwendungen ist. Bei Al-Si beispielsweise kann man durch Abschrecken ein fein lamellares Gefüge erhalten, bei dem sich beim Auslagern die enthaltenen Aluminiumkristalle vergrößern.

3.2.2 Ausscheidungshärtung

Ausscheidungsgehärtete Legierungen werden auch als „aushärtbare Legierungen“ bezeichnet, da hier eine wesentliche Härteerhöhung durch Ausbildung von Zweitphasen auftritt. Voraussetzung hierfür ist eine begrenzte Mischkristallbildung. Ein Beispiel für eine solche Legierung ist Al-Cu.

Kühlt man Al-Cu langsam ab, entsteht ein Gleichgewicht aus (Al)-Mischkristall und Al_2Cu , das auch als Θ -Phase bezeichnet wird. Beim Abschrecken wird die Bildung der Θ -Phase wegen ihrer großen Grenzflächenenergie unterdrückt und es entsteht ein metastabiler, übersättigter Mischkristall, der durch Ausscheiden von Teilchen in den stabilen Θ -Zustand übergeht.

Die verschiedenen Phasen, die beim Übergang auftreten sind

- **GP I-Zonen.** Sie bestehen aus monoatomaren Cu-Schichten auf den $\{100\}$ -Ebenen und bilden eine kohärente Grenzfläche zum Mischkristall. Die dadurch auftretenden elastischen Spannungen führen zu einem enormen Härteanstieg.
- **GP II-Zonen/ Θ'' -Phase.** Sie bilden sich erst nach einer Inkubationszeit. Die tetragonal verzerrten GP II-Zonen bestehen aus abwechselnden Schichten aus Al und Cu und sind ebenfalls kohärent zur Matrix.
- **Nichtgleichgewichtsphase Θ' .** Sie ist nur noch teilweise kohärent zur Matrix und besitzt eine tetragonale Gitterstruktur.
- **Θ -Phase.** Die Θ -Phase ist eine stabile intermetallische Phase. Sie hat tetragonale Struktur und ist vollständig inkohärent zum Mischkristall, außerdem trägt sie kaum mehr zur Festigkeitssteigerung bei, da Fehlpassungsversetzungen die Verzerrung des Matrixgitters minimieren.

Bilden sich Θ - und Θ' -Phasen auf Kosten der GP-Zonen, spricht man von Überalterung. Die Härte nimmt in diesem Fall wieder leicht ab.

3.3 Härteprüfung nach Vickers

Bei der Vickershärteprüfung wird eine Diamantpyramide mit einem Flächenöffnungswinkel von 136° in den zu prüfenden Werkstoff gedrückt. Prüflast p und Prüfdauer sind dabei wichtig. Anschließend wird der Eindruck, den die Pyramide auf dem Material hinterlassen hat, vermessen und die Härte kann mit Formel (1) bestimmt werden.

$$HV = \frac{p}{O} = \frac{2p \sin 68^\circ}{d^2} = \frac{1,8544 \cdot p}{d^2} \quad \left[\frac{kp}{mm^2} \right] \quad (1)$$

- HV : Vickershärte
 p : Prüflast
 O : Eindrucksfläche
 d : Eindrucksdiagonale

3.4 Widerstandsmessung

Allgemein setzt sich der elektrische Widerstand additiv aus zwei Teilen zusammen:

$$R = R_0 + R(T) \quad (2)$$

- R : elektrischer Widerstand
 R_0 : temperaturunabhängiger Restwiderstand, hervorgerufen durch Störungen im Gitter
 $R(T)$: temperaturabhängiger Teil, durch Wärmebewegungen der Teilchen hervorgerufen

Da der Widerstand von Metallen und Metallegierungen sehr gering ist, wird häufig zur Messung eine Thomsonbrücke (Abbildung 1) verwendet. Sie kann Widerstände im Bereich von 10^{-6} bis 1Ω sehr genau messen. Außerdem misst sie im stromlosen Zustand.

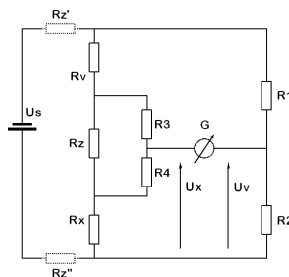


Abbildung 1: Thomson-Messbrücke [1]

4 Versuchsbeschreibung

Bei zwei vorbereiteten Proben wurde die Härte mittels einer Vickersprüfapparatur und bei zwei anderen der elektrische Widerstand mit einer Thomson-Messbrücke jeweils nach 0, 5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80 und 100 Minuten Auslagerung im Ofen bei 250°C bestimmt.

