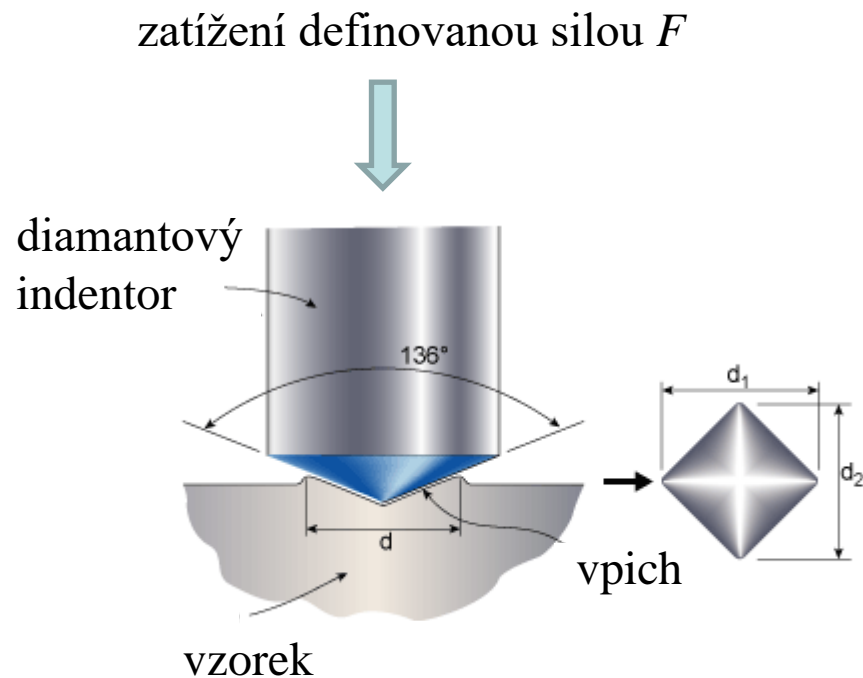


Příklad: Měření tvrdosti

- měření tvrdosti materiálů Vickersovou metodou (HV)



- tvrdost
$$HV = \frac{F}{S}$$

zatěžovací síla (pointing to F)

plocha vpichu (pointing to S)

- plocha vpichu
$$S = \frac{d^2}{2 \sin(136^\circ/2)}$$
$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

- Vickersovy jednotky (HV)

$$[HV] = \frac{[\text{kgf}]}{[\text{mm}^2]}$$

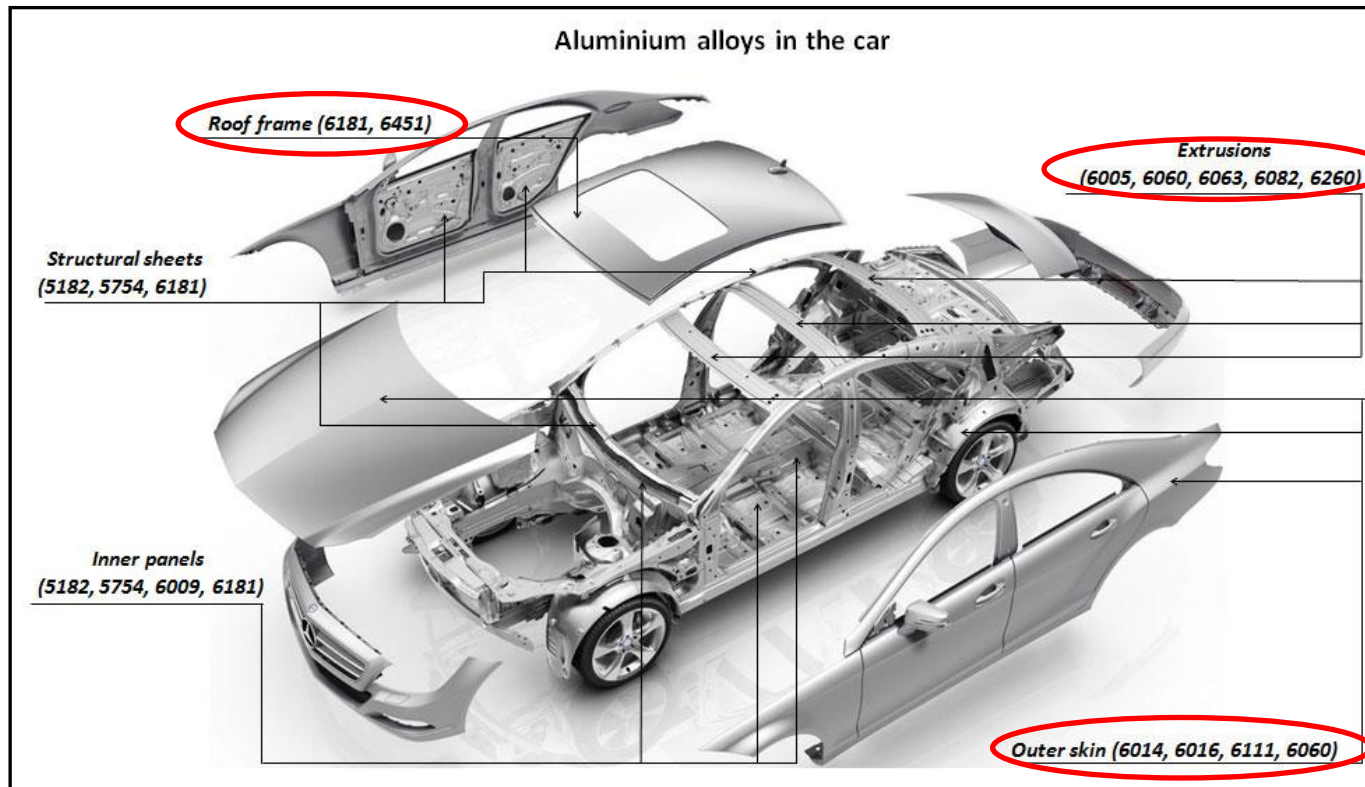
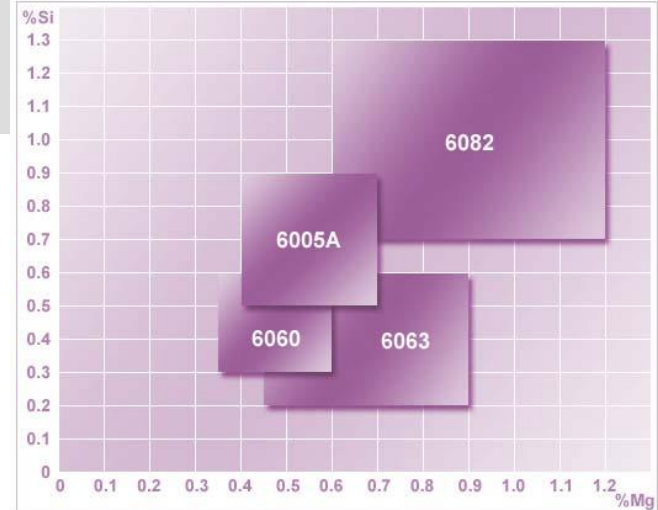
zatížení v kg (pointing to $[\text{kgf}]$)

plocha vpichu v mm^2 (pointing to $[\text{mm}^2]$)

