

1 Zatížení konstrukcí teplotou

- Časově proměnné nepřímé zatížení
- Klimatické vlivy, zatížení stavebních konstrukcí požárem
- *Účinky zatížení* plynou z rozšířeného Hookeova zákona

$$\sigma(\underline{x}, t) = E(\underline{x}) (\varepsilon(\underline{x}, t) - \alpha(\underline{x}) \Delta T(\underline{x}, t)),$$

kde

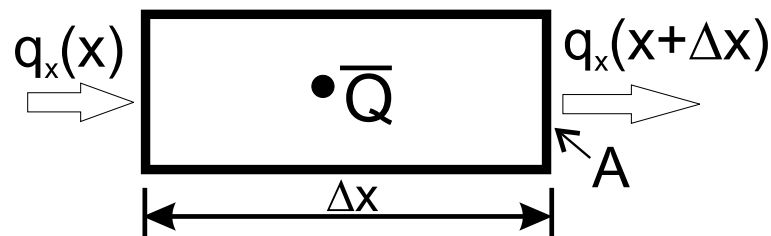
- σ označuje napětí, ε deformaci a E modul pružnosti v daném bodě $\underline{x}$ a čase t ,
- α je součinitel délkové teplotní roztažnosti $[\text{K}^{-1}] \equiv [^{\circ}\text{C}^{-1}]$,
- $\Delta T [\text{K}] \equiv [^{\circ}\text{C}]$ je *změna teploty vůči referenčnímu stavu*

$$\Delta T(\underline{x}, t) = T(\underline{x}, t) - T_{\text{ref}}(\underline{x}, t).$$

- Účinek na staticky určité a neurčité konstrukce
- Obdobný účinek má např. i vlhkost

2 Jednorozměrné stacionární vedení tepla

2.1 Bilanční rovnice – vedení (kondukce) tepla



- Uvažujeme těleso o délce Δx a průřezové ploše A
- *Hustota tepelného toku* q_x [$\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$]

$$q_x = \frac{\Delta Q}{A\Delta t} = \frac{\Delta Q}{A \cdot 1 \text{ s}}$$

- Bilance energie v uvažovaném objemu:

$$\overbrace{q_x(x)A}^{\text{vtok}} + \overbrace{\bar{Q}(x)\Delta x A}^{\text{zdroj}} = \overbrace{q_x(x + \Delta x)A}^{\text{výtok}},$$

kde $\overline{Q}$ vyjadřuje intenzitu vnitřního zdroje [$\text{Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$].

- Vydělením předchozího výrazu objemem $\Delta x A$

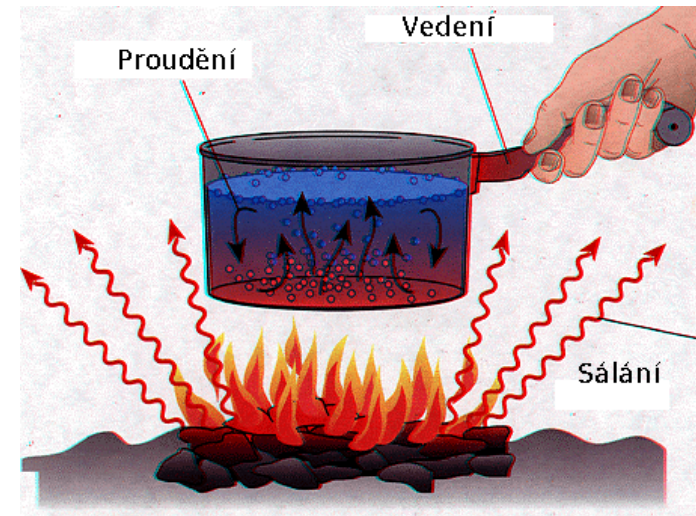
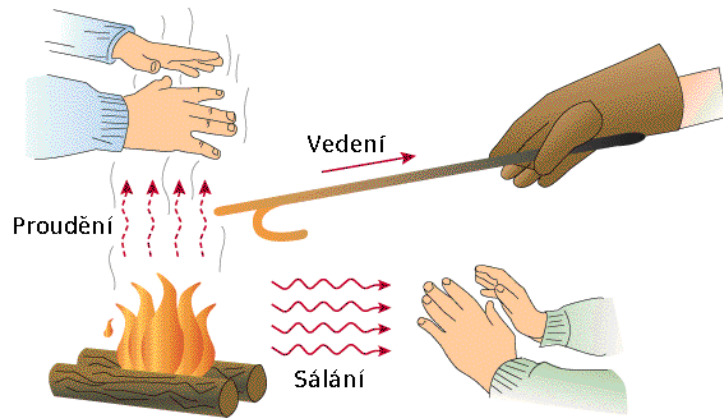
$$-\frac{q_x(x + \Delta x) - q_x(x)}{\Delta x} + \overline{Q}(x) = 0,$$