Zur Vickershärtemessung wurde eine Diamantpyramide, die an einem Lichtmikroskop befestigt war, 15 Sekunden mit einer Kraft von zwei Kilopond in Probe gedrückt und der Eindruck anschließend über das Mikroskop, das an einen Computer angeschlossen war, vermessen. Es wurden für jede Probe bei jeder Messung drei Eindrücke erstellt. Die Härtewerte in Tabelle 1 und Tabelle 2 sind Mittelwerte dieser drei Eindrücke.

Zur Widerstandsmessung mussten die Proben nur in die Messvorrichtung eingelegt und der Widerstand abgelesen werden.

Welche Probe die Al-Si- und welche die Al-Cu-Legierung war, war unbekannt. Eine der Proben war durch ein Loch markiert, damit man die Proben voneinander unterscheiden konnte. Im Folgenden ist daher immer die Rede von „Probe mit Loch“ und „Probe ohne Loch“.

5 Messwerte und Auswertung

5.1 Messwerte

Tabelle 1: Härtemesswerte der Probe ohne Loch. Falls nicht anders angegeben sind alle Werte in mm.

| Auslagerungs- zeit in min | Eindruck 1 | | | Eindruck 2 | | | Eindruck 3 | | | HV 2/15 in $\frac{kp}{mm^2}$ |
|------------------------------|------------|-------|-----------|------------|-------|-----------|------------|-------|-----------|---------------------------------|
| | d_1 | d_2 | \bar{d} | d_1 | d_2 | \bar{d} | d_1 | d_2 | \bar{d} | |
| 0 | 0,187 | 0,178 | 0,182 | 0,186 | 0,185 | 0,186 | 0,187 | 0,185 | 0,186 | 109 |
| 5 | 0,172 | 0,170 | 0,171 | 0,163 | 0,167 | 0,165 | 0,168 | 0,166 | 0,167 | 132 |
| 10 | 0,167 | 0,170 | 0,168 | 0,170 | 0,168 | 0,169 | 0,172 | 0,164 | 0,168 | 131 |
| 15 | 0,163 | 0,167 | 0,165 | 0,166 | 0,167 | 0,166 | 0,162 | 0,169 | 0,165 | 135 |
| 20 | 0,163 | 0,164 | 0,163 | 0,166 | 0,159 | 0,162 | 0,172 | 0,164 | 0,168 | 137 |
| 30 | 0,160 | 0,166 | 0,163 | 0,166 | 0,166 | 0,166 | 0,172 | 0,165 | 0,168 | 135 |
| 45 | 0,171 | 0,170 | 0,170 | 0,172 | 0,166 | 0,169 | 0,172 | 0,166 | 0,169 | 129 |
| 60 | 0,166 | 0,163 | 0,164 | 0,170 | 0,173 | 0,172 | 0,176 | 0,171 | 0,173 | 129 |
| 80 | 0,178 | 0,172 | 0,175 | 0,167 | 0,165 | 0,166 | 0,179 | 0,173 | 0,176 | 125 |
| 100 | 0,164 | 0,172 | 0,168 | 0,176 | 0,176 | 0,176 | 0,169 | 0,164 | 0,167 | 128 |

Tabelle 2: Härtemesswerte der Probe mit Loch. Falls nicht anders angegeben sind alle Werte in mm.

| Auslagerungs- zeit in min | Eindruck 1 | | | Eindruck 2 | | | Eindruck 3 | | | HV 2/15 in $\frac{kp}{mm^2}$ |
|------------------------------|------------|-------|-----------|------------|-------|-----------|------------|-------|-----------|---------------------------------|
| | d_1 | d_2 | \bar{d} | d_1 | d_2 | \bar{d} | d_1 | d_2 | \bar{d} | |
| 0 | 0,263 | 0,273 | 0,268 | 0,268 | 0,271 | 0,269 | 0,277 | 0,280 | 0,279 | 50 |
| 5 | 0,288 | 0,291 | 0,289 | 0,274 | 0,285 | 0,280 | 0,283 | 0,285 | 0,284 | 46 |
| 10 | 0,287 | 0,288 | 0,287 | 0,286 | 0,279 | 0,282 | 0,272 | 0,267 | 0,269 | 47 |
| 15 | 0,286 | 0,284 | 0,285 | 0,279 | 0,279 | 0,279 | 0,285 | 0,285 | 0,285 | 46 |
| 20 | 0,282 | 0,285 | 0,284 | 0,278 | 0,274 | 0,276 | 0,286 | 0,277 | 0,281 | 47 |
| 30 | 0,283 | 0,285 | 0,284 | 0,272 | 0,282 | 0,277 | 0,284 | 0,279 | 0,282 | 47 |
| 45 | 0,278 | 0,280 | 0,279 | 0,280 | 0,283 | 0,282 | 0,279 | 0,279 | 0,279 | 47 |
| 60 | 0,292 | 0,294 | 0,293 | 0,292 | 0,293 | 0,293 | 0,273 | 0,271 | 0,272 | 48 |
| 80 | 0,280 | 0,292 | 0,286 | 0,279 | 0,281 | 0,280 | 0,284 | 0,284 | 0,284 | 46 |
| 100 | 0,277 | 0,284 | 0,280 | 0,292 | 0,286 | 0,289 | 0,275 | 0,285 | 0,280 | 46 |

