

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

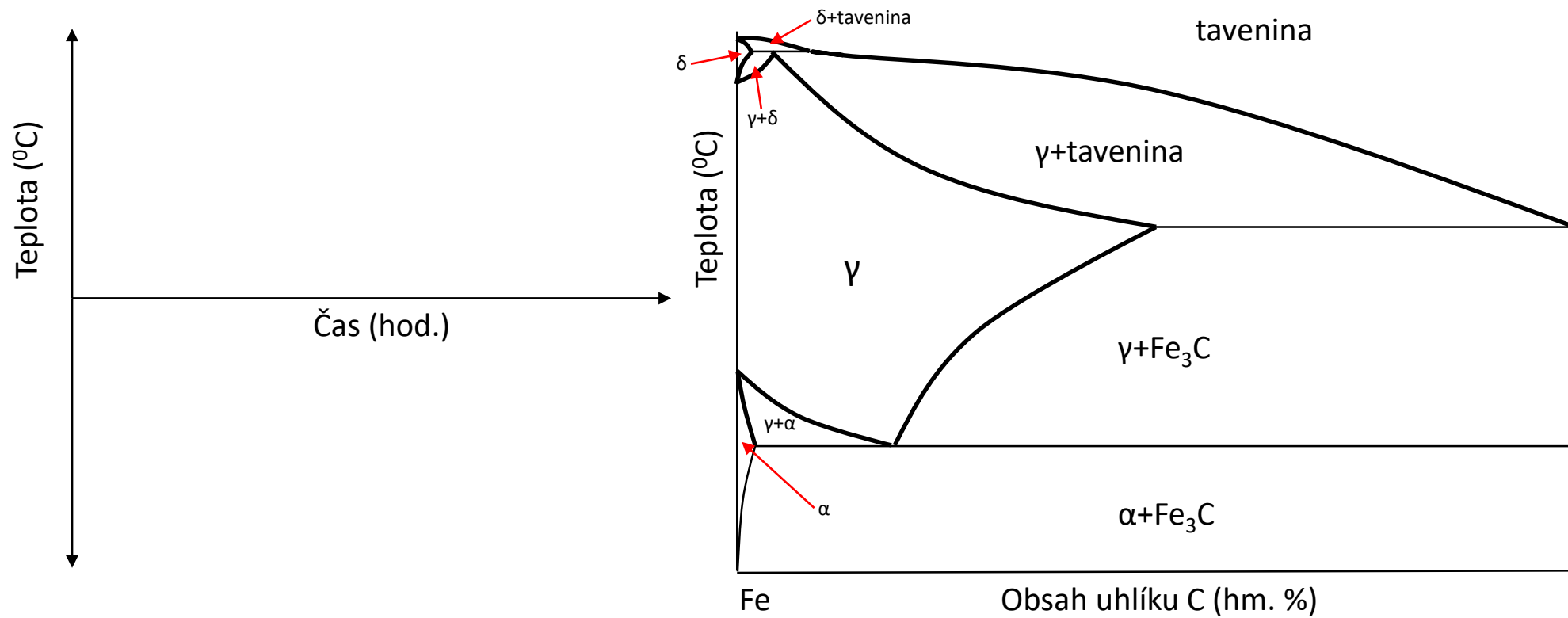
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

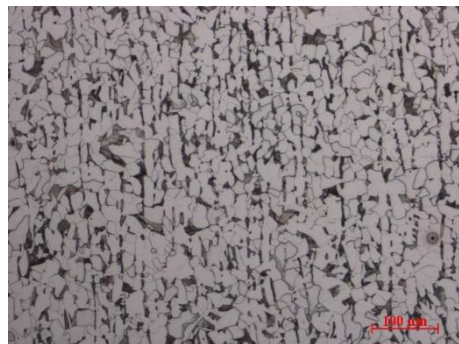
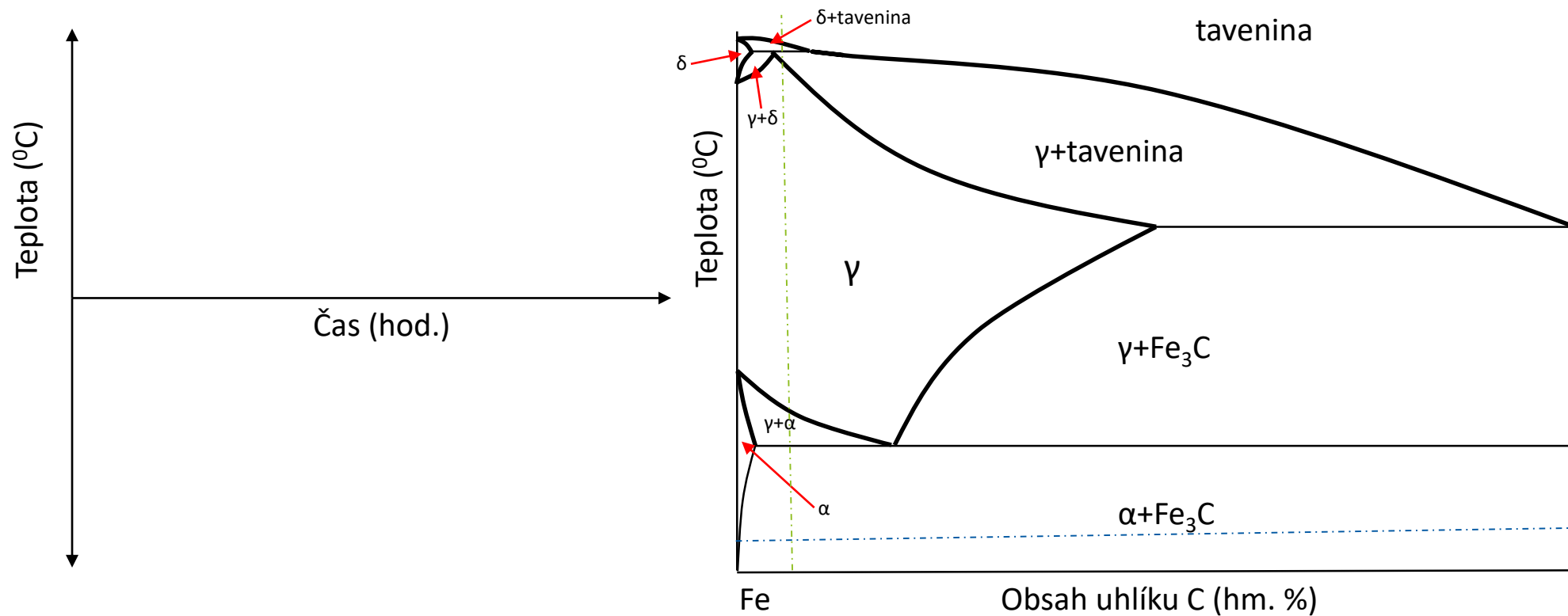
Tepelné zpracování materiálu