a po limitním přechodu dostáváme

$$-\frac{dq_x}{dx}(x) + \overline{Q}(x) = 0.$$

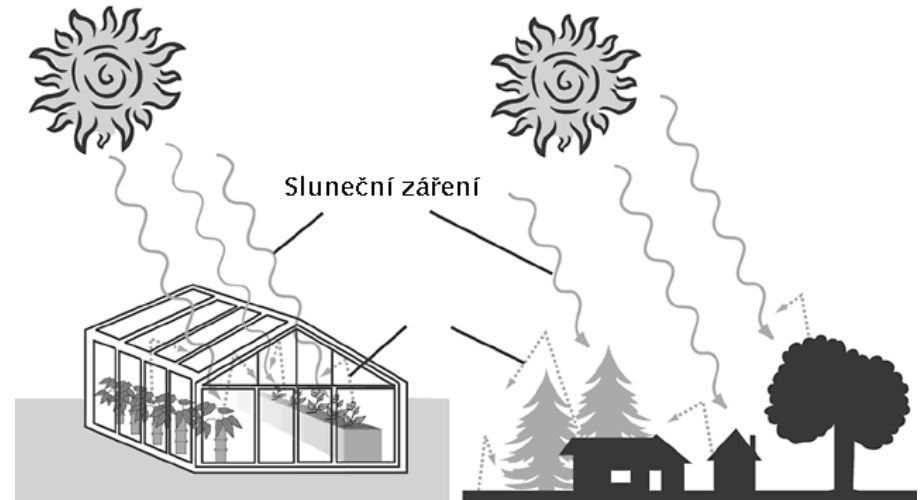
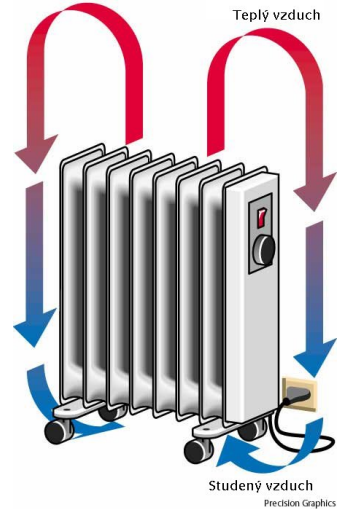
2.2 Bilanční rovnice *na okraji tělesa*

- Popisují interakci tělesa s okolím
- Předepsaná hodnota tepelného toku q_x
 - v důsledku *proudění* (konvekce),
 - v důsledku *sálání* (radiace),



www.physics.brocku.ca/courses/1p23/images/FG11_16.gif

apollo.lsc.vsc.edu/classes/met130/notes/chapter2/graphics/pan.psd.gif



www.yourdictionary.com/images/ahd/jpg/A4cnvctn.jpg

www.press.uillinois.edu/epub/books/brown/images/fig9.1b.gif

Přenos tepla prouděním

- Při obtékání tělesa tekutinou vzniká v okolí hranice tělesa tzv. *mezní* vrstva, v které dochází k *laminárnímu* proudění $\Rightarrow$ v mezní vrstvě se teplo šíří vedením.
- Množství tepla je pak vyjádřeno *Newtonovým vztahem*

$$q(x) \cdot n(x) = \alpha(x) (T(x) - T_o(x)),$$

kde α [$\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1}$] je *součinitel přestupu tepla*, T_o je teplota v mezní vrstvě a $n(x)$ označuje vnější normálu.

- Součinitel přestupu tepla α se v normálních podmínkách pohybuje v rozmezí cca $10\text{--}15 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1}$. Jeho velikost však silně závisí na teplotě; např. pro teploty $\approx 60^\circ\text{C}$ se zvyšuje na $\alpha \approx 50 \text{ Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1}$. *Nezaměňovat se součinitelem délkové teplotní roztažnosti.*

Přenos tepla sáláním

- Tepelný tok je dán výrazem

$$q(x) \cdot n(x) = \varepsilon(x)\sigma(x) (T^4(x) - T_\infty^4),$$

kde ε [-] označuje pohltivost daného povrchu vůči dokonale černému tělesu, $0 < \varepsilon < 1$, σ je Stefan-Boltzmannova konstanta; $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ a T_∞ je teplota zářiče.

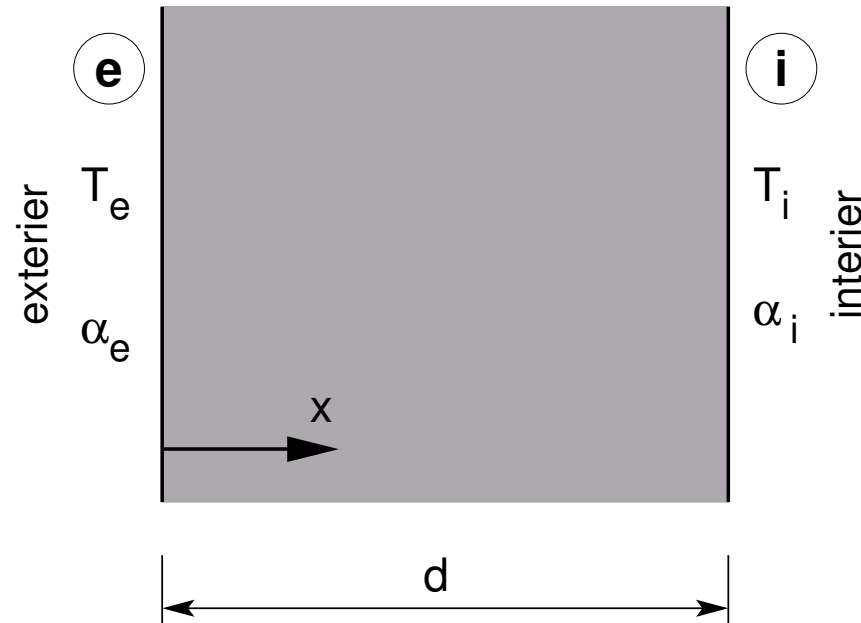
2.3 Konstitutivní rovnice

- Fourierův zákon vedení tepla

$$q_x(x) = -\lambda(x) \frac{dT(x)}{dx},$$

kde $\lambda [\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}]$ označuje součinitel tepelné vodivosti.

3 Rozdělení teplot na jedno- a vícevrstvých konstrukcích



- Bilanční rovnice

$$\frac{dq_x(x)}{dx} = 0$$

- Fourierova rovnice

$$q_x(x) = -\lambda \frac{dT(x)}{dx}$$

- Okrajové podmínky

$$q_x(0) \cdot (-1) = \alpha(0)(T(0) - T_o(0)) = \alpha_e(T(0) - T_e)$$

$$q_x(d) \cdot (1) = \alpha(d)(T(d) - T_o(d)) = \alpha_i(T(d) - T_i)$$

- Tepelný tok $q_x(x) = q_x = \text{konst}$
- Teplotní spád

$$\frac{dT(x)}{dx} = -\frac{q_x}{\lambda} = \text{konst} = \frac{T(d) - T(0)}{d} \Rightarrow \text{průběh teploty je lineární}$$

- Okrajové podmínky $\Rightarrow$

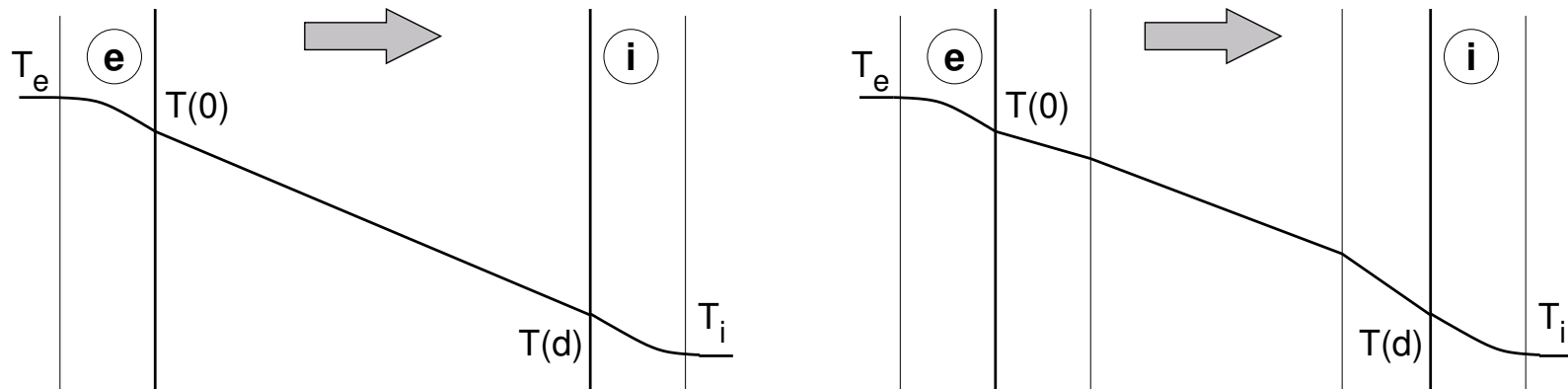
$$T(0) = T_e - \frac{k}{\alpha_i}(T_e - T_i)$$

$$T(d) = T_i + \frac{k}{\alpha_e}(T_e - T_i)$$

- $k [\text{Jm}^{-2}\text{K}^{-1}\text{s}^{-1}]$ označuje *součinitel prostupu tepla* dané konstrukce

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_e} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_i}$$

- Pro vícevrstvé konstrukce je průběh teplot *po částech* lineární.



- Obdobné vztahy jako pro teploty platí i pro *teplotní změny vůči referenční teplotě*

4 Principy zatížení konstrukcí požárem

ČSN P ENV 1991-2-2

- Cílem je prokázání dostatečné bezpečnosti konstrukce při požáru

- Možno prokázat
 - *normovou požární odolností* [s],
 - návrhovou hodnotou únosností při požáru,
 - teplotou povrchu materiálu [K], [$^{\circ}\text{C}$]

4.1 Tepelné zatížení

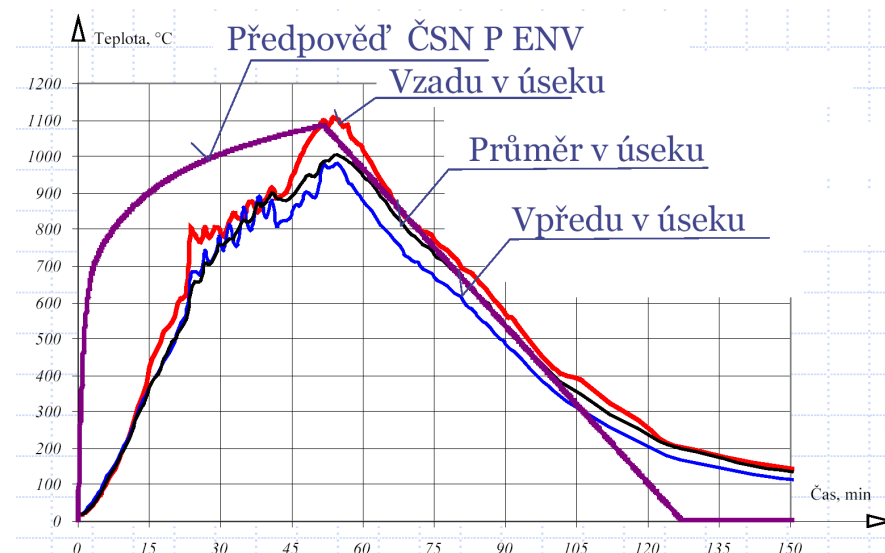
- Zahrnuje v sobě *sálavou* složku a složku odpovídající *proudění*
- Obě založeny na teplotní křivce požáru, která udává teplotu zaříče T_{∞} resp. teplotu mezní vrstvy T_o v závislosti na teplotě.

4.2 Ilustrativní příklad

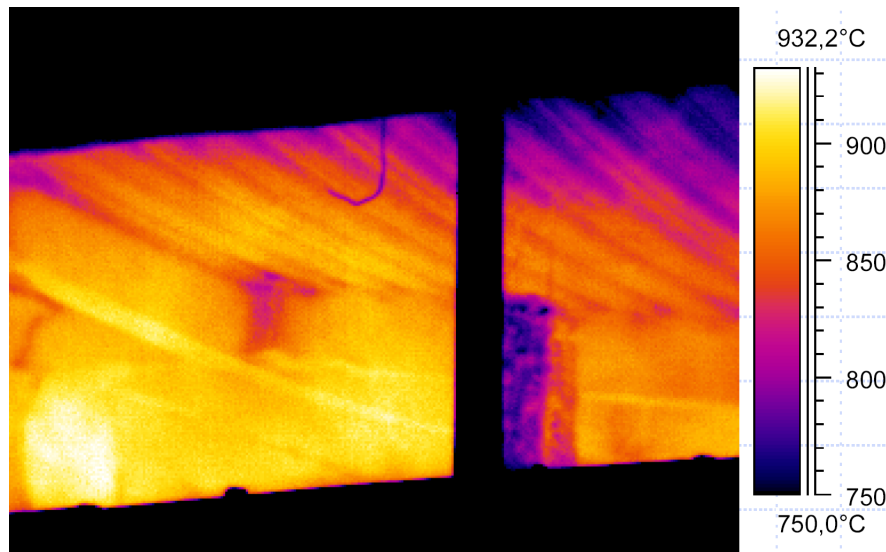
- Požární zkoušky velkého rozsahu v Cardingtonu (2003)
- `people.fsv.cvut.cz/~wald/Cardington_LBTF_Structural_Integrity_Test`



Schéma experimentu



Časová závislost teploty



Teplota prvků a styčnicků při požáru



Kolaps prvků při požáru



Prosba. V případě, že v textu objevíte nějakou chybu nebo budete mít námět na jeho vylepšení, ozvěte se prosím na zemanj@cml.fsv.cvut.cz.

Opravy verze -001: Přidány popisky do obrázků (na chyby upozornil P. Fajman)

Verze 000