Tabelle 3: Widerstände der Proben in $m\Omega$

| Auslagerungszeit in min | Probe ohne Loch | Probe mit Loch |
|-------------------------|-----------------|----------------|
| 0 | 0,218 | 0,298 |
| 5 | 0,216 | 0,278 |
| 10 | 0,215 | 0,270 |
| 15 | 0,215 | 0,266 |
| 20 | 0,215 | 0,262 |
| 30 | 0,214 | 0,257 |
| 45 | 0,213 | 0,252 |
| 60 | 0,213 | 0,250 |
| 80 | 0,212 | 0,248 |
| 100 | 0,211 | 0,246 |

5.2 Diagramme

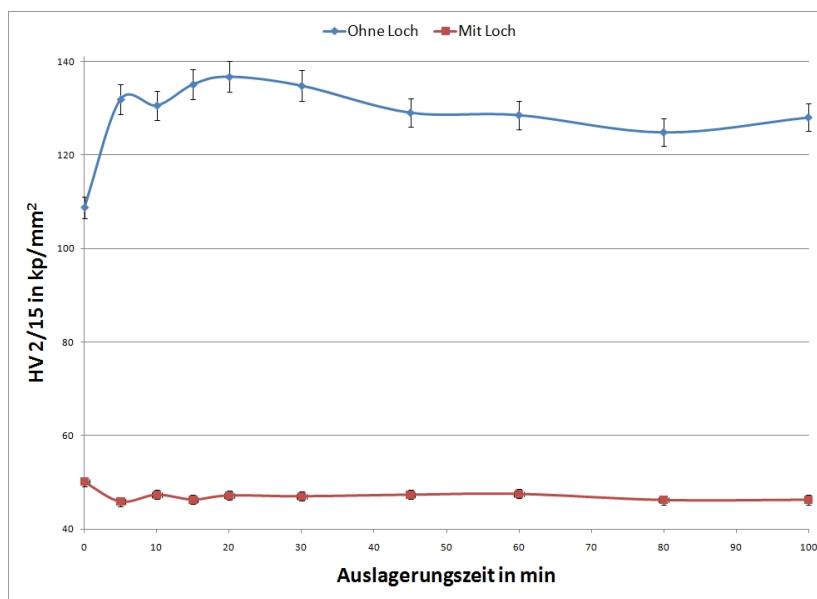


Abbildung 2: Härte-Zeit-Diagramm

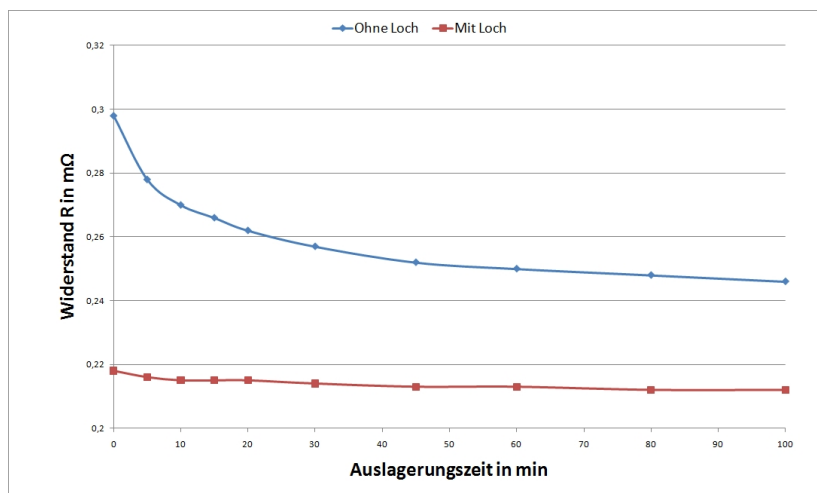


Abbildung 3: Widerstand-Zeit-Diagramm

5.3 Beschreibung

5.3.1 Abbildung 2

Man erkennt deutlich, dass die Härte der Probe ohne Loch zunächst mit einer kleinen Ausnahme stark ansteigt um später wieder leicht zu sinken. Die Härte der Probe mit Loch hingegen bleibt über den gesamten Messbereich ungefähr konstant.