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

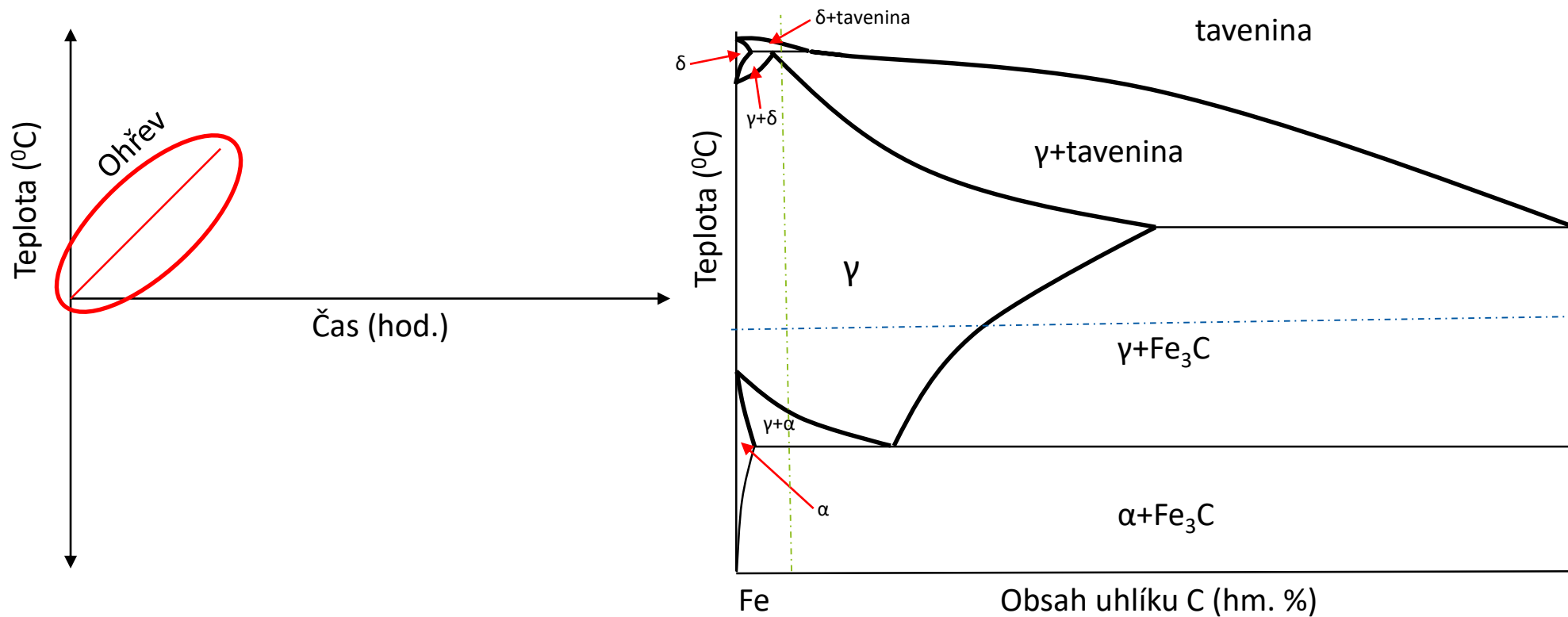
Tepelné zpracování materiálu



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

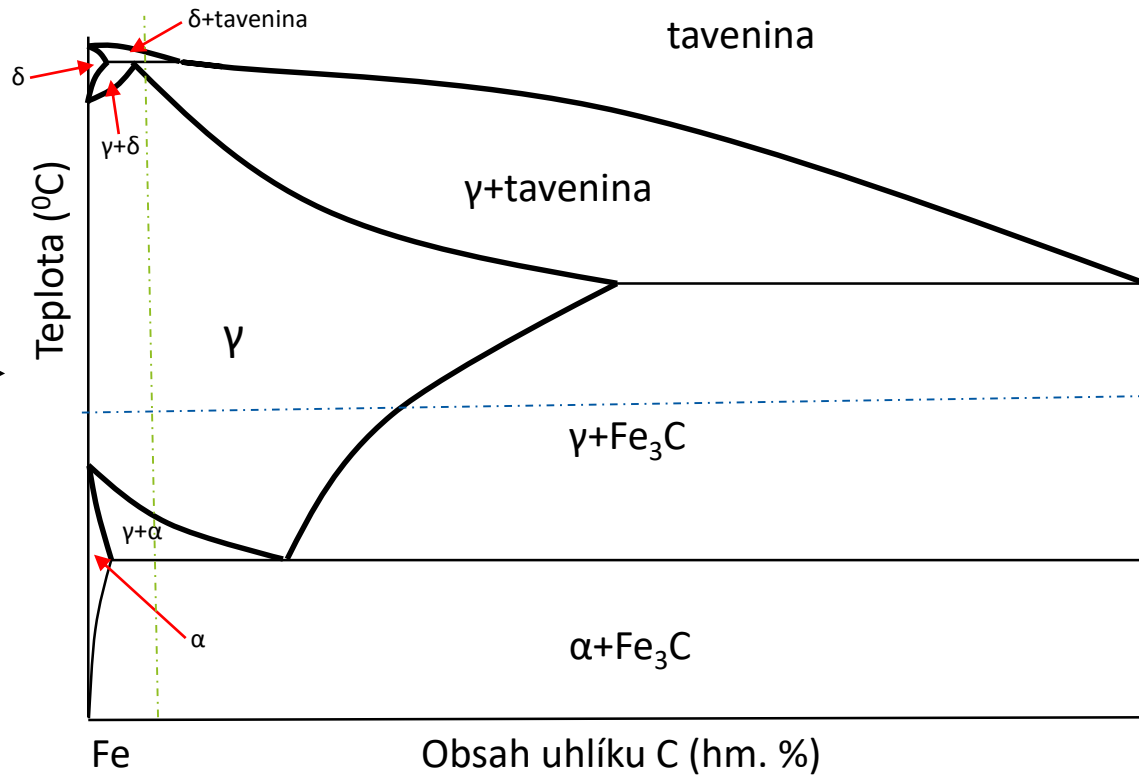
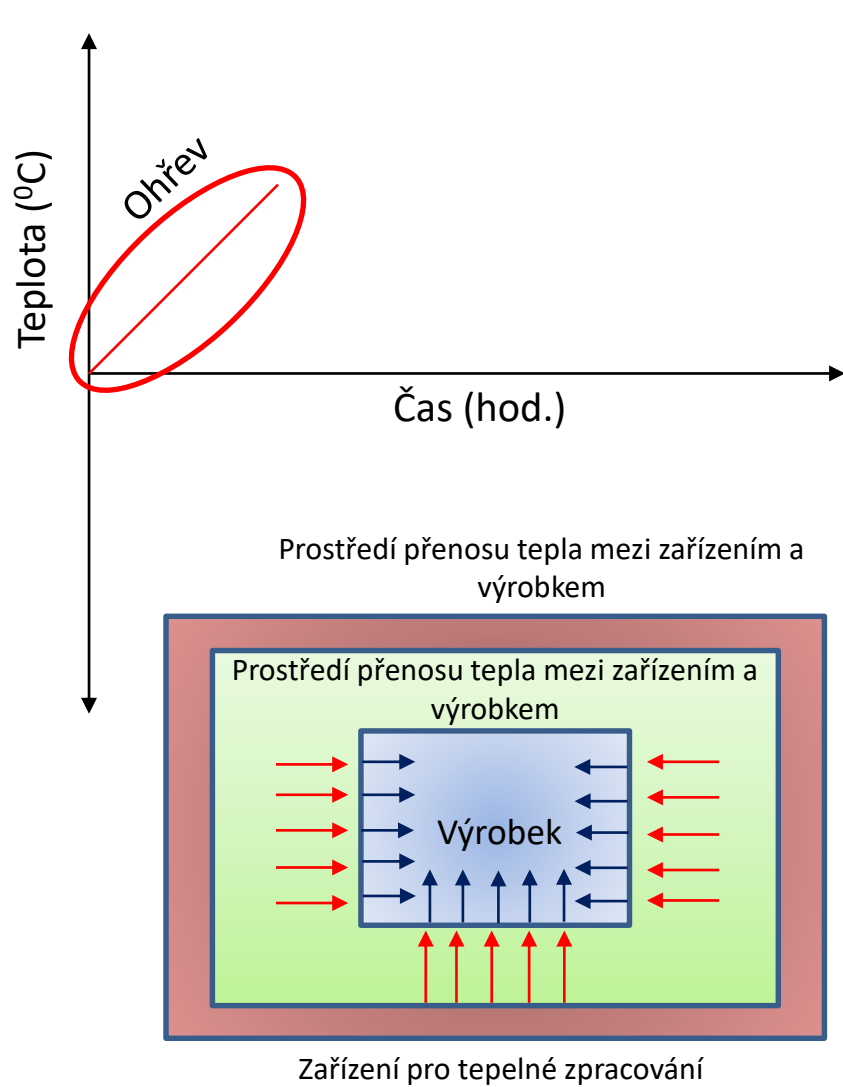
Tepelné zpracování materiálu



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu



Formy Přenosu tepla:

- Prouděním (konvekcí)
- Zářením (sáláním)
- Vedením (kondukcí)

Způsoby výměny sdílení tepla:

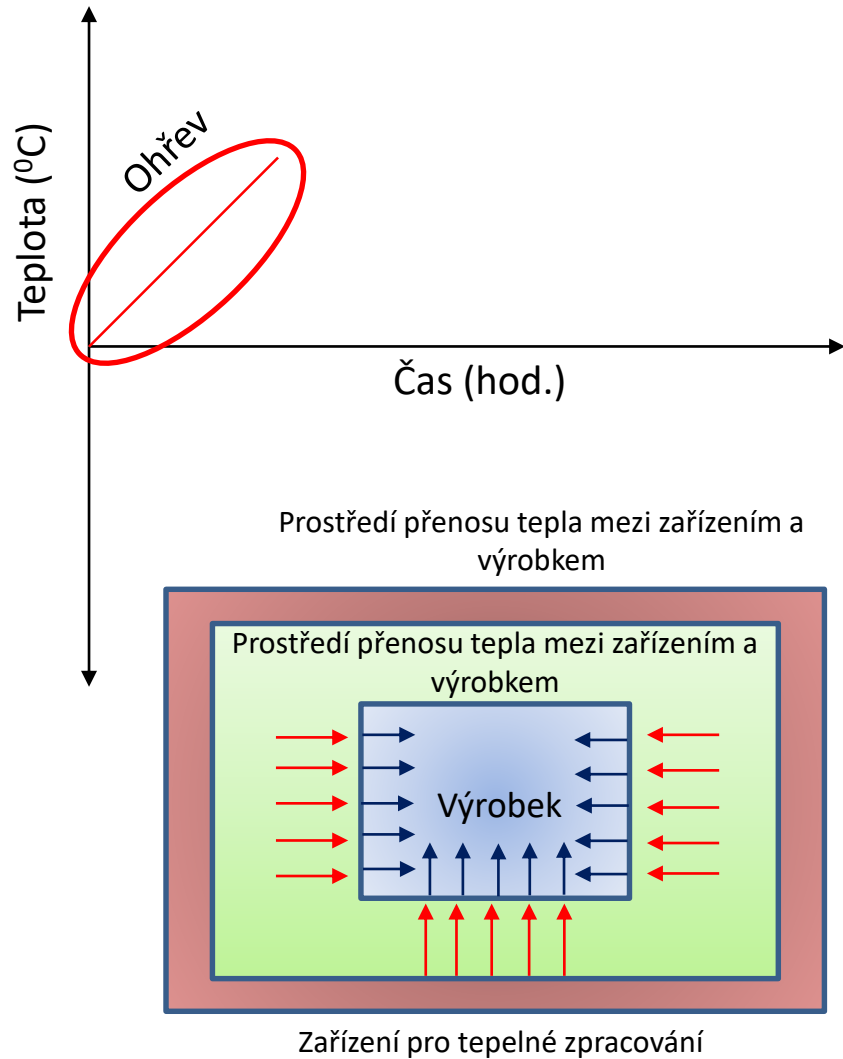
- Vnější, probíhá mezi zařízením, prostředím a povrchem výrobku
- Vnitřní, probíhá mezi povrchem výrobku a jeho objemem



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu



Výměnu tepla lze charakterizovat tzv Biotovým kritériem (Bi):

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot x$$

Kde:

α je součinitel přestupu tepla prouděním nebo zářením [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

λ je koeficient tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

x je charakteristický rozměr výrobku [m]

Formy Přenosu tepla:

- Prouděním (konvekci)
- Zářením (sáláním)
- Vedením (kondukcí)

Způsoby výměny sdílení tepla:

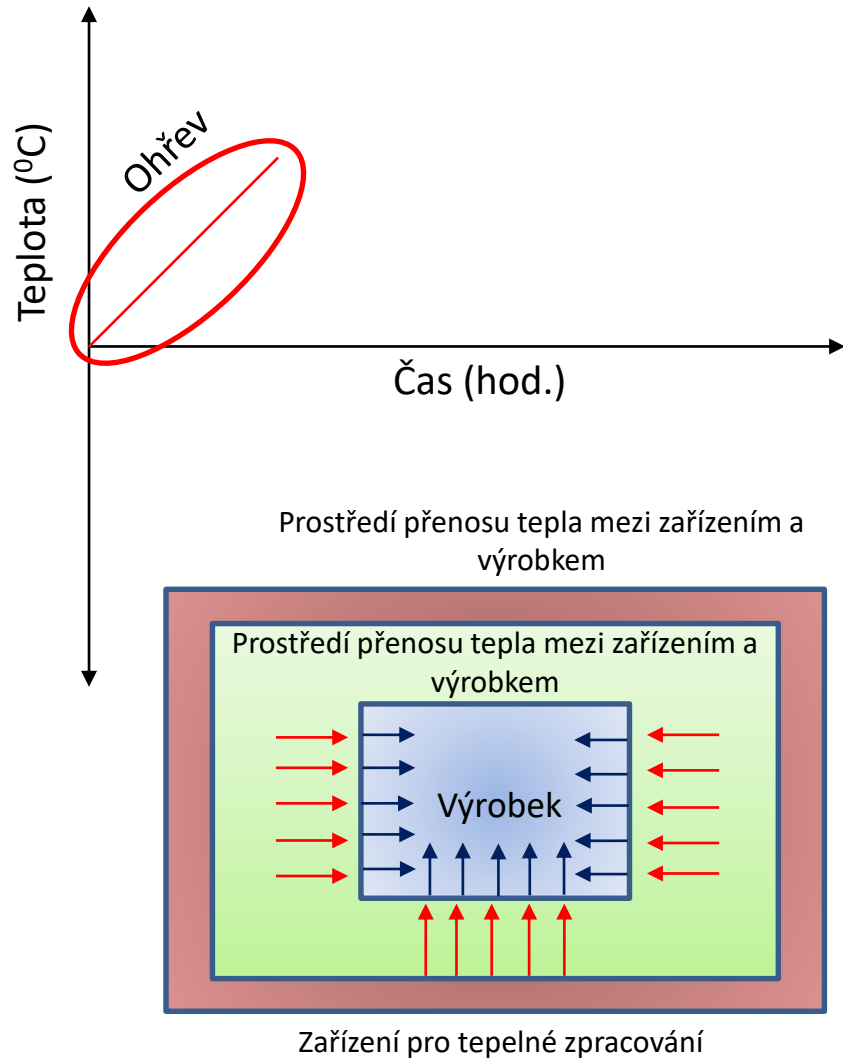
- Vnější, probíhá mezi zařízením, prostředím a povrchem výrobku
- Vnitřní, probíhá mezi povrchem výrobku a jeho objemem



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu



Výměnu tepla lze charakterizovat tzv Biotovým kritériem (Bi):

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot x$$

Kde:

α je součinitel přestupu tepla prouděním nebo zářením [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]

λ je koeficient tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

x je charakteristický rozměr výrobku [m]

$Bi \leq 0,25$ = tělesa tenká

$Bi > 0,25$ = tělesa tlustá

Formy Přenosu tepla:

- Prouděním (konvekci)
- Zářením (sáláním)
- Vedením (kondukcí)

Způsoby výměny sdílení tepla:

- Vnější, probíhá mezi zařízením, prostředím a povrchem výrobku
- Vnitřní, probíhá mezi povrchem výrobku a jeho objemem

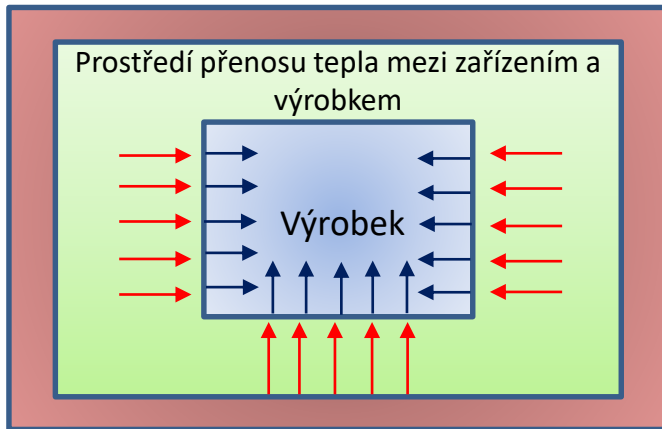


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu

Prostředí přenosu tepla mezi zařízením a výrobkem



Zařízení pro tepelné zpracování

Příklad výpočtu:

Plech o tloušťce 30 mm je oboustranně ohříván z pokojové teploty na teplotu 900 °C. Materiálem plechu je středně legovaná ocel. Určete, jestli se z hlediska ohřevu jedná o těleso tenké či tlusté. Součinitel přestupu tepla $\alpha = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

Výměnu tepla lze charakterizovat tzv Biotovým kritériem (Bi):

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot x$$

$Bi \leq 0,25$ = tělesa tenká

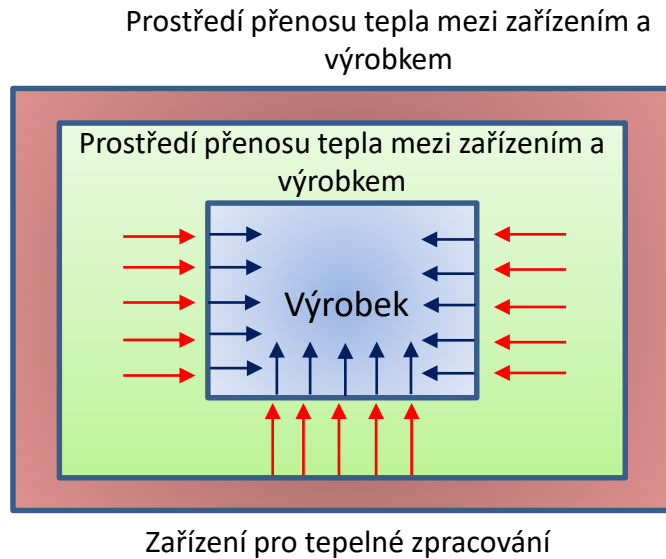
$Bi > 0,25$ = tělesa tlustá



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu



Příklad výpočtu:

Plech o tloušťce 30 mm je oboustranně ohříván z pokojové teploty na teplotu 900 °C. Materiálem plechu je středně legovaná ocel. Určete, jestli se z hlediska ohřevu jedná o těleso tenké či tlusté. Součinitel přestupu tepla $\alpha = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

1. Určení střední teploty ohřevu T
2. Určení tepelné vodivosti λ
3. Výpočet Bi

Výměnu tepla lze charakterizovat tzv Biotovým kritériem (Bi):

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot x$$

$Bi \leq 0,25$ = tělesa tenká

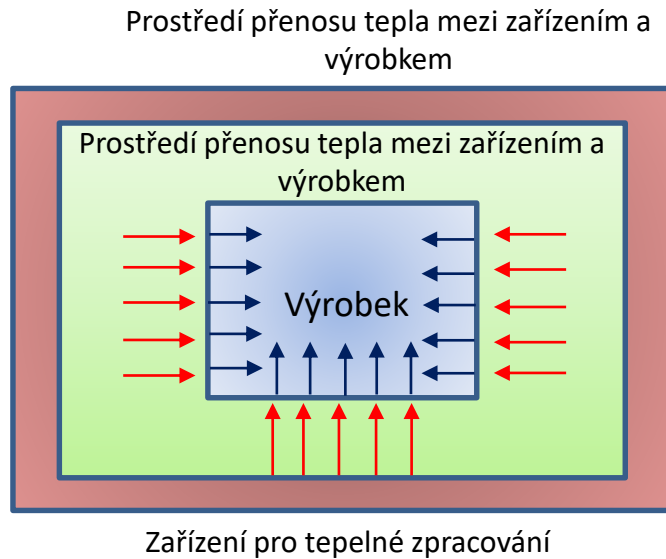
$Bi > 0,25$ = tělesa tlustá



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu



Příklad výpočtu:

Plech o tloušťce 30 mm je oboustranně ohříván z pokojové teploty na teplotu 900 °C. Materiálem plechu je středně legovaná ocel. Určete, jestli se z hlediska ohřevu jedná o těleso tenké či tlusté. Součinitel přestupu tepla $\alpha = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

1. Určení střední teploty ohřevu T

$$T = \frac{T_{900} - T_{pokojová}}{2} = \frac{900 - 20}{2} = \frac{880}{2} = 440 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

Výměnu tepla lze charakterizovat tzv Biotovým kritériem (Bi):

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot x$$

$Bi \leq 0,25$ = tělesa tenká

$Bi > 0,25$ = tělesa tlustá

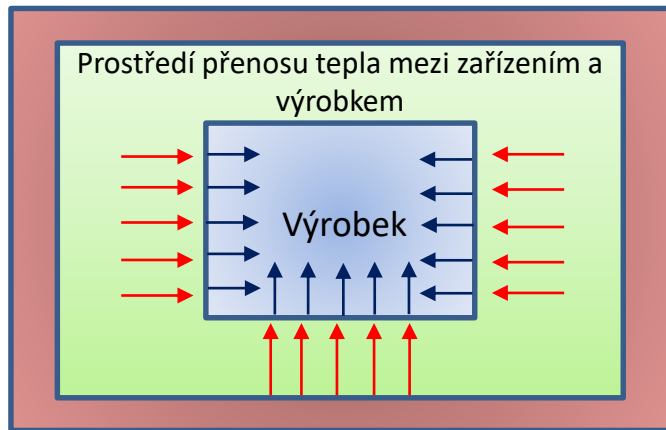


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu

Prostředí přenosu tepla mezi zařízením a výrobkem



Zařízení pro tepelné zpracování

Výměnu tepla lze charakterizovat tzv Biotovým kritériem (Bi):

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot x$$

$Bi \leq 0,25$ = tělesa tenká

$Bi > 0,25$ = tělesa tlustá

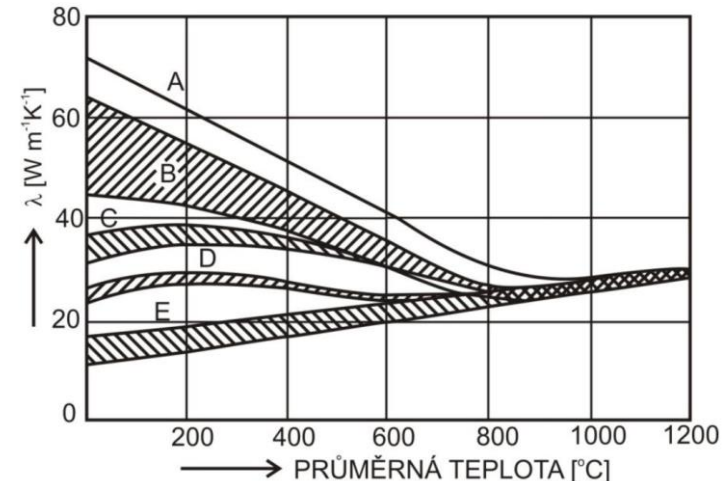
Příklad výpočtu:

Plech o tloušťce 30 mm je oboustranně ohříván z pokojové teploty na teplotu 900 °C. Materiálem plechu je středně legovaná ocel. Určete, jestli se z hlediska ohřevu jedná o těleso tenké či tlusté. Součinitel přestupu tepla $\alpha = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

1. Určení střední teploty ohřevu T

$$T = \frac{T_{900} - T_{pokojová}}{2} = \frac{900 - 20}{2} = \frac{880}{2} = 440 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

2. Určení tepelné vodivosti λ , viz graf[1]

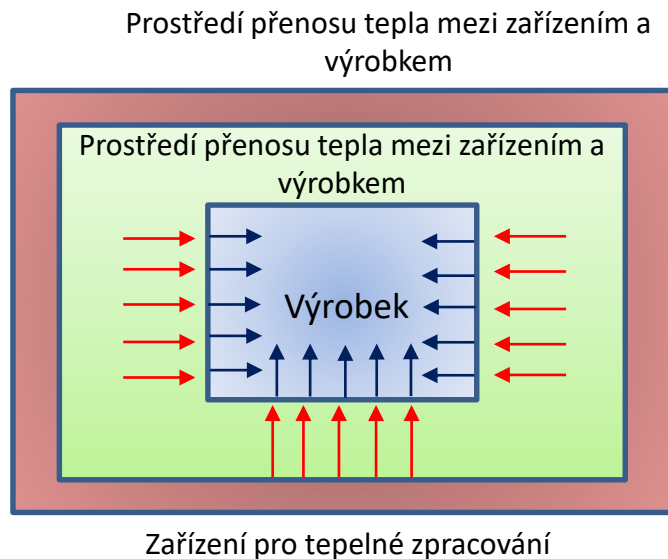


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu



Výměnu tepla lze charakterizovat tzv Biotovým kritériem (Bi):

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot x$$

$Bi \leq 0,25$ = tělesa tenká

$Bi > 0,25$ = tělesa tlustá

Příklad výpočtu:

Plech o tloušťce 30 mm je oboustranně ohříván z pokojové teploty na teplotu 900 °C. Materiálem plechu je středně legovaná ocel. Určete, jestli se z hlediska ohřevu jedná o těleso tenké či tlusté. Součinitel přestupu tepla $\alpha = 100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

1. Určení střední teploty ohřevu T

$$T = \frac{T_{900} - T_{pokojová}}{2} = \frac{900 - 20}{2} = \frac{880}{2} = 440 \text{ [}^{\circ}\text{C]}$$

2. Určení tepelné vodivosti λ , viz graf[1]

$$\lambda = 35 [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

3. Výpočet hodnoty Biotova kritéria

$$Bi = \frac{100}{35} \cdot 0,015 = 0,042$$

Jedná se tedy o těleso tepelně tenké.

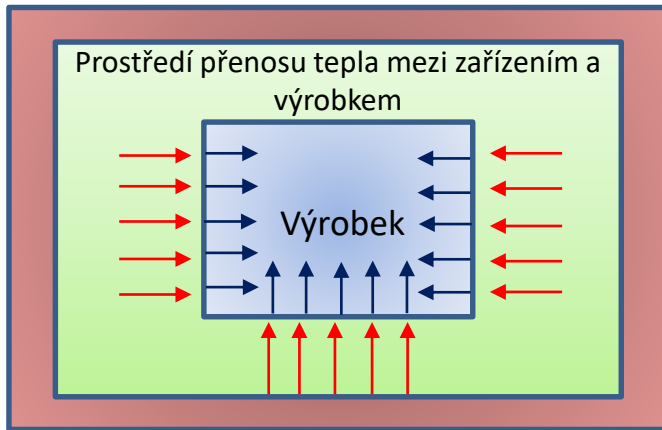


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

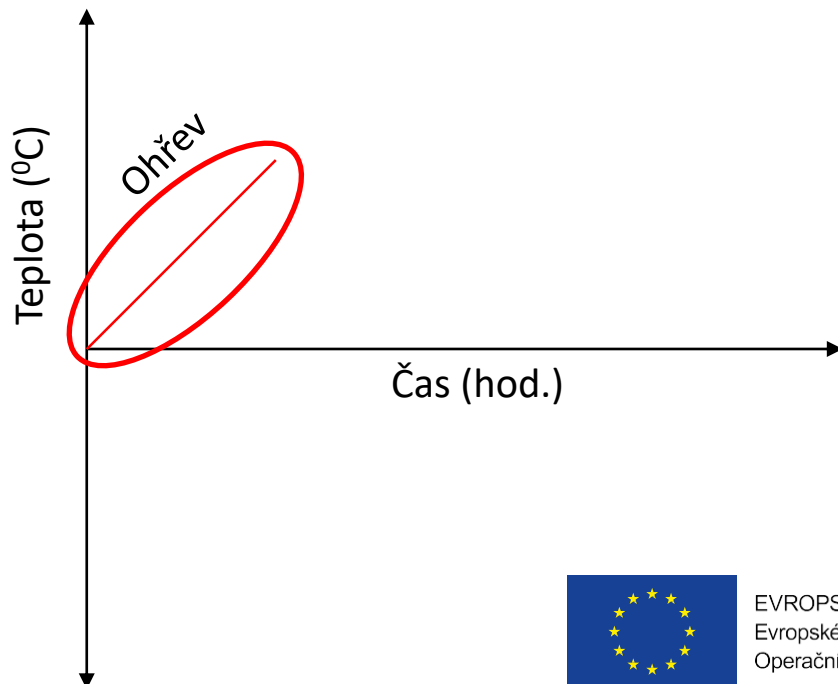
MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu

Prostředí přenosu tepla mezi zařízením a výrobkem



Zařízení pro tepelné zpracování



Rychlost ohřevu a jeho doba závisí na:

- Požadované teplotě TZ
- Prostředí přenosu tepla, jeho cirkulaci apod.
- Tepelné vodivosti zpracovávaného výrobku, jeho velikosti a tvaru
- Rozložení součástí v peci a parametry pece

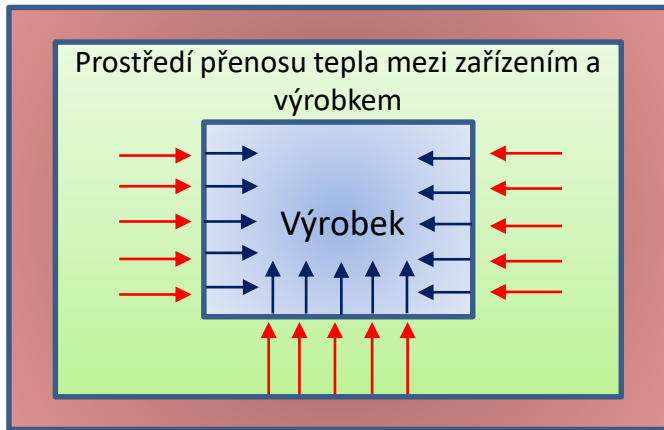


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

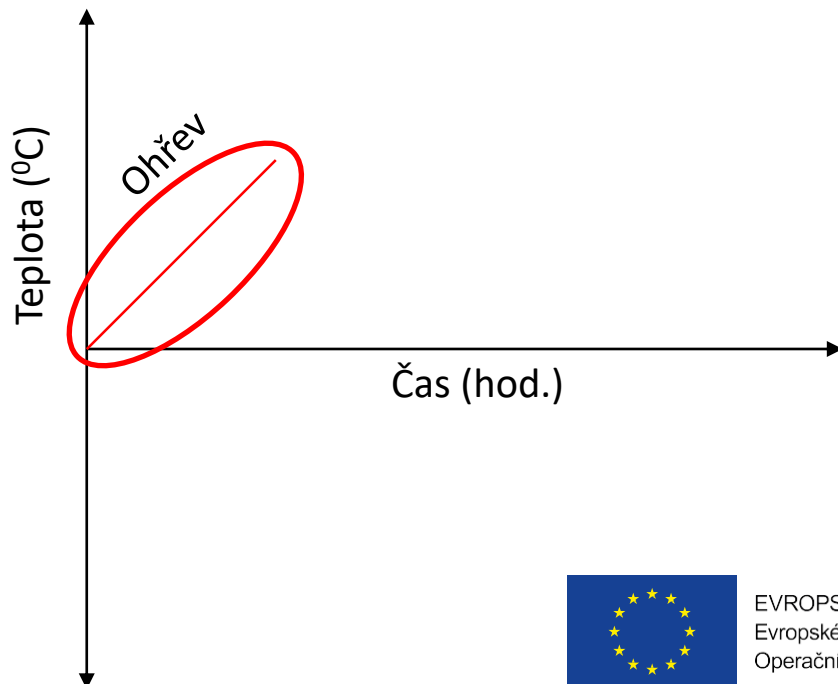
MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu

Prostředí přenosu tepla mezi zařízením a výrobkem



Zařízení pro tepelné zpracování



Rychlost ohřevu a jeho doba závisí na:

- Požadované teplotě TZ
- Prostředí přenosu tepla, jeho cirkulaci apod.
- Tepelné vodivosti zpracovávaného výrobku, jeho velikosti a tvaru
- Rozložení součástí v peci a parametrech pece

Výpočet rychlosti ohřevu:

$$v_{ohřevu} = \frac{T_1 - T_0}{t_1} [^{\circ}\text{C}/\text{s}]$$

Kde:

T_1 [$^{\circ}\text{C}$]... je teplota na kterou ohřev probíhá

T_0 [$^{\circ}\text{C}$] ... je teplota na počátku ohřevu

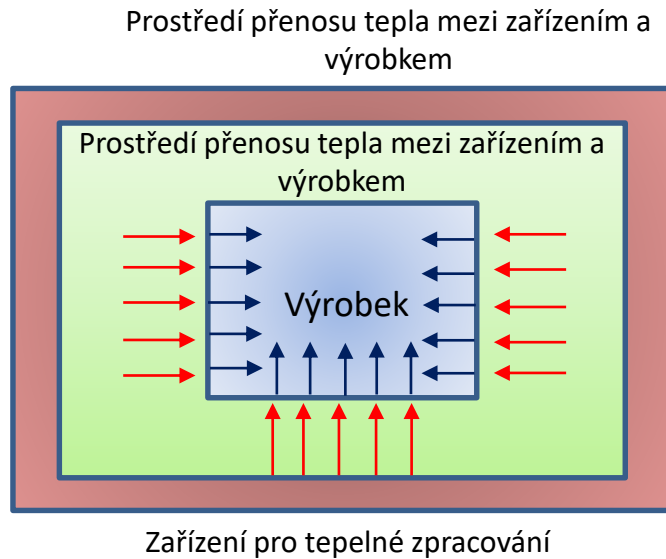
t_1 [s]... je čas po který ohřev probíhá



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu



Výpočet rychlosti ohřevu:

$$v_{\text{ohřevu}} = \frac{T_1 - T_0}{t_1} [^{\circ}\text{C}/\text{s}]$$

Kde:

$T_1 [^{\circ}\text{C}]$... je teplota na kterou ohřev probíhá

$T_0 [^{\circ}\text{C}]$... je teplota na počátku ohřevu

$t_1 [\text{s}]$... je čas po který ohřev probíhá

Příklad výpočtu:

Stanovte dobu za jakou došlo k ohřevu součásti vyrobené z uhlíkové oceli při jejím ohřevu z pokojové teploty 20°C na teplotu 850°C . Rychlost ohřevu součásti byla $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Postup výpočtu:

$$v_{\text{ohřevu}} = \frac{T_1 - T_0}{t_1} = \frac{850 - 20}{t_1} = \frac{830}{t_1}$$

$$t_1 = \frac{830}{v_{\text{ohřevu}}} = \frac{830}{20} = 41,5 [\text{min}]$$

$$t_1 = 2490 [\text{s}] = 41,5 [\text{min}] \cong 0,69 [\text{hod}]$$

Doba ohřevu součásti tedy byla 41,5 minut.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

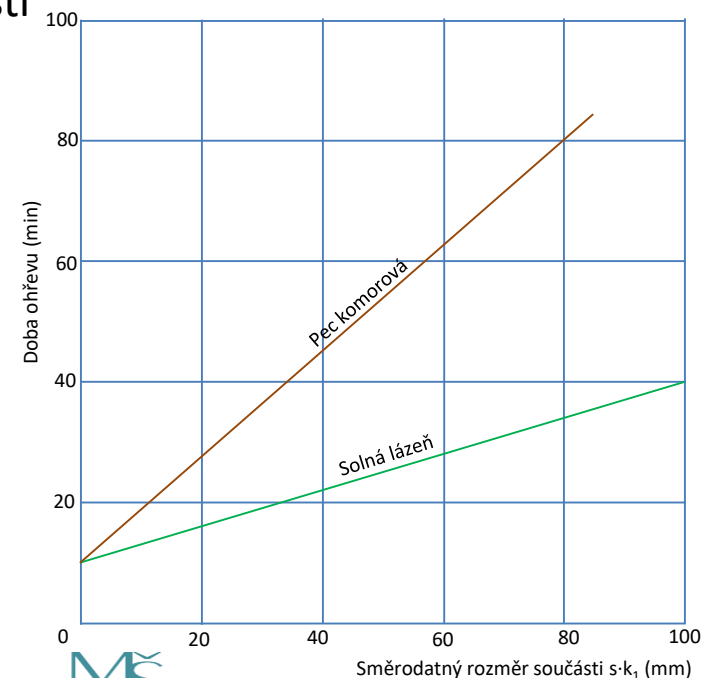
Tepelné zpracování materiálu

Tabulka 1- Tabulka pro stanovení koeficientu k_1 podle typu a tvaru ohřívaného tělesa [1]

Tvar součásti	Směrodatný rozměr	Koeficient k_1
Koule	Průměr	0,7
Krychle	Délka hrany	0,7
Válec	Průměr	1
Hranol	Délka hrany	1
Prstenec	Šířka prstence	1,5
	Tloušťka prstence	1,5
Deska	Tloušťka	1,5
Trubka	Síla stěny	2 pro krátké otevřené trubky
		4 pro dlouhé trubky
		4 pro uzavřené trubky

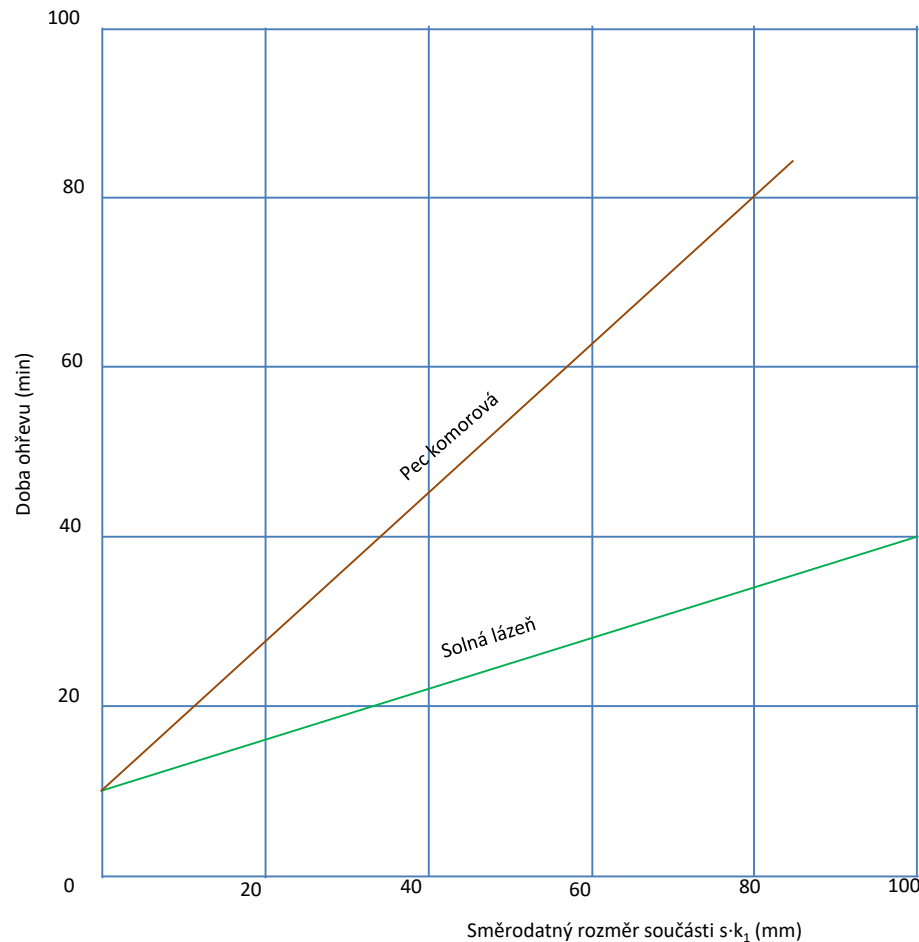
Doba ohřevu:

- je ji možné stanovit přibližně pomocí empirických vzorců a tabulek
- K době ohřevu je v některých případech nutné připočítat dobu výdrže na požadované teplotě ohřevu (10-20 minut, pro konstrukční oceli)
- Doba ohřevu významně ovlivňuje tvar součásti



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Tepelné zpracování materiálu



Příklad výpočtu:

Stanovte dobu ohřevu ocelové desky o tloušťce 50 mm, který je ohříván pomocí komorové pece a solné lázni.

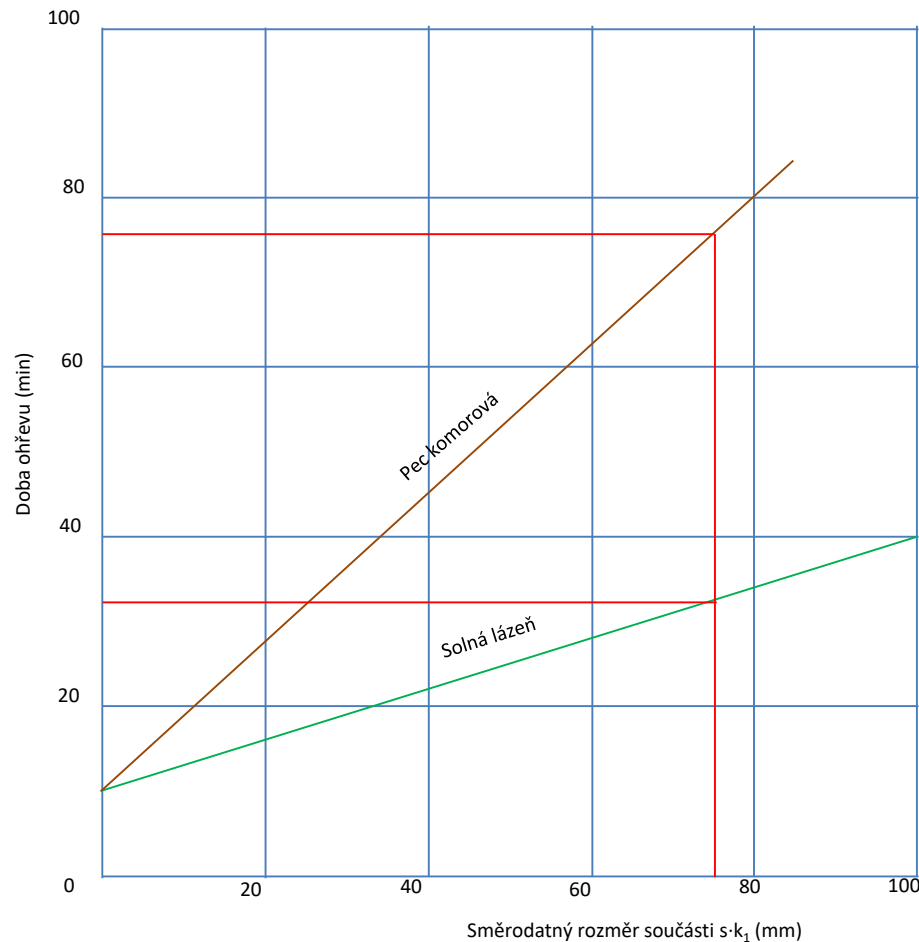
$$s \cdot k_1 = 50 \cdot 1,5 = 75 [mm]$$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu



Příklad výpočtu:

Stanovte dobu ohřevu ocelové desky o tloušťce 50 mm, který je ohříván pomocí komorové pece a solné lázni.

$$s \cdot k_1 = 50 \cdot 1,5 = 75 [mm]$$

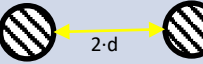
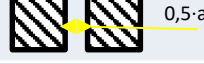
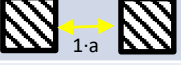
Odečtením z grafu bylo zjištěno, že doba ohřevu desky v solné lázni bude trvat přibližně 32 minut, při ohřevu v komorové peci pak 76 minut.



