

5 Krivka chladnutia pevných látok

Teória:

Pri ohreve telesa nad teplotu okoliteho vzduchu, dochádza k ochladzovaniu materiálu na základe Newtonovho ochladzovacieho zákona (5.1) (https://en.wikipedia.org/wiki/Newton%27s_law_of_cooling)

$$\frac{dQ}{dt} = -h \cdot S \cdot (T - T_{okolia}) \quad (5.1)$$

kde: Q – teplo, ktoré prijalo teleso v J

h – celkový koeficient prestupu tepla medzi vzorkou a okolím v $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

S – celková plocha cez ktorú sa šíri teplo v m^2

T – aktuálna teplota vzorky v $^{\circ}C$

T_{okolia} – teplota okolia v $^{\circ}C$

V prípade, že vo vzorke neexistujú vnútorné zdroje tepla, teplotné gradienty a v rozsahu teplôt medzi teplotou T a teplotou okolia nedochádza k štruktúrnym alebo fázovým zmenám (t.j. k zmene hustoty, kapacity, hmotnosti a ďalších parametrov) možno teplo prijaté vyjadriť v tvare (5.2)

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (5.2)$$

Kde: m – hmotnosť telesa v kg

c – merná tepelná kapacita v $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

ΔT – teplotný rozdiel medzi teplotou vzorky a teplotou okolia v $^{\circ}C$

V takomto prípade možno diferenciálnu rovnicu (5.1) vyjadriť v tvare (5.3)

$$\rho \cdot c \cdot V \frac{dT}{dt} = -h \cdot S \cdot (T - T_{okolia}) \quad (5.3)$$

Kde: ρ – hustota vzorky v $kg \cdot m^{-3}$

V – objem vzorky v m^3

Ak možno zmenu teploty okolia zanedbať prechádza diferenciálna rovnica (5.3) do tvaru separovanej diferenciálnej rovnice (5.4)

$$\frac{dT}{T - T_{okolia}} = -\frac{h \cdot S}{\rho \cdot c \cdot V} \cdot t \quad (5.4)$$

Čoho riešením je priebeh teploty v tvare (5.5) (Košťal Pavel, Ružiak Ivan, Jonšta Zdeněk, Kopal Ivan, Hrehuš Rudolf, Kršková Jana, Experimental method for complex thermo-mechanical material analysis, In. International Journal of Thermophysics, Volume 31, 2010, s. 630-636.)

$$T = T_{okolia} + dT_{max} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (5.5)$$

kde: dT_{max} – maximálny teplotný rozdiel v $^{\circ}C$ (rovný rozdielu teploty telesa v čase 0 sekúnd a teplotou okolia)

τ - relaxačný čas v s

V rovnici (5.5) pri konštantných podmienkach experimentu parametre dT_{max} a T_{okolia} predstavujú konštanty. Tvar krivky je teda popísaný iba členom $\exp(-t/\tau)$ čo pre konštantnú hodnotu relaxačného času predstavuje exponenciálny pokles teploty s konštantnou rýchlosťou. Čím je hodnota relaxačného času väčšia tým dlhšie trvá kým vzorka sa ochladí na teplotu okolia.

Relaxačný čas je definovaný podľa rovnice (5.6)

$$\tau = \frac{\rho \cdot c \cdot V}{h \cdot S} = \frac{\rho \cdot c \cdot L_c}{h} \quad (5.6)$$

Kde: L_c – charakteristický rozmer vzorky v m

Charakteristický rozmer L_c je definovaný podielom celkového objemu V a celkovej plochy cez ktorú sa vedie teplo čo v našom prípade vedie na vyjadrenie pomocou vzťahu (5.7)

$$L_c = \frac{V}{S} \quad (5.7)$$

V prípade, že všetky strany vzorky sú približne rovnaké(čo platí pre náš prípad), tak potom rovnica (5.7) prechádza do tvaru:

$$L_c = \frac{a \cdot b \cdot c}{2 \cdot (a \cdot b + a \cdot c + b \cdot c)} \quad (5.8)$$

Platnosť modelu sa posudzuje podľa tzv. Biotovho čísla Bi definovaného rovnicou (5.9) (https://en.wikipedia.org/wiki/Newton%27s_law_of_cooling)

$$Bi = \frac{h \cdot L_c}{k} \ll 1 \quad (5.9)$$

V prípade, že Biotovo číslo je oveľa menšie ako 1(postačuje hodnota nižšia ako 0,1) možno zanedbať prestup tepla kondukciou. Z definície Biotovho čísla vyplýva, že model (5.5) platí pre vysoko vodivé materiály a pre nízkovodivé materiály iba v prípade veľmi nízkej hodnoty hrúbky materiálu.