5.3.2 Abbildung 3

Die Widerstandskurve der Probe mit Loch zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Härtekurve. Sie verändert sich kaum. Der Widerstand der Probe ohne Loch fällt dagegen immer weiter ab.

6 Fehlerbetrachtung

Zur Fehlerbetrachtung wird ein Messfehler beim Ausmessen der Eindrucksdiagonalen von $\Delta d = \pm 0,002 \text{ mm}$ angenommen. Mit der Fehlerfortpflanzung ergibt sich dann

$$\Delta HV = \left| \frac{\partial HV}{\partial d} \right| \cdot \Delta d = \left| \frac{-2 \cdot 1,8544 \cdot p}{d^3} \right| \cdot \Delta d \quad (3)$$

Die Fehler sind in Tabelle 4 aufgelistet und als Fehlerbalken in Abbildung 2 eingetragen.

Tabelle 4: Fehler der Härtemessungen ΔHV in $\frac{kp}{mm^2}$

| Probe ohne Loch | Probe mit Loch |
|-----------------|----------------|
| ± 2 | ± 1 |
| ± 3 | ± 1 |
| ± 3 | ± 1 |
| ± 3 | ± 1 |
| ± 3 | ± 1 |
| ± 3 | ± 1 |
| ± 3 | ± 1 |
| ± 3 | ± 1 |
| ± 3 | ± 1 |
| ± 3 | ± 1 |
| ± 3 | ± 1 |

7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Härte-Auslagerungszeit-Diagramm

Bei der Probe ohne Loch handelte es sich um Al-Cu, die Probe mit Loch war Al-Si. Dies erkennt man deutlich am Kurvenverlauf in Abbildung 2.

Der schnelle Anstieg der Härte der Probe ohne Loch ist damit zu erklären, dass sich GP I- und GP II-Zonen bilden. Das spätere Abflachen der Kurve liegt an der Überalterung. Bei der Härtemessung nach fünf Minuten wurde wahrscheinlich eine ungünstige Stelle in der Probe erwischt, deshalb fällt dieser Messwert etwas aus der Reihe.

Das leichte Sinken der Härte der Probe mit Loch nach längerer Auslagerungszeit ist auf die im Theorie-Teil erklärte Vergrößerung die damit verbundene zahlenmäßige Abnahme der Ausscheidungen zurückzuführen.

Verglichen mit reinem Aluminium, das eine Vickershärte von 15-20 $\frac{kp}{mm^2}$ besitzt, erkennt man gut, warum die Al-Si- im Gegensatz tz der Al-Cu-Legierung als „nicht aushärtbar“ bezeichnet wird. Ihr Härtewert liegt unter 50 $\frac{kp}{mm^2}$, wohingegen die Härte der Al-Cu-Legierung in diesem Versuch maximal einen Wert von rund 137 $\frac{kp}{mm^2}$ - was eine Steigerung um das 10fache gegenüber reinem Aluminium bedeutet - erreichte.

Neben der Möglichkeit, eine ungünstige Stelle in der Probe zu treffen, waren die Reaktionszeit beim Messen der Belastungsdauer und die nicht immer klar erkennbaren Ecken des Abdrucks weitere Fehlerquellen beim Messen der Härte.

7.2 Widerstand-Auslagerungszeit-Diagramm

Der Widerstand der Probe ohne Loch (Al-Cu) sinkt, da mit zunehmender Auslagerungszeit immer mehr Störstellen abgebaut werden.

Bei der Probe mit Loch (Al-Si) bleibt der Widerstand über den gesamten Messbereich nahezu konstant, da sich am Gefüge nichts ändert, was ihn beeinflussen könnte. Es ist lediglich ein sehr leichtes Absinken ebenfalls aufgrund von Störstellenabbau zu erkennen.

Literatur

- [1] WIKIPEDIA, <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/ThomsonBruecke.png>
- [2] G. GOTTSTEIN, *Physikalische Grundlagen der Materialkunde*, 3. Auflage, Springer-Verlag
- [3] PRAKTIKUMSSKRIPT, „Aushärtbarkeit von Al-Legierungen (AH)“
- [4] W. GUST, *Skript zur Vorlesung „Einführung in die Metallkunde“ WS 1999/2000*