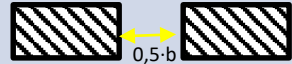
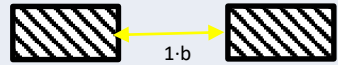
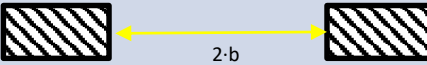
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu

Tvar součástí a jejich vzájemná vzdálenost	Faktor uložení f
	1
	2
	2
	1,7
	1,4
	1,35
	1,3
	1,4
	4
	2,2
	2
	1,8

Při tepelném zpracování více kusů najednou je nutné prodloužit dobu ohřevu. Přitom je nutné brát v úvahu vzájemnou polohu uložených těles v peci, tj. jejich vzájemnou vzdálenost.

Tvar součástí a jejich vzájemná vzdálenost	Faktor uložení f
	1,6
	4
	2,8
	2,4
	2

Příklad výpočtu:

Stanovte dobu ohřevu ocelových desek uložených ve vzájemné vzdálenosti $0,5 \cdot b$. Z předchozího příkladu bylo zjištěno, že:

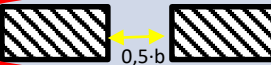
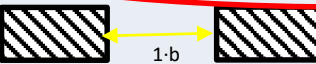
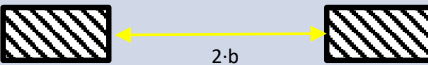
$$s \cdot k_1 = 50 \cdot 1,5 = 75 [mm]$$

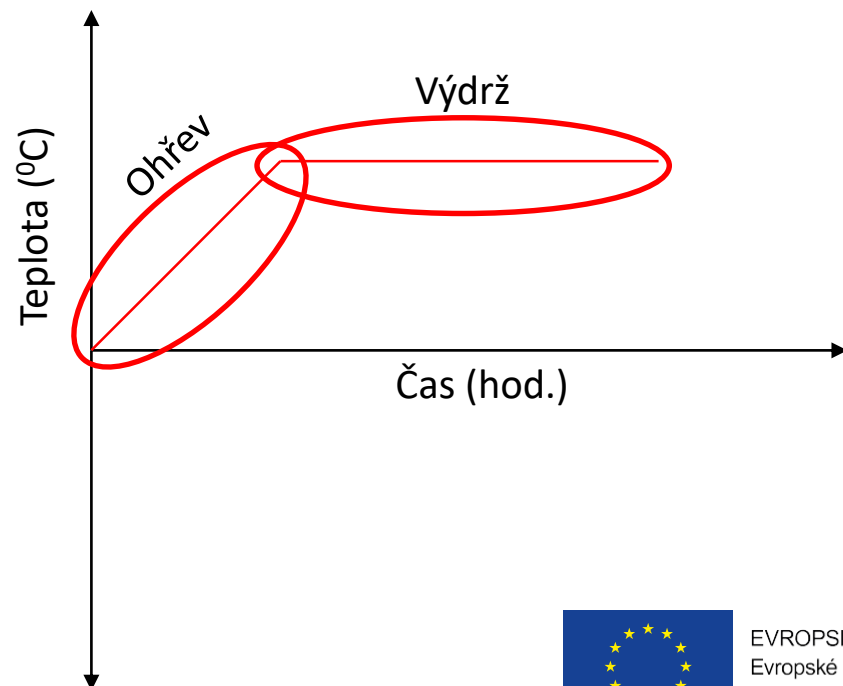


EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu

Tvar součástí a jejich vzájemná vzdálenost	Faktor uložení f
	1,6
	4
	2,8
	2,4
	2



Příklad výpočtu:

Stanovte dobu ohřevu ocelových desek uložených ve vzájemné vzdálenosti $0,5 \cdot b$. Z předchozího příkladu bylo zjištěno, že:

$$s \cdot k_1 = 50 \cdot 1,5 = 75 \text{ [mm]}$$

Z grafu pak byla odečtena doba ohřevu pro jedno těleso.

Pro solnou lázeň: 32 minut

Pro komorovou pec: 76 minut

Pro více těles ve vzájemné vzdálenosti $0,5 \cdot b$ pak:

Pro solnou lázeň: $t = 32 \cdot 2,8 = 90 \text{ [min]}$

Pro komorovou pec: $t = 76 \cdot 2,8 = 213 \text{ [min]}$

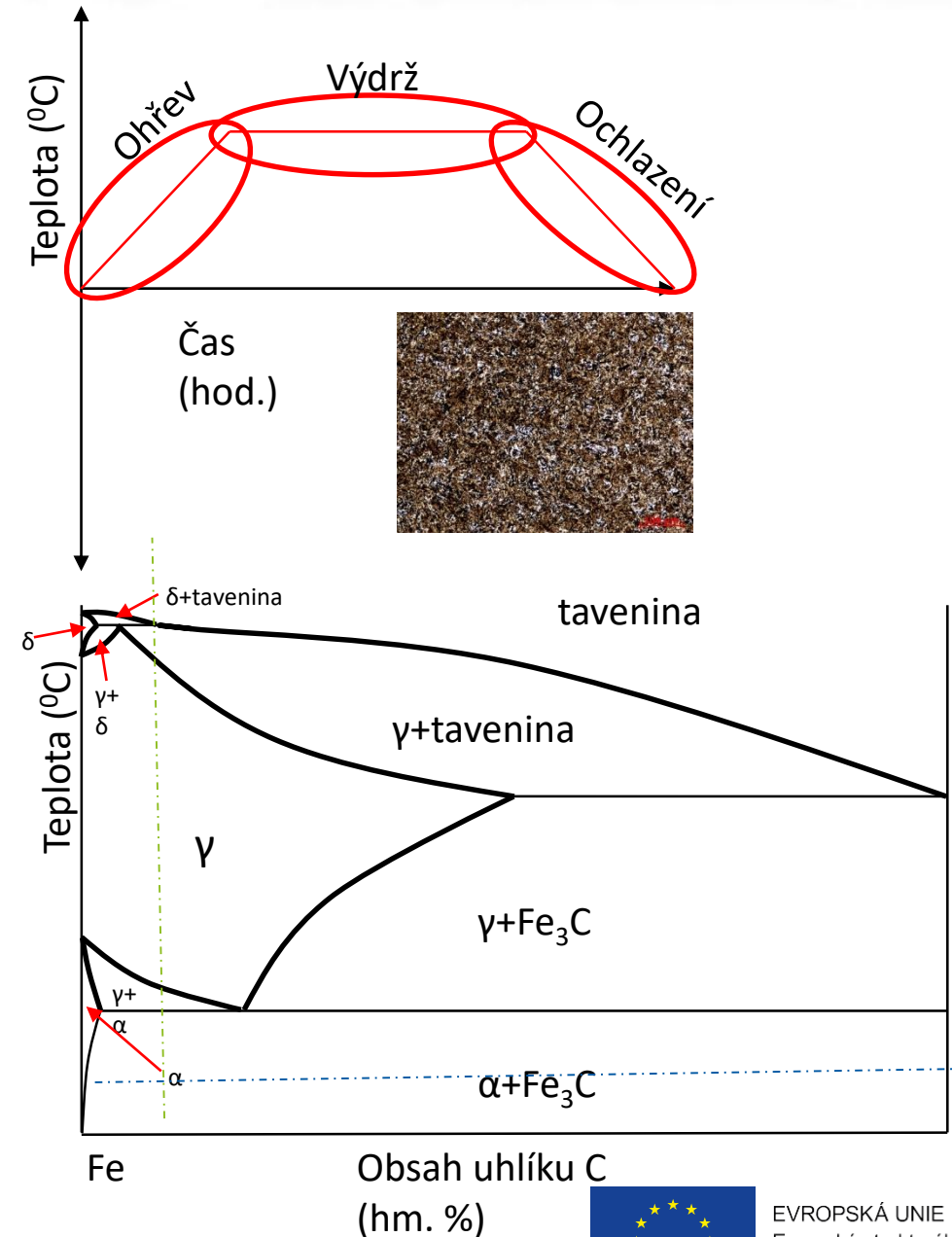
K době ohřevu je v některých případech nutné připočítat dobu výdrže na požadované teplotě ohřevu (10-20 minut, pro konstrukční oceli)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

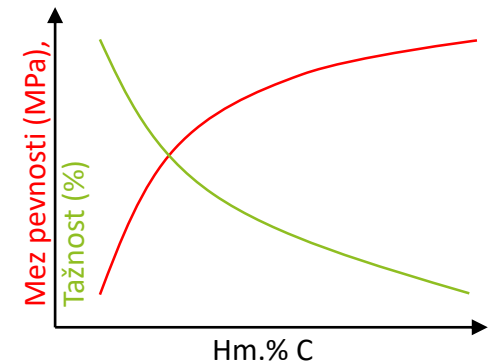
MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu



Rychlost a doba ochlazování:

- Ovlivňuje strukturu a napětí působící v materiálu
- Proces ochlazování může probíhat s izotermickou prodlevou nebo za podmínek anizotermických, kdy se využívá teplotního spádu.
- Ochlazování může probíhat v závislosti na druhu tepelného zpracování:
 - V pecích zařízeních nebo autoklávech
 - V prostředích, u kterých dochází ke změně jejich skupenství (voda, olej, polymery nebo emulze)
 - V prostředích, u kterých ke změně jejich skupenství nedochází (vzduch, soli nebo inertní plyny)



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Tepelné zpracování materiálu

Při tepelném zpracování výrobku může docházet buď k záměrné difúzi prvků z jeho nebo do jeho objemu (proti-vločkové žíhání, cementace, nitridace), případně se může jednat o jejich difúzi neúmyslnou (oduhličení povrchu). Tu může způsobit například nevhodně zvolená teplota procesu tepelného zpracování.