$$[HV]_g = [\text{MPa}]$$

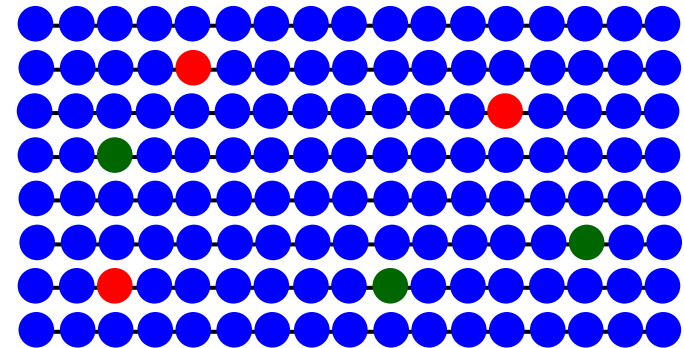
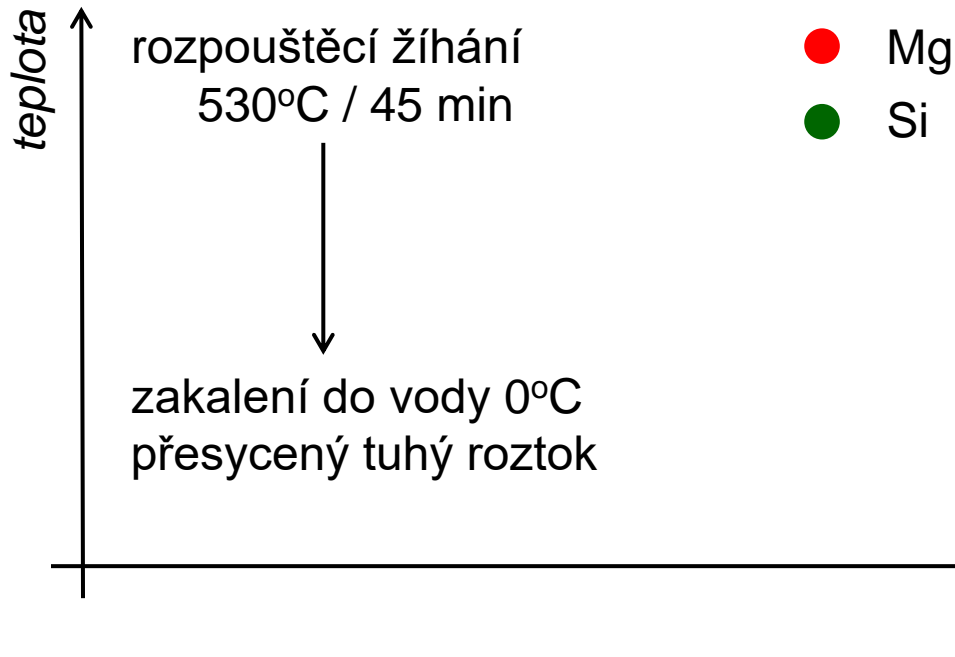
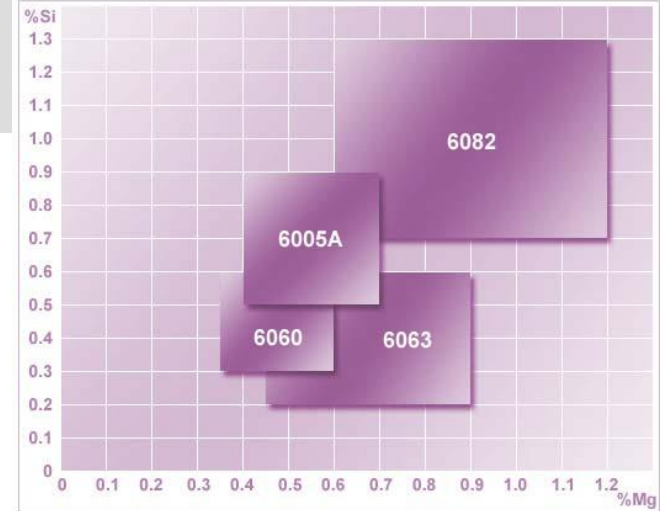
Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitiny řady 6000 (Al-Mg-Si)
- vytvrditelnost



Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitiny řady 6000 (Al-Mg-Si)
- vytvrditelnost
- přirozené stárnutí



Příklad: Měření tvrdosti

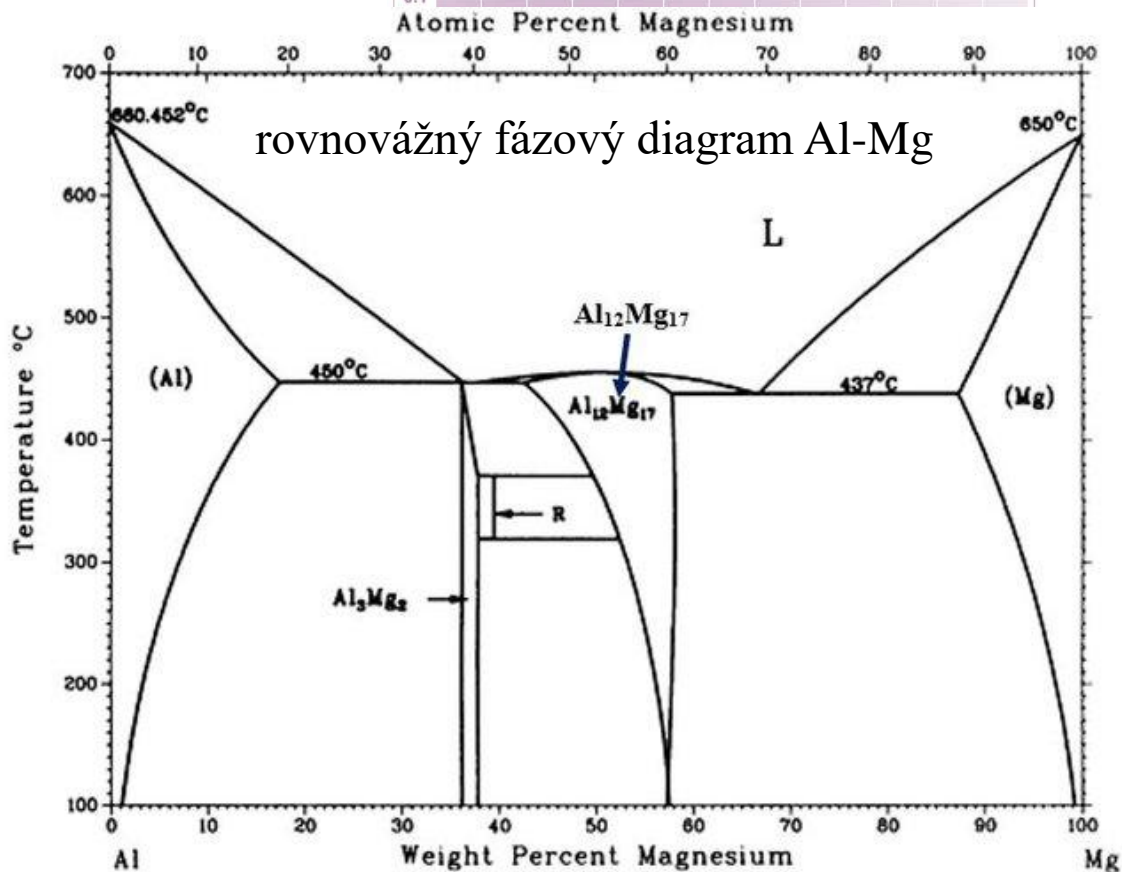
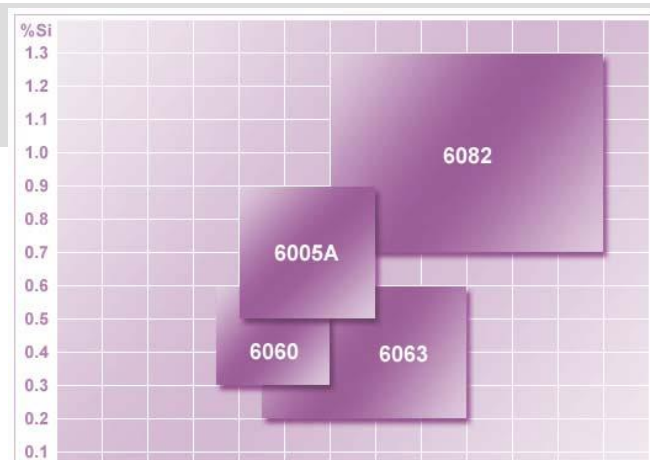
- Al slitiny řady 6000 (Al-Mg-Si)
- vytvrditelnost
- přirozené stárnutí

teplota ↑

rozpuštěcí žíhání
530°C / 45 min

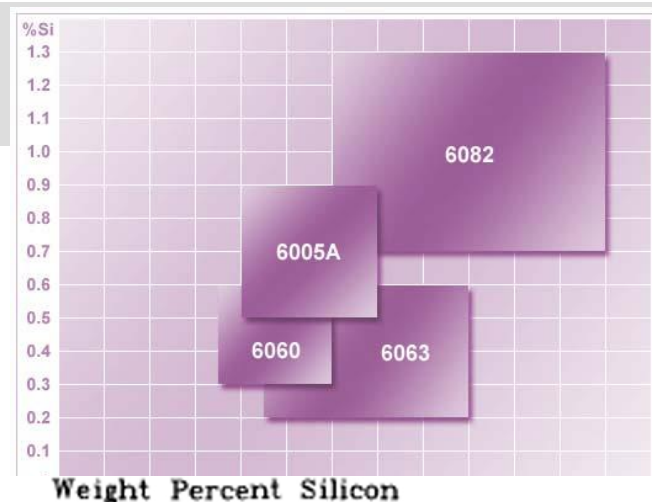
↓

zakalení do vody 0°C
přesycený tuhý roztok



Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitiny řady 6000 (Al-Mg-Si)
- vytvrditelnost
- přirozené stárnutí

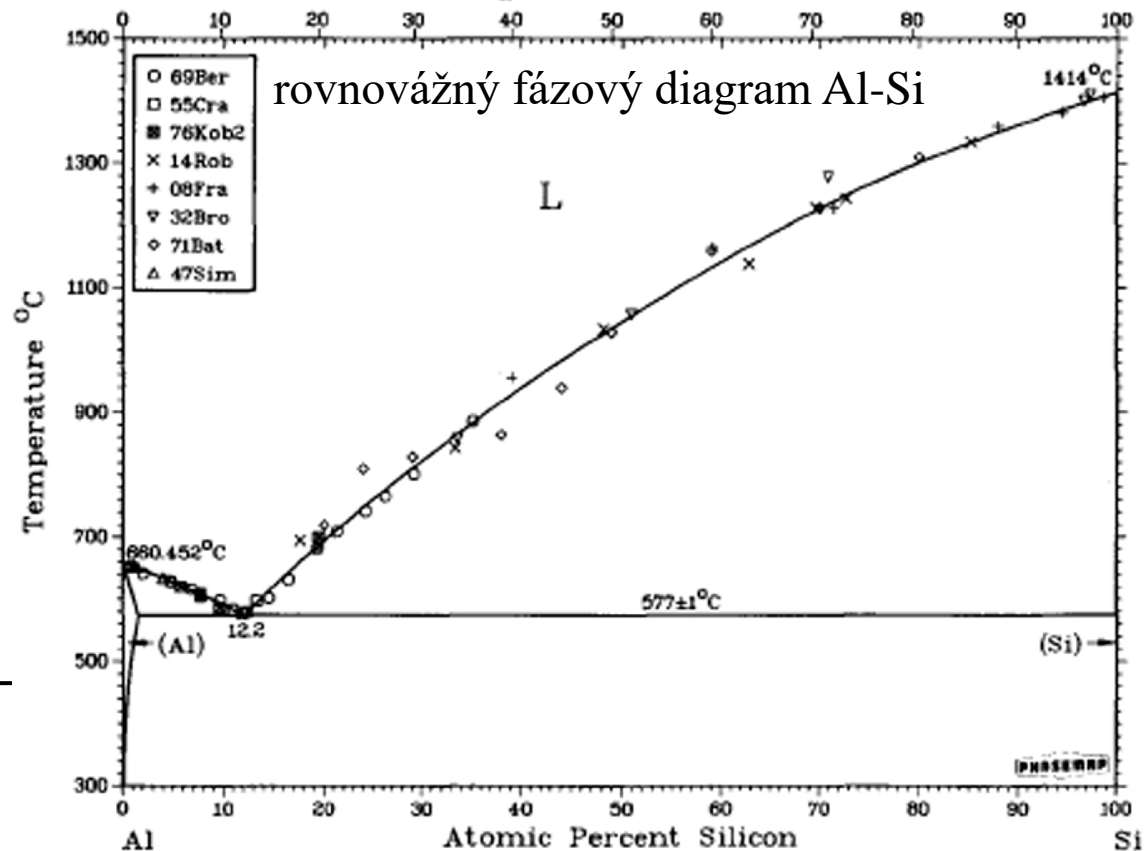


teplota ↑

rozpuštěcí žíhání
530°C / 45 min

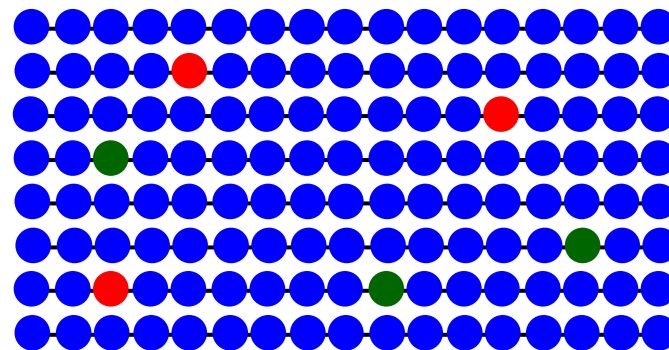
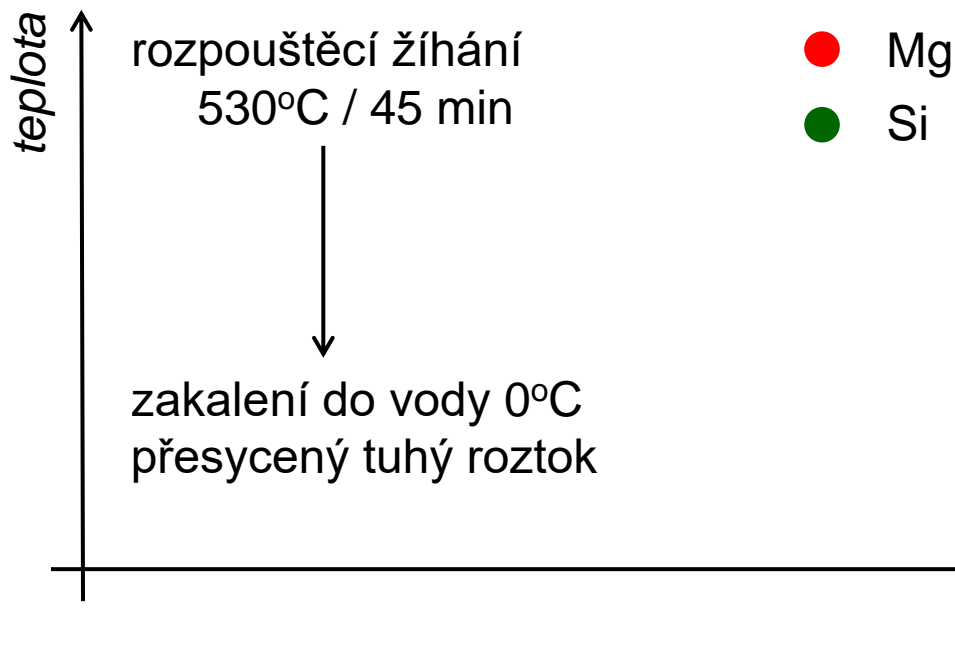
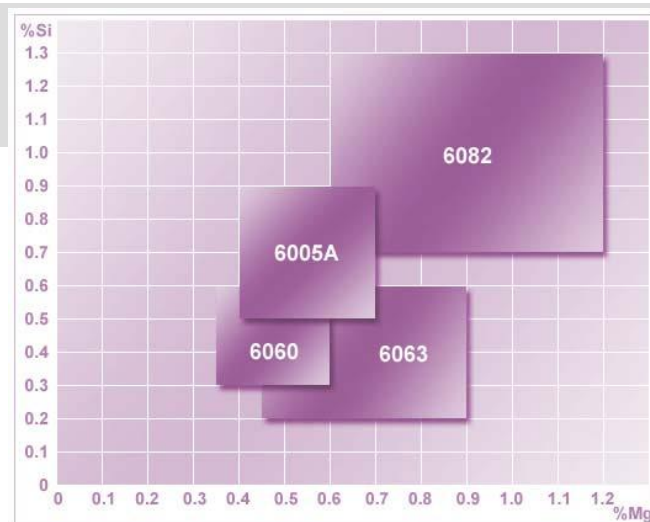
↓

zakalení do vody 0°C
přesycený tuhý roztok



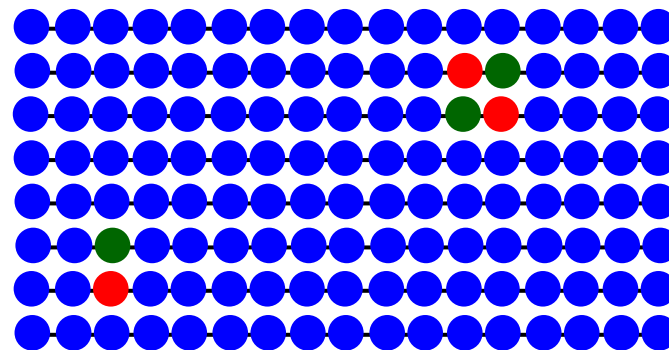
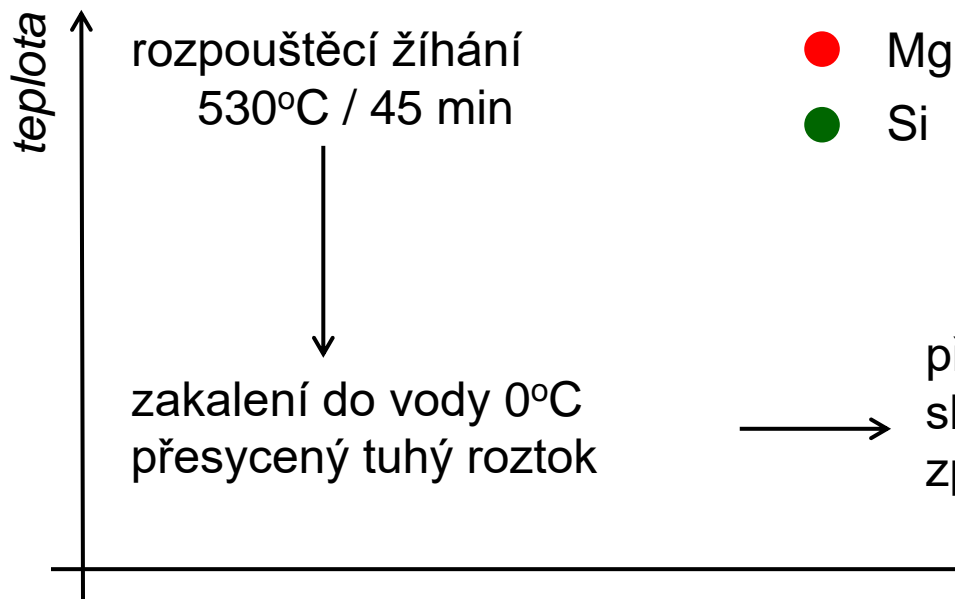
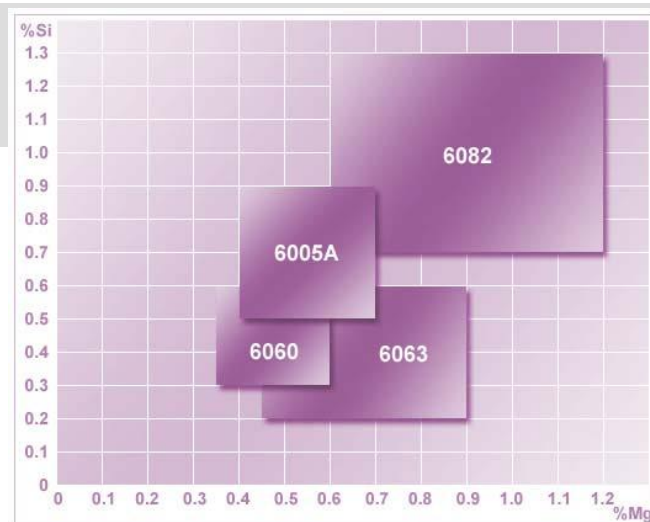
Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitiny řady 6000 (Al-Mg-Si)
- vytvrditelnost
- přirozené stárnutí



Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitiny řady 6000 (Al-Mg-Si)
- vytvrditelnost
- přirozené stárnutí

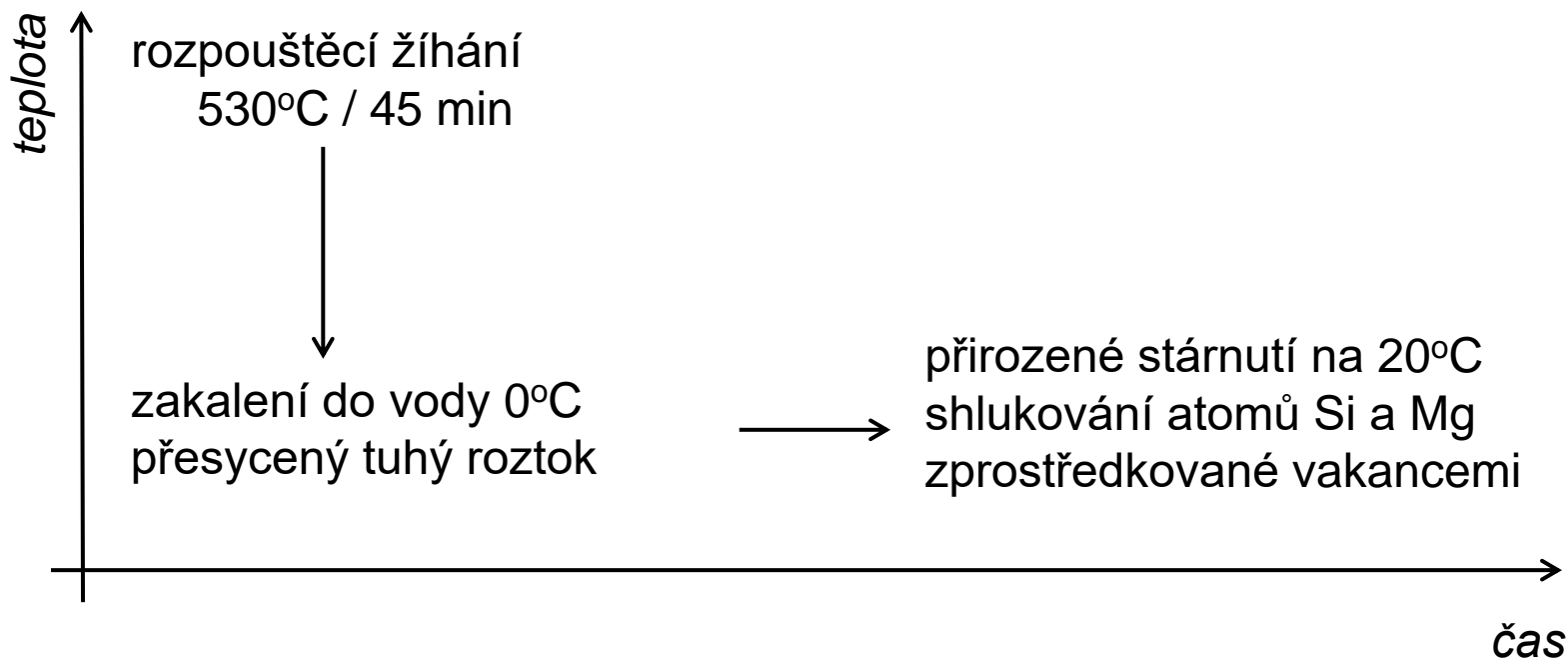


přirozené stárnutí na 20°C
shlukování atomů Si a Mg
zprostředkované vakancemi

čas

Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si
- vytvrditelnost
- přirozené stárnutí
- jedno měření trvá 30 s
- první měření 300 s po zakalení
- potom 10 vpichů pro každý čas stárnutí



Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si
- vytvrditelnost
- přirozené stárnutí

HV (MPa)

720.2 počátek měření: $t = 1000$ s

726.7

728.1

715.6

737.4

720

715.5

726

726.6

726.9 konec měření: $t = 1300$ s

střední hodnota času: $t = 1150$ s

čas stárnutí: $t = 1150$ s

HV = (724 ± 2) MPa

aritmetický průměr: $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N = 724.3$ MPa

chyba jednoho měření: $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} = 6.6$ MPa

chyba aritmetického průměru: $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = 2.1$ MPa

Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si
- vytvrditelnost
- přirozené stárnutí

čas stárnutí: $t = 1150$ s

HV = (724 ± 2) MPa

↑
statistická chyba
(neurčitost typu A)

HV (MPa)

720.2 počátek měření: $t = 1000$ s

726.7

728.1

715.6

737.4

720

715.5

726

726.6

726.9 konec měření: $t = 1300$ s

střední hodnota času: $t = 1150$ s

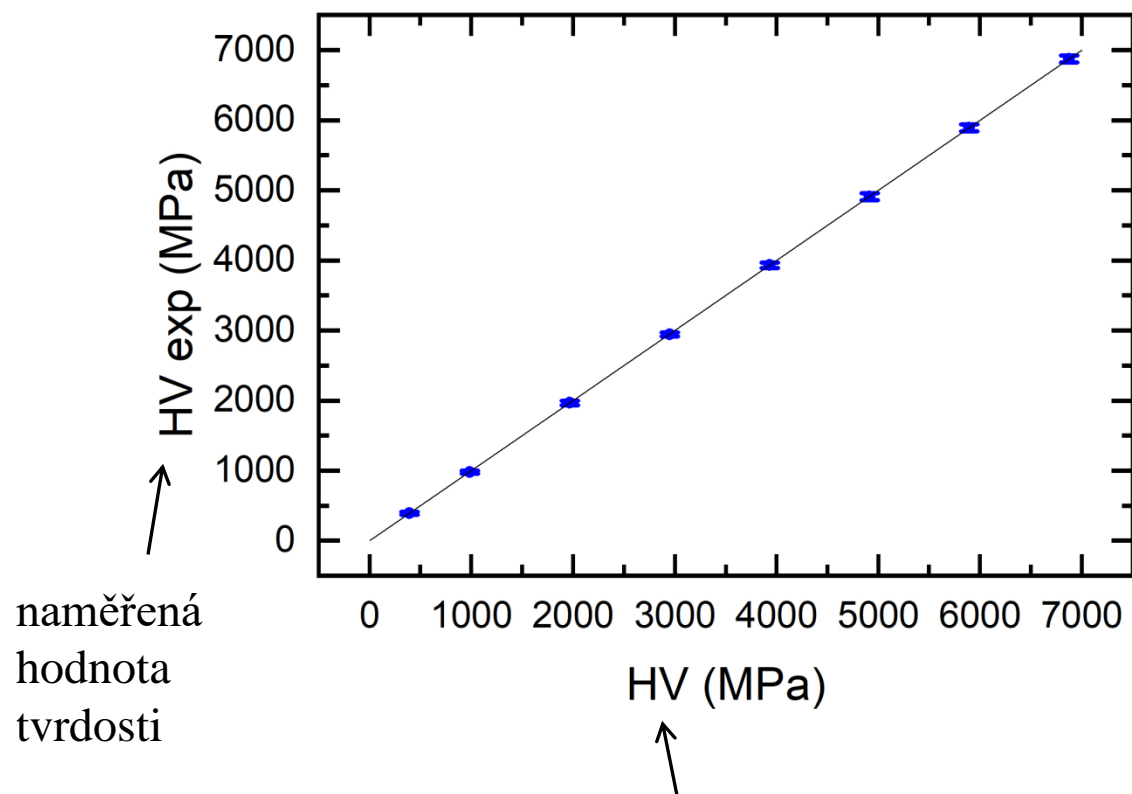
aritmetický průměr: $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N = 724.3$ MPa

chyba jednoho měření: $\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{x_i - \bar{x}}{N - 1}} = 6.6$ MPa

chyba aritmetického průměru: $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = 2.1$ MPa

Příklad: Měření tvrdosti

- systematická chyba
- kalibrační křivka tvrdoměru



naměřená
hodnota
tvrdosti

nominální hodnota tvrdosti referenčního vzorku

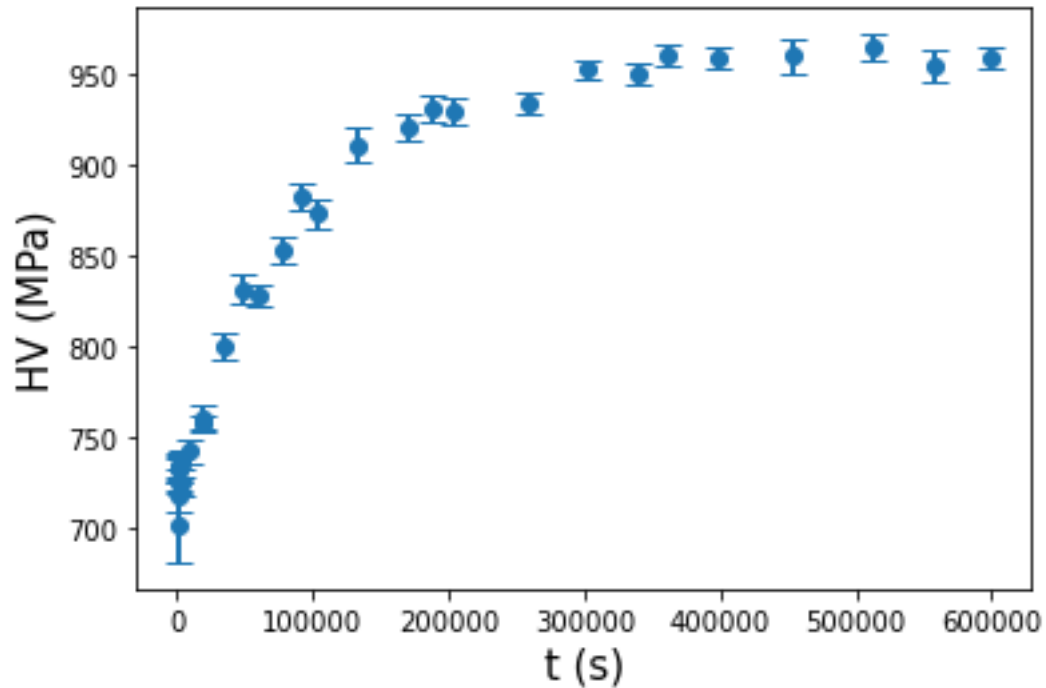
- systematická chyba (neurčitost typu B) je 0.02 %
- např. pro $HV = 724 \text{ MPa}$ je $\sigma_B = 0.1 \text{ MPa}$
- v našem případě je tedy $\sigma_B \ll \sigma_A$

čas stárnutí: $t = 1150 \text{ s}$

$HV = (724 \pm 2) \text{ MPa}$

Příklad: Měření tvrdosti

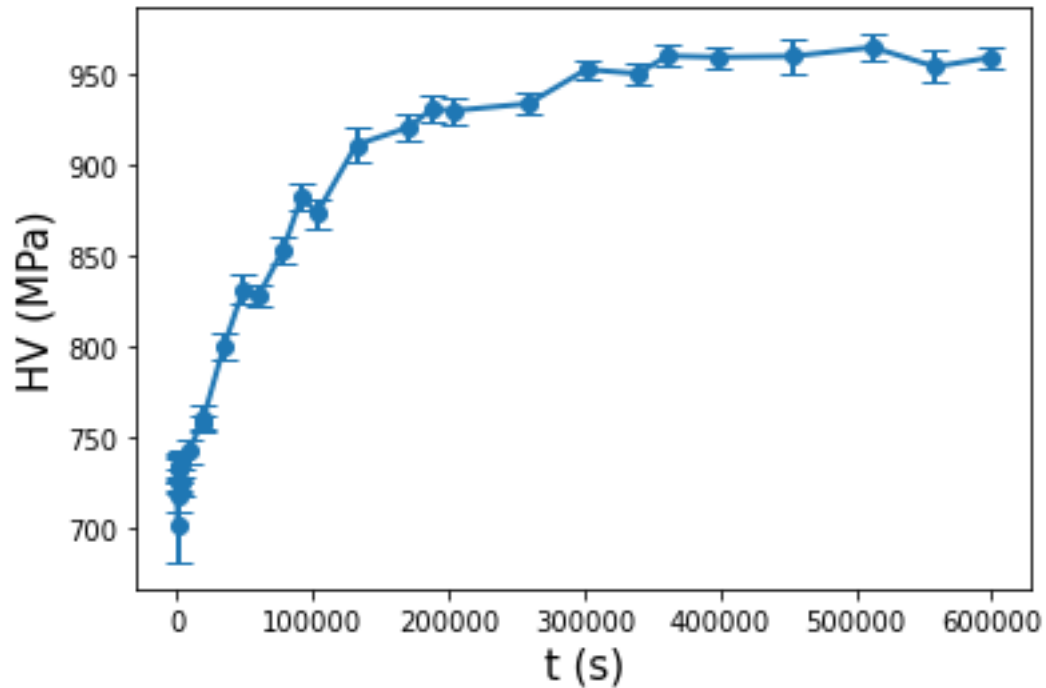
- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si
- přirozené stárnutí



- co je správně?
 - jednotlivé naměřené body

Příklad: Měření tvrdosti

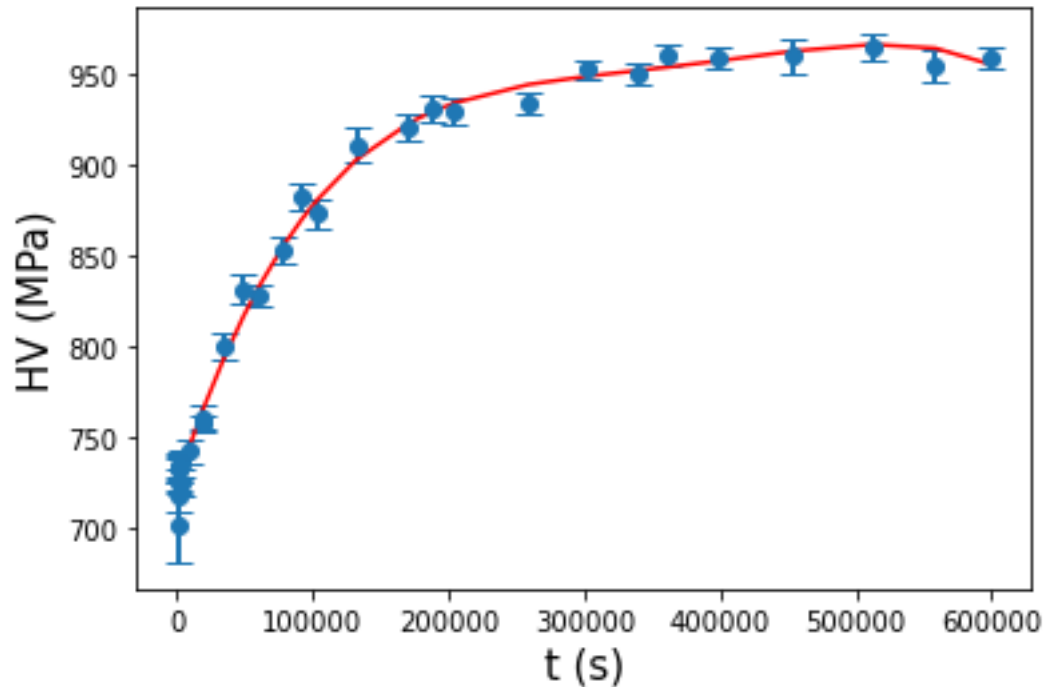
- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si
- přirozené stárnutí



- co je správně?
 - naměřené body spojené čarou

Příklad: Měření tvrdosti

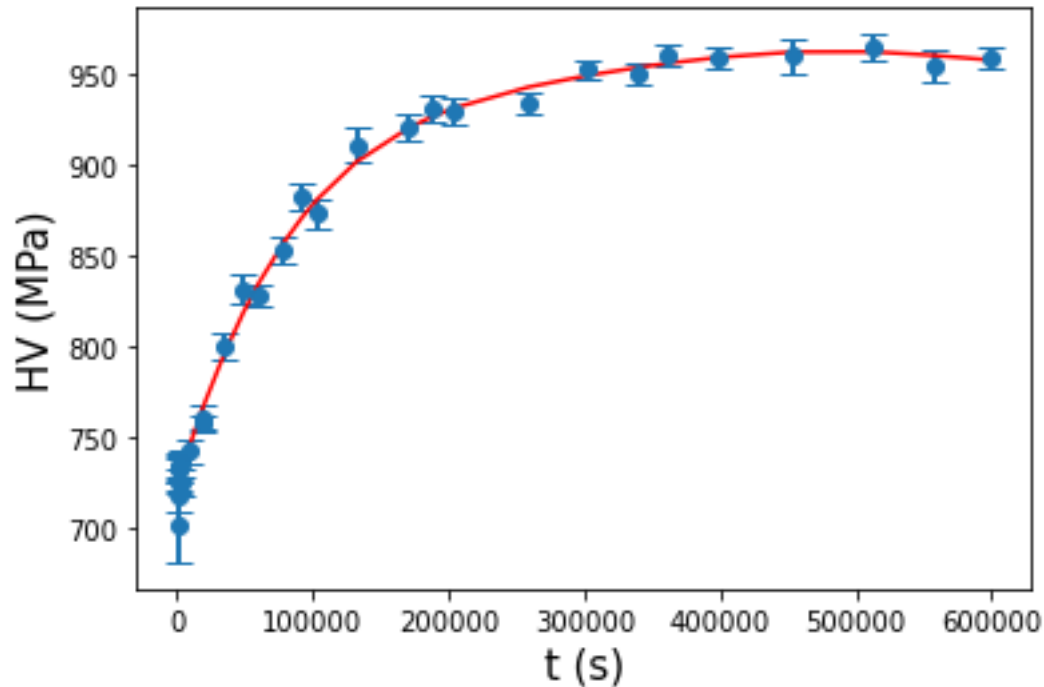
- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si
- přirozené stárnutí



- co je správně?
 - naměřené body proložené polynomem 4 stupně

Příklad: Měření tvrdosti

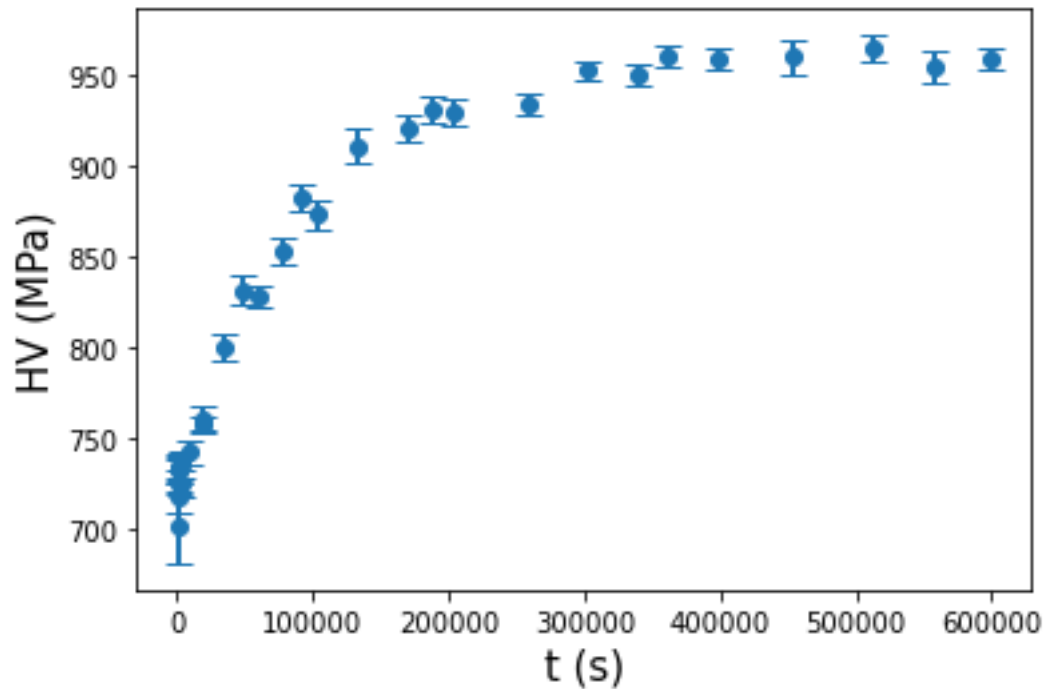
- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si
- přirozené stárnutí



- co je správně?
 - naměřené body proložené polynomem 5 stupně

Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si
- přirozené stárnutí - fyzikální model: shluky atomů Si a Mg vznikají nukleací a růstem



Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si
- přirozené stárnutí - fyzikální model: shluky atomů Si a Mg vznikají nukleací a růstem
- kinetika růstu klastrů – Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) rovnice

Avramiho exponent
určuje jak probíhá růst

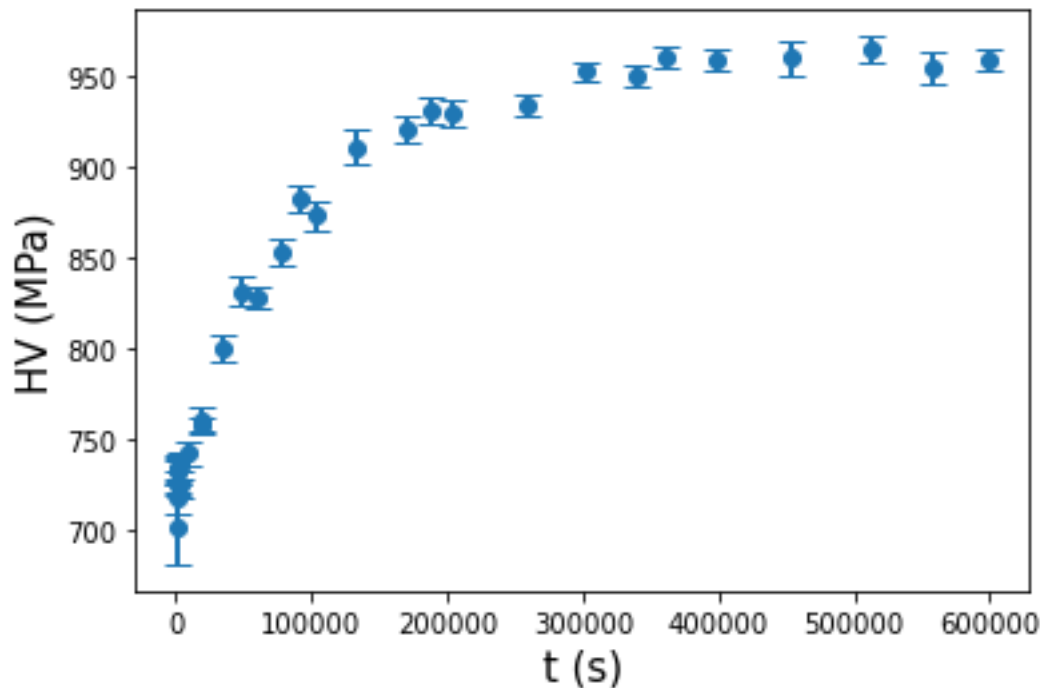
$$f = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \right]$$

transformovaná frakce
(zde frakce atomů Mg, Si
zabudovaná do klastrů)

charakteristický čas
transformace

Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si
- přirozené stárnutí - fyzikální model: shluky atomů Si a Mg vznikají nukleací a růstem
- kinetika růstu klastrů – Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) rovnice
- JMAK rovnice upravená pro křivku tvrdosti $HV(t) = HV_0 + dHV \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \right] \right)$

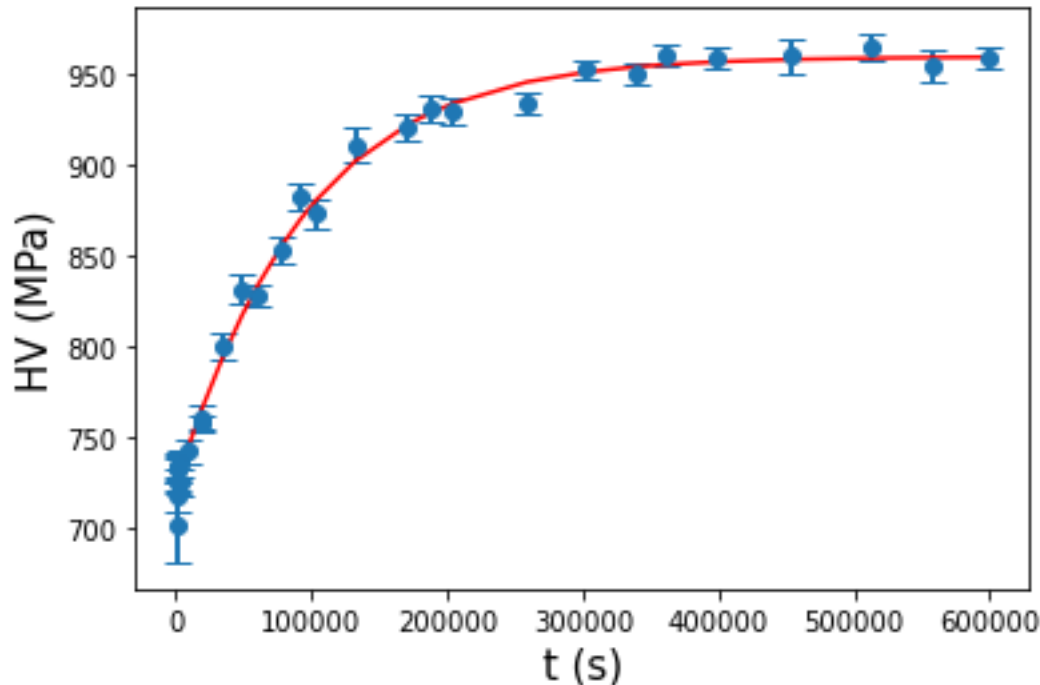


tvrdost před transformací

vytvrzení (nárůst tvrdosti) způsobený přirozeným stárnutím

Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si
- přirozené stárnutí - fyzikální model: shluky atomů Si a Mg vznikají nukleací a růstem
- kinetika růstu klastrů – Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) rovnice
- JMAK rovnice upravená pro křivku tvrdosti $HV(t) = HV_0 + dHV \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \right] \right)$

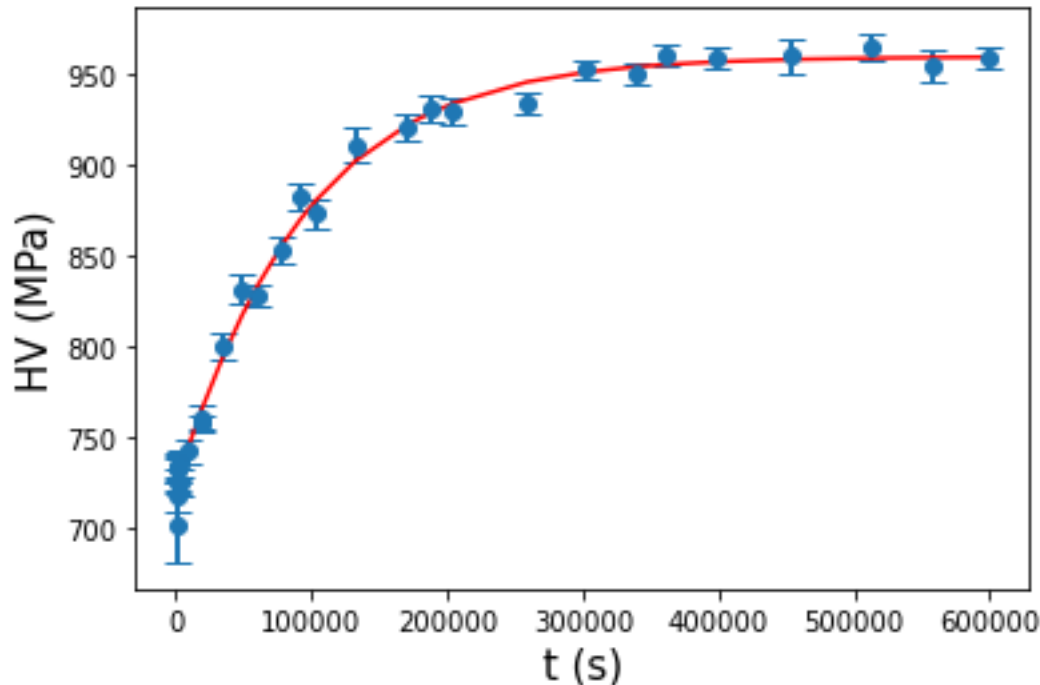


tvrdost před
transformací

vytvrzení (nárůst tvrdosti)
způsobený přirozeným
stárnutím

Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si
- přirozené stárnutí - fyzikální model: shluky atomů Si a Mg vznikají nukleací a růstem
- kinetika růstu klastrů – Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) rovnice
- JMAK rovnice upravená pro křivku tvrdosti $HV(t) = HV_0 + dHV \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \right] \right)$



$$HV_0 = (724 \pm 3) \text{ MPa}$$

$$dHV = (235 \pm 5) \text{ MPa}$$

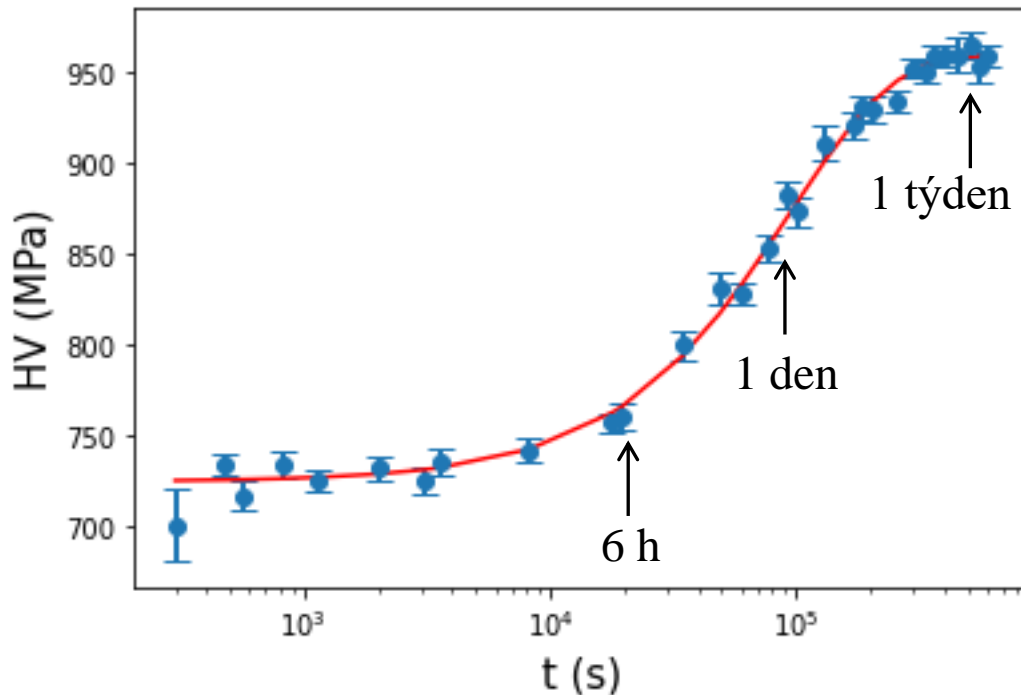
$$t_0 = (9.5 \pm 0.4) \times 10^4 \text{ s}$$

$$m = (1.04 \pm 0.06)$$

↑
2D růst řízený difúzí

Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si
- přirozené stárnutí - fyzikální model: shluky atomů Si a Mg vznikají nukleací a růstem
- kinetika růstu klastrů – Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) rovnice
- JMAK rovnice upravená pro křivku tvrdosti $HV(t) = HV_0 + dHV \left(1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \right] \right)$



$$HV_0 = (724 \pm 3) \text{ MPa}$$

$$dHV = (235 \pm 5) \text{ MPa}$$

$$t_0 = (9.5 \pm 0.4) \times 10^4 \text{ s}$$

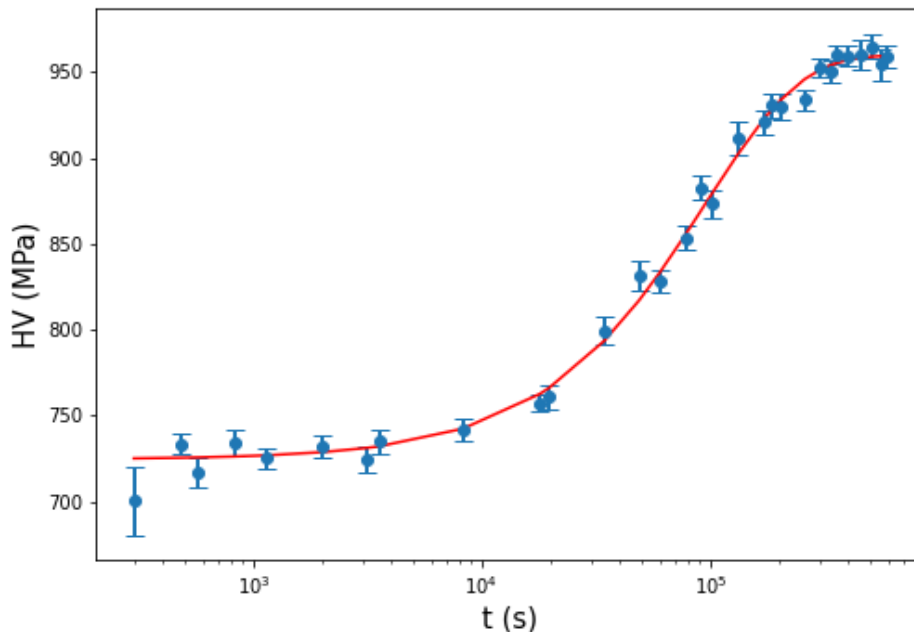
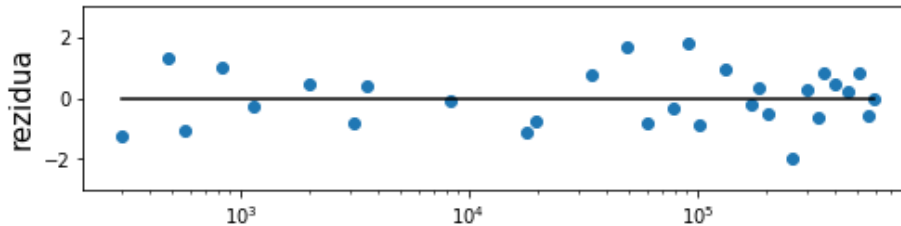
$$m = (1.04 \pm 0.06)$$

2D růst řízený difúzí

Příklad: Měření tvrdosti

- Al slitina Al-1.0Mg-1.0Si

- test kvality fitu JMAK rovnicí: rezidua $r_i = \frac{y_i - f(x_i|\theta)}{\sigma_i}$



- χ^2 test kvality fitu

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(y_i - f(x_i|\theta))^2}{\sigma_i^2} = 24.3$$

- počet stupňů volnosti: $\nu = 30 - 4 = 26$

počet naměřených
hodnot

počet parametrů
modelové funkce

- P-hodnota:

$$P = 1 - F_{\chi^2}(24.3|\nu = 26) = 0.557$$

Obecný postup

- naměření experimentálních dat
- vyhodnocení statistických chyb (neurčitostí typu A)
- vyhodnocení a případně korekce systematických chyb (neurčitostí typu B)
- stanovení celkové neurčitosti
- nalezení fyzikálního modelu (modelové funkce) ←
- odhad parametrů (fit experimentálních dat zvolenou modelovou funkcí)
- test kvality fitu

modelová funkce není v souladu s experimentem