Spracovanie nameraných závislostí teploty od času:

1. Nájdite maximálnu teplotu vzorky a tejto hodnote priradte do vedľajšieho riadku čas 0s. Maximálnu hodnotu teploty uložte do poľa C3 a odpovedajúci čas do poľa B3.
2. Pre prvú hodnotu teploty pod teplotou maximálnou(C4) priradte čas 1s(pole B4) a takto pokračujte až po koniec(stačí podržať hodnoty 0 a 1 a pomocou kurzora posúvať hodnoty času až kým neprídete k poslednej hodnote teploty)
3. Vytvorte funkciu teplotného rozdielu definovanú ako rozdiel medzi teplotou T a teplotou okolia ktorú určíte experimentálne. Aby ste pre každý čas určili hodnotu teplotného rozdielu musíte najprv vypočítať teplotný rozdiel pre čas 0 a to spôsobom, že do 3. riadku stĺpca D zadefinujete vzorec
=C3-hodnota teploty okolia
4. Podržaním hodnoty v poli D3 a posunutím kurzora smerom nadol Excel vypočíta teplotný rozdiel pre každý čas
5. Následne vytvorte bezrozmernú teplotu F1. Ako prvé musíte určiť hodnotu F1 pre čas 0s(do pola E3) vzťahom
=D3/D\$3
6. Posunutím kurzora smerom nadol takto určíte hodnotu F1 pre každý riadok
7. Ako posledné vytvorte prirodzený logaritmus z funkcie F1 a to pre čas 0s príkazom
=ln(E3)
8. Pre aplikáciu pre všetky hodnoty času musíte označiť hodnotu v poli F3 a posúvať kurzor smerom nadol až po poslednú hodnotu času
9. Následne do pola F2 určíte hodnotu smernice závislosti medzi ln(F1) a časom pomocou príkazu
=slope(F3:F500;B3:B500),
kde B500 predstavuje poslednú hodnotu času(vo vašom prípade nemusí sedieť), treba ten príkaz prepísať tak aby tam boli úplne všetky hodnoty a ani 1 navyše

10. Následne do pola G2 určite hodnotu relaxačného času pomocou vzťahu

$$\tau = 1/F2$$
11. Do polí A2, B2, C2, D2 vložte priemerné hodnoty hmotnosti m , šírky a , dĺžky b , hrúbky c a do pola E2 vypočítanú hodnotu L_c podľa vzťahu (8)
12. Do pola H2 následne určite hodnotu hustoty podľa vzťahu

$$\rho = A2 \cdot 10^6 / B2 / C2 / D2$$
13. Do pola I2 vložte hodnotu kapacity pre vašu vzorku, t.j. 400 pre CuZn alebo 450 pre Fe
14. Následne určite hodnotu koeficientu prestupu tepla h (pole J2) pomocou vzťahu

$$h = H2 \cdot I2 \cdot E2 / G2$$
15. Rovnaký postup opakujte aj pre druhú vzorku ale výsledky pre nu uložte do druhého hárku

Postup merania:

1. Zmerajte rozmery vzoriek a, b, c CuZn, Fe.
2. Určite hodnotu charakteristického rozmeru L_c pre obe vzorky.
3. Postupne na vzorky z CuZn, Fe umiestnite termočlánok do vnútra vzorky.
4. Z merania teploty na vzduchu určite teplotu okolia.
5. Zohrejte vzorky mosadze a železa pomocou grilu na teplotu aspoň 80°C , ktorú zmeriate pomocou termočlánku umiestneného vo vzorke.
6. Umiestnite meranú vzorku na držiak a nechajte ju chladiť na vzduchu. Držiak má byť čo najďalej od zdroja tepla a rovnako vzorka by sa nemala kývať.
7. Spustíte ukladanie dát pomocou merača EXTECH až kým teplota na vzorke neklesne na hodnotu aspoň o 20°C nižšiu ako je začiatková teplota. Ukladanie hodnôt spustíte podržaním tlačidla ENTER (LOG) aspoň na 2 sekundy a následným pustením tlačidla. Ukladanie dát zastavíte po poslednej hodnote stlačením tlačidla ENTER znova na dobu aspoň 2 sekundy.
8. Postup 5, 6, 7 opakujte pre obidve vzorky.
9. Importujte výsledky meraní do PC odobratím pamätovej karty z merača EXTECH a následným vložením do PC do SD/MMC portu.
10. Po nájdení pamätovej karty klinite postupne na Otvoriť priečinok a zobrazíť súbory, následne otvorte zložku TMD01 a nakoniec otvorte Excelovský súbor TMD01001.
11. V otvorenom súbori nájdite posledné 2 dátové sady pomocou dátumu a času (sú to posledné dve od doľa). Prvá sada odpovedá meraniu prvej vzorky a druhá sada zas odpovedá meraniu druhej vzorky.
12. Dátové hodnoty prekopírujte do nového excelovského súboru a vytvorte 1 list pre vzorku železa a 1 list pre vzorku mosadze. Hodnoty teploty v procese chladnutia skopírujte do listu pre daný materiál do buniek C od 3.riadka a odpovedajúci čas od 0 sekúnd v sekundových intervaloch do buniek B od 3.riadka (t.j. v poli B3 je 0, B4 je 1 a tak ďalej).
13. Porovnajete hodnoty relaxačného času τ a celkového koeficientu prestupu tepla h pre obe merané materiály pomocou percentuálnej odchýlky PO v tvare pre relaxačný čas $PO = |\tau_E - \tau_T| \cdot 100\% / \tau_T$ a v tvare pre celkový koeficient prestupu tepla $PO = |h_E - h_T| \cdot 100\% /$

h_T kde za tabuľkové hodnoty berte hodnoty pre Fe a za experimentálne hodnoty berte hodnoty pre CuZn.

14. Porovnajte v 1 spoločnom grafe závislosť teploty od času pre obe merané materiály.
15. Na konci cvičenia musí každý študent za seba odovzdať protokol s hodnotami relaxačného času, koeficientu prestupu tepla h a vypočítanými a zdôvodnenými percentuálnymi odchýlkami. Zároveň študenti z cvičenia musia na hodine odovzdať Excelovský zošit s všetkými výpočtami a aj so spoločným grafom.