Procesy chemicko-tepelného zpracování lze rozdělit na:

- Metody, při kterých dochází k difúzi prvků v celém objemu výrobku
- Metody, při kterých dochází k difúzi prvků v omezené oblasti výrobku, povrchu výrobku



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

Příklad výpočtu:

Určete, průběh koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě ocele, která je cementována při teplotě 1050 °C po dobu 4, 8 a 12 hodin. Počáteční koncentrace uhlíku ocele je 0,25 hm. % C.

Postup výpočtu:

- Z diagramu Fe-Fe₃C odečíst maximální rozpustnost uhlíku v austenitu při teplotě procesu 1050 °C. $C_1 = 1,56 \%$

- Určit difuzivitu: $D = D_0 \exp\left(\frac{-\Delta H_d}{RT}\right)$,

Kde: D_0 ... je frekvenční faktor

ΔH_d ... je aktivační entalpie difúze

R... je plynová konstanta

T... je absolutní teplota

Pro uhlík v rozmezí teplot 500-1100 °C a difúzní prostředí Fe_γ platí následující [2]:

$$D_0 = 4,0 \cdot 10^{-5} [m^2 s^{-1}]$$

$$\Delta H_d = 140 [KJ mol^{-1}]$$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Příklad výpočtu:

Určete, průběh koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě ocele, která je cementována při teplotě 1050 °C po dobu 4, 8 a 12 hodin. Počáteční koncentrace uhlíku ocele je 0,25 hm. % C.

Postup výpočtu:

- Určit difuzivitu: $D = D_0 \exp\left(\frac{-\Delta H_d}{RT}\right)$,
- $D_0 = 4,0 \cdot 10^{-5} [\text{m}^2 \text{s}^{-1}]$, $\Delta H_d = 140 [\text{KJmol}^{-1}]$
- $D_c^Y = 4,0 \cdot 10^{-5} \cdot \exp\left(\frac{-140000}{8,314 \cdot (1050 + 273)}\right) = \underline{1,187 \cdot 10^{-10} [\text{m}^2 \text{s}^{-1}]}$

Při nauhličování dochází k nárůstu podílu uhlíku v objemu výrobku. Pro nauhličování tedy platí následující vztah:

$$\frac{c - c_0}{c_1 - c_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{(D \cdot \tau)}}\right) = 1 - \operatorname{erf} \cdot (z); c - c_0 = (c_1 - c_0) \cdot (1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{(D \cdot \tau)}}\right));$$

$$c = c_0 + (c_1 - c_0) \cdot (1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{(D \cdot \tau)}}\right))$$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání


MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Příklad výpočtu:

Určete, průběh koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě ocele, která je cementována při teplotě 1050 °C po dobu 4, 8 a 12 hodin. Počáteční koncentrace uhlíku ocele je 0,25 hm. % C.

Postup výpočtu:

- Určíme argument chybové funkce z:

$$z = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_c^{\gamma} \cdot \tau}} = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_c^{\gamma} \cdot \tau}}$$
$$z_1 = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{1,187^{-10} \cdot (4 \cdot 3600)}}$$
$$z_2 = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{1,187^{-10} \cdot (8 \cdot 3600)}}$$
$$z_3 = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{1,187^{-10} \cdot (12 \cdot 3600)}}$$



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Příklad výpočtu:

Určete, průběh koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě ocele, která je cementována při teplotě 1050 °C po dobu 4, 8 a 12 hodin. Počáteční koncentrace uhlíku ocele je 0,25 hm. % C.

Patří mezi základní nabídky funkcí v programu Excel

Postup výpočtu:

- Určíme argument chybové funkce z:

$$z = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_c^y \cdot \tau}} = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_c^y \cdot \tau}}$$

$$z_1 = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{1,187^{-10} \cdot (4 \cdot 3600)}}$$

$$z_2 = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{1,187^{-10} \cdot (8 \cdot 3600)}}$$

$$z_3 = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{1,187^{-10} \cdot (12 \cdot 3600)}}$$

$$c = c_0 + (c_1 - c_0) \cdot (1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{(D \cdot \tau)}}\right))$$

Vzdálenost od povrchu x (mm)	Argument (z)	Funkce erf (z)	1-erf(z)	Koncentrace uhlíku C
0				
0,1				
0,2				
0,3				
0,4				
0,5				
0,6				



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Příklad výpočtu:

Určete, průběh koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě ocele, která je cementována při teplotě 1050 °C po dobu 4, 8 a 12 hodin. Počáteční koncentrace uhlíku ocele je 0,25 hm. % C.

Vzdálenost od povrchu (mm)	koncentrace			Vzdálenost od koncentrace povrchu (mm)	koncentrace			Vzdálenost od koncentrace povrchu (mm)	koncentrace		
	C_1	C_2	C_3	C_1	C_2	C_3		C_1	C_2	C_3	
0	1,56	1,56	1,56	2,4	0,50	0,72	0,84	4,8	0,26	0,34	0,43
0,1	1,50	1,52	1,53	2,5	0,48	0,69	0,82	4,9	0,26	0,33	0,42
0,2	1,45	1,48	1,49	2,6	0,46	0,67	0,80	5	0,26	0,32	0,41
0,3	1,39	1,44	1,46	2,7	0,44	0,65	0,77	6	0,25	0,28	0,33
0,4	1,34	1,40	1,43	2,8	0,42	0,62	0,75	7	0,25	0,26	0,29
0,5	1,28	1,36	1,40	2,9	0,40	0,60	0,73	8	0,25	0,25	0,27
0,6	1,23	1,32	1,37	3	0,39	0,58	0,71	9	0,25	0,25	0,26
0,7	1,17	1,28	1,33	3,1	0,37	0,56	0,69	10	0,25	0,25	0,25
0,8	1,12	1,25	1,30	3,2	0,36	0,54	0,67	11	0,25	0,25	0,25
0,9	1,07	1,21	1,27	3,3	0,35	0,52	0,65	12	0,25	0,25	0,25
1	1,02	1,17	1,24	3,4	0,34	0,50	0,63	13	0,25	0,25	0,25
1,1	0,97	1,13	1,21	3,5	0,33	0,49	0,61	14	0,25	0,25	0,25
1,2	0,93	1,10	1,18	3,6	0,32	0,47	0,59	15	0,25	0,25	0,25
1,3	0,88	1,06	1,15	3,7	0,31	0,46	0,57	16	0,25	0,25	0,25
1,4	0,84	1,03	1,12	3,8	0,30	0,44	0,56	17	0,25	0,25	0,25
1,5	0,80	0,99	1,09	3,9	0,30	0,43	0,54	18	0,25	0,25	0,25
1,6	0,76	0,96	1,06	4	0,29	0,42	0,53	19	0,25	0,25	0,25
1,7	0,72	0,93	1,03	4,1	0,28	0,40	0,51	20	0,25	0,25	0,25
1,8	0,68	0,89	1,00	4,2	0,28	0,39	0,50	21	0,25	0,25	0,25
1,9	0,65	0,86	0,97	4,3	0,28	0,38	0,48	22	0,25	0,25	0,25
2	0,62	0,83	0,95	4,4	0,27	0,37	0,47	23	0,25	0,25	0,25
2,1	0,59	0,80	0,92	4,5	0,27	0,36	0,46				
2,2	0,56	0,77	0,89	4,6	0,27	0,35	0,45				
2,3	0,53	0,75	0,87	4,7	0,26	0,34	0,44				



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

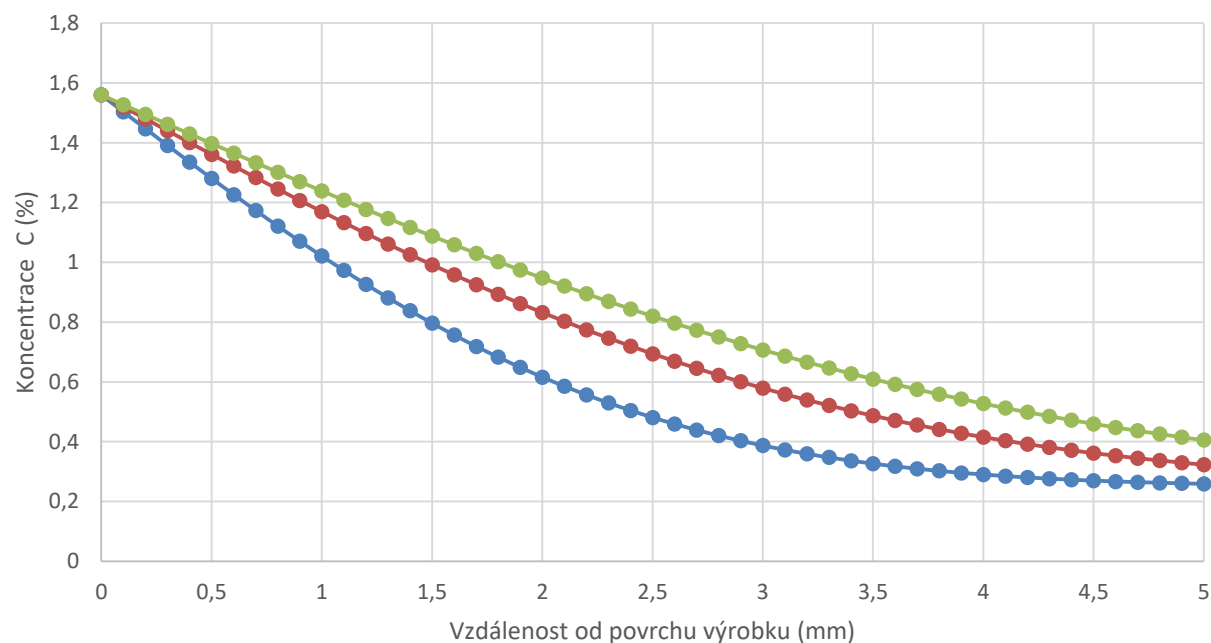
MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Příklad výpočtu:

Uřčete, průběh koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě ocele, která je cementována při teplotě 1050 °C po dobu 4, 8 a 12 hodin. Počáteční koncentrace uhlíku ocele je 0,25 hm. % C.

Vzdálenost od povrchu (mm)	koncentrace C ₁	koncentrace C ₂	koncentrace C ₃	Vzdálenost od povrchu (mm)	koncentrace C ₁	koncentrace C ₂	koncentrace C ₃	Vzdálenost od povrchu (mm)	koncentrace C ₁	koncentrace C ₂	koncentrace C ₃
0	1,56	1,56	1,56	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
0,1	1,50	1,52	1,52	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
0,2	1,45	1,48	1,48	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
0,3	1,39	1,44	1,44	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
0,4	1,34	1,40	1,40	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
0,5	1,28	1,36	1,36	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
0,6	1,23	1,32	1,32	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
0,7	1,17	1,28	1,28	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
0,8	1,12	1,25	1,25	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
0,9	1,07	1,21	1,21	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
1	1,02	1,17	1,17	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
1,1	0,97	1,13	1,13	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
1,2	0,93	1,10	1,10	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
1,3	0,88	1,06	1,06	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
1,4	0,84	1,03	1,03	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
1,5	0,80	0,99	0,99	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
1,6	0,76	0,96	0,96	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
1,7	0,72	0,93	0,93	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
1,8	0,68	0,89	0,89	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
1,9	0,65	0,86	0,86	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
2	0,62	0,83	0,83	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
2,1	0,59	0,80	0,80	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
2,2	0,56	0,77	0,77	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36
2,3	0,53	0,75	0,75	1,56	0,4	0,50	0,50	1,56	0,36	0,36	0,36

Průběh koncentrace uhlíku na povrchu výrobku



Z grafu a tabulky je pak možné odečíst hloubku cementační vrstvy, kdy při požadavku na obsah uhlíku v této vrstvě $c=0,8$ % pak hloubka cementační vrstvy bude



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Příklad výpočtu:

Určete, průběh koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě ocele, která je cementována při teplotě 1050 °C po dobu 4, 8 a 12 hodin. Počáteční koncentrace uhlíku ocele je 0,25 hm. % C.

Z grafu a tabulky je pak možné odečíst hloubku cementační vrstvy. Při požadavku na obsah uhlíku v této vrstvě $c=0,8\%$ pak bude její hloubka dosahovat: $c_1 = 1,5\text{ (mm)}$; $c_2 = 2,1\text{ (mm)}$; $c_3 = 2,6\text{ (mm)}$

Vzdálenost od povrchu (mm)	koncentrace C ₁			koncentrace C ₂			koncentrace C ₃			Vzdálenost od koncentrace povrchu (mm) C ₁			koncentrace C ₂			koncentrace C ₃			Vzdálenost od koncentrace povrchu (mm) C ₁			koncentrace C ₂			koncentrace C ₃		
0	1,56		1,56		1,56		2,4		0,50		0,72		0,84		4,8		0,26		0,34		0,43						
0,1	1,50		1,52		1,53		2,5		0,48		0,69		0,82		4,9		0,26		0,33		0,42						
0,2	1,45		1,48		1,49		2,6		0,46		0,67		0,80		5		0,26		0,32		0,41						
0,3	1,39		1,44		1,46		2,7		0,44		0,65		0,77		6		0,25		0,28		0,33						
0,4	1,34		1,40		1,43		2,8		0,42		0,62		0,75		7		0,25		0,26		0,29						
0,5	1,28		1,36		1,40		2,9		0,40		0,60		0,73		8		0,25		0,25		0,27						
0,6	1,23		1,32		1,37		3		0,39		0,58		0,71		9		0,25		0,25		0,26						
0,7	1,17		1,28		1,33		3,1		0,37		0,56		0,69		10		0,25		0,25		0,25						
0,8	1,12		1,25		1,30		3,2		0,36		0,54		0,67		11		0,25		0,25		0,25						
0,9	1,07		1,21		1,27		3,3		0,35		0,52		0,65		12		0,25		0,25		0,25						
1	1,02		1,17		1,24		3,4		0,34		0,50		0,63		13		0,25		0,25		0,25						
1,1	0,97		1,13		1,21		3,5		0,33		0,49		0,61		14		0,25		0,25		0,25						
1,2	0,93		1,10		1,18		3,6		0,32		0,47		0,59		15		0,25		0,25		0,25						
1,3	0,88		1,06		1,15		3,7		0,31		0,46		0,57		16		0,25		0,25		0,25						
1,4	0,84		1,03		1,12		3,8		0,30		0,44		0,56		17		0,25		0,25		0,25						
1,5	0,80		0,99		1,09		3,9		0,30		0,43		0,54		18		0,25		0,25		0,25						
1,6	0,76		0,96		1,06		4		0,29		0,42		0,53		19		0,25		0,25		0,25						
1,7	0,72		0,93		1,03		4,1		0,28		0,40		0,51		20		0,25		0,25		0,25						
1,8	0,68		0,89		1,00		4,2		0,28		0,39		0,50		21		0,25		0,25		0,25						
1,9	0,65		0,86		0,97		4,3		0,28		0,38		0,48		22		0,25		0,25		0,25						
2	0,62		0,83		0,95		4,4		0,27		0,37		0,47		23		0,25		0,25		0,25						
2,1	0,59		0,80		0,92		4,5		0,27		0,36		0,46														
2,2	0,56		0,77		0,89		4,6		0,27		0,35		0,45														
2,3	0,53		0,75		0,87		4,7		0,26		0,34		0,44														



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

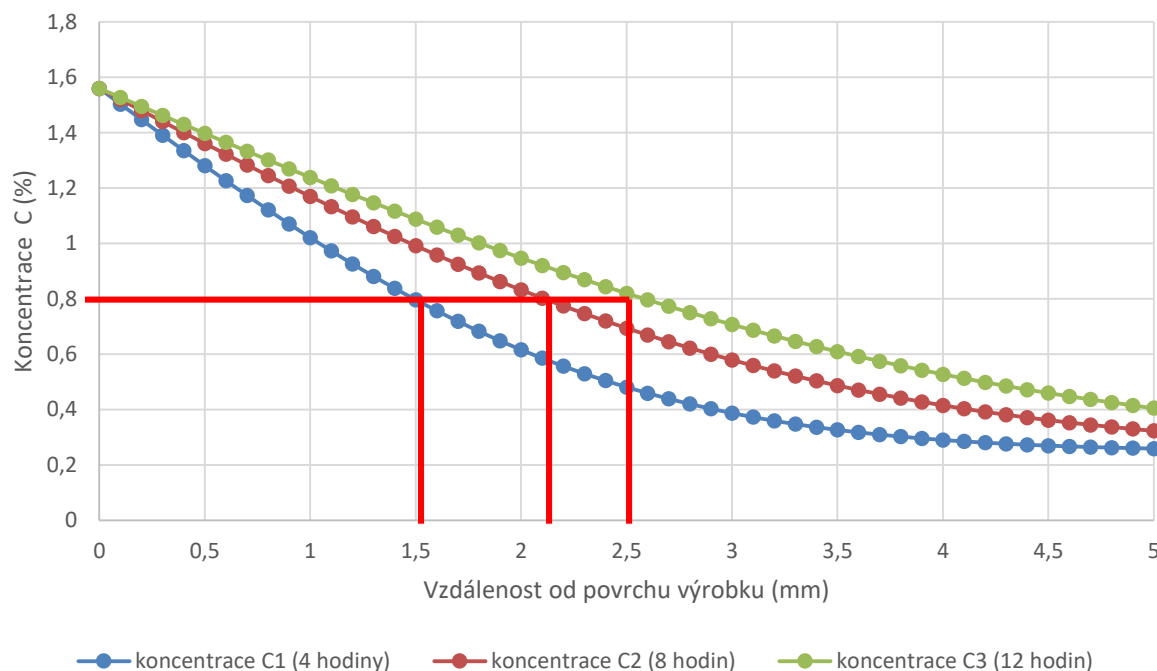
Příklad výpočtu:

Uřčete, průběh koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě ocele, která je cementována při teplotě 1050 °C po dobu 4, 8 a 12 hodin. Počáteční koncentrace uhlíku ocele je 0,25 hm. % C.

Z grafu a tabulky je pak možné odečíst hloubku cementační vrstvy. Při požadavku na obsah uhlíku v této vrstvě $c=0,8$ % pak bude její hloubka dosahovat: $c_1 = 1,5$ (mm); $c_2 = 2,1$ (mm); $c_3 = 2,6$ (mm)

Vzdálenost od povrchu (mm)	koncentrace C_1	koncentrace C_2	koncentrace C_3
0	1,56	1,56	1,56
0,1	1,50	1,52	1,52
0,2	1,45	1,48	1,48
0,3	1,39	1,44	1,44
0,4	1,34	1,40	1,40
0,5	1,28	1,36	1,36
0,6	1,23	1,32	1,32
0,7	1,17	1,28	1,28
0,8	1,12	1,25	1,25
0,9	1,07	1,21	1,21
1	1,02	1,17	1,17
1,1	0,97	1,13	1,13
1,2	0,93	1,10	1,10
1,3	0,88	1,06	1,06
1,4	0,84	1,03	1,03
1,5	0,80	0,99	1,00
1,6	0,76	0,96	0,96
1,7	0,72	0,93	0,93
1,8	0,68	0,89	0,89
1,9	0,65	0,86	0,86
2	0,62	0,83	0,83
2,1	0,59	0,80	0,80
2,2	0,56	0,77	0,77
2,3	0,53	0,75	0,75

Průběh koncentrace uhlíku na povrchu výrobku



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Použité zdroje:

- [1] Váňová, Petra. *Základy tepelného zpracování*. Vysoká škola Báňská- Technická univerzita Ostrava. Ostrava. 2011.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-7204-283-1.
- [3] Jech, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli- Metalografická příručka*. SNTL Praha. Praha. 1977.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY