

ČÁST 2: Teplotní odezva

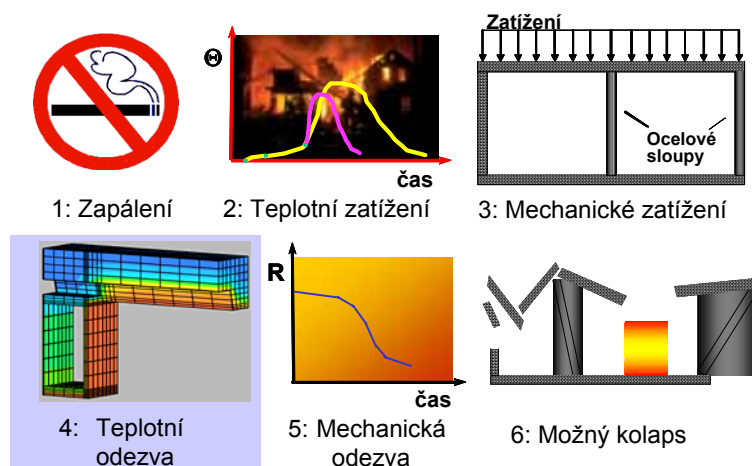
O. Vassart
Arcelor Mittal Long Carbon Europe Research Centre, Luxembourg

J. Chlouba
České vysoké učení technické v Praze, Česká republika

1. ÚVOD

Na konstrukci vystavenou účinkům požáru působí tepelná a mechanická zatížení. Mechanické zatížení je výsledkem zatížení vlastní tíhou a nahodilého zatížení, která působí na konstrukci v době vzniku požáru. Tepelné zatížení je důsledkem nárůstu teploty plynů v požárním úseku a je řízeno předpoklady pro přestup tepla na povrchu jednotlivých prvků konstrukce. Výsledkem tepelného zatížení je nárůst teploty v celé konstrukci, které se nazývá teplotní odezva. Tento jev může vést k teplotnímu protažení a k degradaci mechanických vlastností v těch částech konstrukce, u kterých se důsledkem požáru zvýšila teplota. Podle situace může být teplotnímu protažení zabráněno (nebo jen částečně zabráněno), což vede k napětím způsobeným nárůstem teploty. V kombinaci s mechanickým zatížením pak může docházet k významným deformacím a za jistých okolností může dojít i ke kolapsu celé konstrukce nebo její části. Tento proces se nazývá mechanická odezva.

Zmíněný řetězec událostí je schématicky znázorněn na obr. 1.



Obr. 1: Požární odolnost – řetězec událostí

Požárně inženýrský přístup k příslušným zatížením během požáru je představen v části 1. Mechanická odezva je blíže probrána v části 3. Základním prvkem je část 2, která se zabývá teplotní analýzou. Všechny části se omezují pouze na ocelové a ocelobetonové prvky a navazují na ty části Eurokódu [1], [2], které se týkají požáru.

2. ZÁKLADNÍ VZTAHY A NÁZORNÉ PŘÍKLADY

Přestup tepla do prvku konstrukce se řídí následující diferenciální rovnicí (tzv. Fourierova diferenciální rovnice) v kombinaci s příslušnými okrajovými a počátečními podmínkami:

$$\frac{\partial(\rho c \theta)}{\partial t} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z})}{\partial z} = 0 \quad \dots (1)$$

kde:

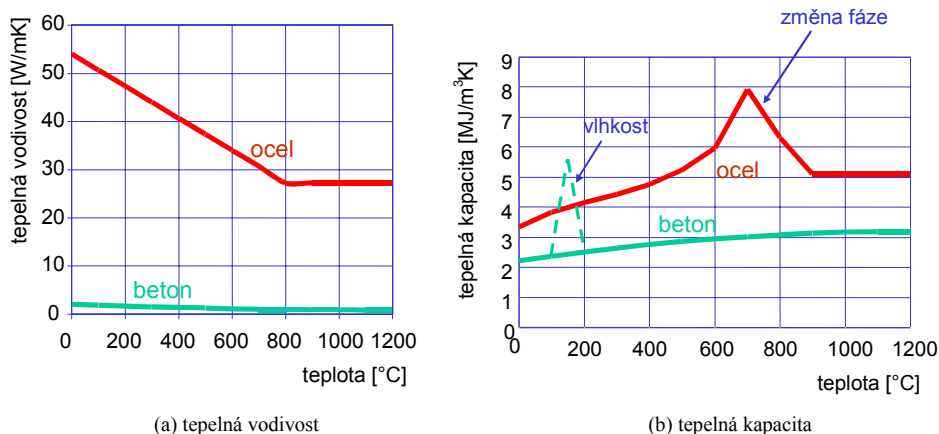
x, y, z	jsou	souřadnice v m
θ		teplota v x, y, z ve °C
ρ		hustota v kg/m ³
c		měrné teplo v J/kgK
λ		tepelná vodivost v W/mK

Stručné vysvětlení této výchozí rovnice je obsaženo v příloze A.

Z rovnice (1) je patrné, že rozvoj teploty v prvcích konstrukce, které jsou vystaveny požáru, je ovlivněn dvěma teplotními vlastnostmi materiálu:

- tepelnou vodivostí
- měrným teplem.

Ve výpočtu se běžně kombinuje měrné teplo s hustotou. Vzniká tak tepelná kapacita a její jednotka je J/m³K. Tepelná vodivost a měrné teplo jsou u většiny stavebních materiálů závislé na teplotě. Tato závislost je zobrazena na obr. 2a,b pro beton a ocel [1], [2].



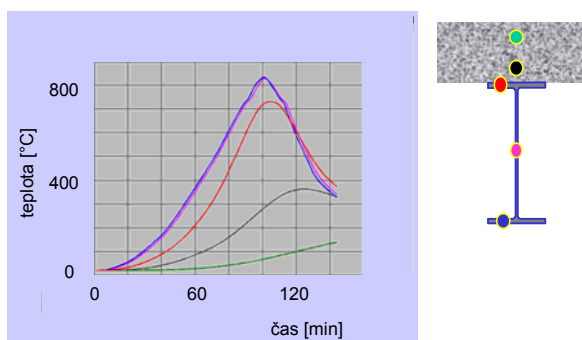
Obr. 2: Tepelné vlastnosti betonu a oceli

Dosažení nejvyšší hodnoty tepelné kapacity oceli při teplotě okolo 730°C je způsobeno změnou fáze v oceli. Výrazný nárůst křivky v grafu pro tepelnou kapacitu betonu je způsoben vypařováním vlhkosti betonu.

Z grafu tepelných vodivostí je patrné, že tepelná vodivost oceli je řádově větší než betonu. Teplotní rozdělení v požárem zasažených ocelových prvcích je z tohoto důvodu mnohem rovnoměrnější než v betonových částech ocelobetonových prvků. Pro zjednodušení se dokonce často předpokládá rovnoměrné rozložení teploty v ocelovém prvku, viz kapitola 3.

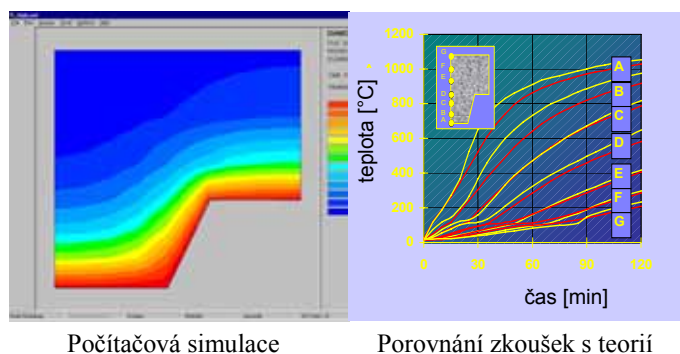
Pokud jsou známy tepelné vlastnosti všech materiálů, ze kterých se prvek konstrukce skládá, může být vypočítán rozvoj teploty v tomto prvku pro dané tepelné zatížení na základě rovnice (1). Analytická řešení jsou k dispozici pouze ve výjimečně jednoduchých případech [3]. V běžných situacích se uplatní numerické metody. V současné době existuje více modelů, viz kapitola 4.

Na obrázku 3, 4 a 5 jsou uvedeny ukázky schopností modelů pro tepelnou odezvu.



Obr. 3: Teplotní odezva: ocelový nosník s betonovou deskou (2D)

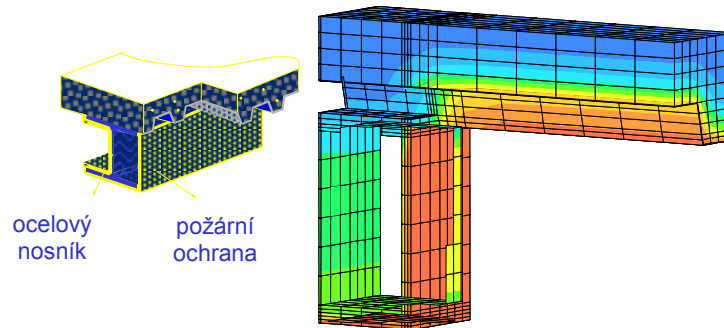
Na obr. 3 je znázorněna teplotní odezva nechráněného ocelového nosníku s betonovou deskou, který je zespodu vystaven přirozenému požáru [4]. Je vidět, že teplota spodní pásnice i stojiny nosníku je téměř shodná. Na druhou stranu teplota horní pásnice je již znatelně nižší. To je způsobeno tepelnou ztrátou na horním povrchu horní pásnice do relativně studenější betonové desky. Ve zjednodušených výpočetních modelech pro ocel podle EN 1993-1-2 lze uvažovat rovnoměrné rozdělení teploty po průřezu, které je odvozeno z teploty spodní části ocelového průřezu. Do výpočtu se zavádí opravný součinitel pro mechanické zatížení κ , který zohledňuje nižší teplotu horní pásnice, více v části 3.



Obr. 4: Rozvoj teploty v ocelobetonové desce (2D)

Na obrázku 4 je vidět výstup z programu DIANA [5]. Na něm je zobrazeno 2D teplotní rozdělení v betonové desce s profilovaným plechem po 120 minutách působení normového požáru. Vypočítaná teplotní pole jsou dále porovnávána s výsledky zkoušek. Při tom se ukázala dobrá shoda mezi zkouškou a teorií, zvláště pak v kritických oblastech, které jsou v horních částech žebel, na obrázku 4 vpravo výsledky pro úroveň D. Je

dobře patrné, že teplotní rozdělení je velmi nerovnoměrné. To je důsledek relativně malé hodnoty tepelné vodivosti betonu.



Obr. 5: Teplotní odezva ocelobetonového krajního nosníku (3D)

Na obrázku 5 je zobrazena 3D teplotní odezva krajního ocelobetonového nosníku. Ocelový profil je na jedné straně chráněn truhlíkovým obkladem a z druhé strany je opatřen ochranou po obvodě průřezu nosníku. Výpočet ve 3D, jehož výsledek tu je zobrazen, je poměrně těžkopádný a při praktickém navrhování se příliš často nepoužívá. Cílem tohoto obrázku je pouze ukázat možnosti výpočetních nástrojů, které jsou v současnosti k dispozici.

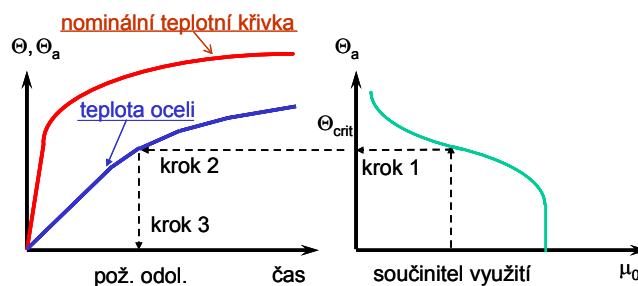
3 PRAVIDLA VÝPOČTU PRO OCELOVÉ PRVKY

3.1 Úvod

Hlavním cílem analýzy teplotní odezvy ocelové konstrukce je zjištění požární odolnosti. Vzhledem k tomu, že ocelové prvky zpravidla nemívají dělicí funkci, přichází v úvahu jedině kritérium požární odolnosti týkající se únosnosti. V normě EN 1993-1-2 jsou dány dvě možnosti pro výpočet chování ocelové konstrukce za požáru¹:

- zjednodušené výpočetní modely;
- pokročilé výpočetní modely.

Teplotní odezva v pokročilých modelech je založena na rovnici (1) v kombinaci s příslušným požárním zatížením. Takové modely jsou obecně platné. Základním předpokladem zjednodušených modelů je, že rozdělení teploty po průřezu je rovnoměrné. Tento předpoklad je zhruba pravdivý vzhledem k tomu, že má ocel vysokou hodnotu tepelné vodivosti. Více o tomto je v předchozí kapitole. Za podmínky rovnoměrného rozložení teploty po průřezu může být výpočet požární odolnosti schématicky zobrazen tak, jak je uvedeno na obrázku 6.



Obr. 6: Postup výpočtu požární odolnosti ocelových prvků na základě zjednodušených výpočetních metod

Provádí se následující kroky:

- Krok 1: určení kritické teploty oceli (tzn. teploty, při které dochází ke kolapsu); tato teplota závisí na poměru skutečně působícího zatížení ku únosnosti posuzovaného prvku za běžné teploty a je výsledkem analýzy mechanické odezvy, o které pojednává Část 3.
- Krok 2: určení rozvoje teploty v ocelovém průřezu; tento rozvoj je výsledkem analýzy teplotní odezvy ocelového prvku, které se věnuje tato část sylabu.
- Krok 3: určení požární odolnosti ocelových prvků; tento krok je kombinací kroku 1 a 2.

Dále je rozebrán druhý krok. Za předpokladu nekonečně vysoké hodnoty vodivosti oceli je možné uvažovat rovnoměrné rozložení teploty v oceli a rovnice (1) se zkrátí na (viz příloha B):

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{A_m/V}{\rho_a c_a} \cdot \dot{h}_{net,tot} \quad \dots (2)$$

kde:

θ_a	je	teplota oceli ve °C (předpokládá se, že je rovnoměrná)
t		čas v s
ρ_a		hustota oceli v kg/m ³
c_a		měrné teplo v J/kg
$\dot{h}_{net,tot}$		celkový čistý tepelný tok na jednotku plochy ve W/m ²
A_m		plocha povrchu ocelového prvku vystavená požáru v m ² /m ³
V		objem ocelového prvku v m ³ /m ³

Na pravé straně rovnice (2) jsou použity tyto členy:

- člen " $\dot{h}_{net,tot}$ " vyjadřuje čistý tepelný tok a závisí na příslušném modelu požáru (nominální teplotní křivka, křivka uhlovodíkového hoření, přírodní požár) a na ochraně (je-li nějaká) ocelového prvku (viz také Část 1)
- člen " $\rho_a c_a$ " představuje vliv tepelných vlastností oceli
- člen " A_m/V " představuje vliv geometrie ocelového profilu a způsob, jakým je vystaven působení požáru (působení požáru ze všech stran, ze tří stran, atd.); tento člen se nazývá „součinitel průřezu“.

Rovnice (2) je základním vztahem pro výpočet rozvoje teploty v oceli. Tato rovnice je určena pro jednoduchý výpočetní model v té části Eurokódu, která se zabývá požárním návrhem ocelových konstrukcí [1] a může být vyřešena pouze tehdy, jsou-li známé okrajové podmínky. Běžně používanou počáteční podmínkou je předpoklad, že před vypuknutím požáru je pokojová teplota 20°C. Okrajové podmínky jsou určeny celkovým čistým tepelným tokem (=tepelné zatížení) z plamenů do ocelového prvku. Tepelný tok je způsoben sáláním a prouděním. Několik základních rovnic je na obrázku 7. Více je také v části 1.

➤ přenos tepla sáláním: $\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \sigma \cdot [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4]$

➤ přenos tepla prouděním: $\dot{h}_{net,c} = \alpha_m \cdot (\Theta_g - \Theta_m)$

kde:

Θ_r je teplota sálání [°C] $\Rightarrow \Theta_{rad} \rightarrow \Theta_g \rightarrow$ požární křivka

Θ_m je teplota povrchu [°C] \Rightarrow teplotní odezva

ε_m je emisivita povrchu [-] \Rightarrow ocel: 0,7

α_c je souč. přestupu tepla prouděním $\Rightarrow 25 - 50 \text{ W/m}^2\text{K}$
(v závislosti na modelu požáru)

Φ je polohový faktor [-] $\leq 1,0 \Rightarrow$ konzervativně: 1,0

σ je Stephan-Boltzmannova konstanta = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

Obr. 7: Přestup tepla na straně vystavené požáru

Platí následující poznámky:

Přenos tepla sáláním popisuje Stephan-Boltzmannův zákon o sálání. Podle tohoto zákona určuje „teplota sálání z plamenů“ maximální sálání do ocelového prvku [3]. Konzervativně může být tato teplota brána jako teplota plynu a tak může být určena na základě modelu požáru. Více v části 1. To je základem rovnice pro čistý přenos tepla sáláním uvedené v EN 1993-1-2 [1]. V této rovnici hrají roli následující fyzikální veličiny:

- Stephan-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$): fyzikální konstanta
- emisivita povrchu prvku (ε_m): závisí na povrchovém materiálu
- polohový faktor Φ : geometrická konstanta ≤ 1 ; pro většinu případů v praxi (např. simulace zkoušek nominální teplotní křivkou) může být brán roven jedné ².

Pozn.: Hodnota teploty povrchu θ_m pro určitý časový krok určuje na základě teploty v předchozím časovém kroku vyřešením rovnice (1).

Čistý přenos tepla prouděním může být přibližně uvažován jako rozdíl teplot ($\theta_g - \theta_m$) a je charakterizován součinitelem přestupu tepla prouděním α_c . V praxi se pohybuje od 25 (nominální požár) do 50 $\text{W/m}^2\text{K}$ (uhlovodíkové hoření) ³. Viz také [7]. Některé praktické důsledky těchto vztahů budou dále probrány pro nechráněné a chráněné ocelové průřezy.

3.2 Nechráněná ocelová konstrukce

Výpočetní postupy pro rozvoj teploty v nechráněné ocelové konstrukci, které jsou uvedeny v ENV verzi EN 1993-1-2, jsou založeny na smluvních hodnotách koeficientů pro přenos tepla sáláním a vedením [8]. Tyto hodnoty jsou vybrány tak, aby bylo dosaženo přijatelné shody s výsledky zkoušek. Na jejich základě pak dochází k předpokladům, které nejsou z fyzikálního hlediska příliš přesvědčivé. Toto platí zvláště pro přenos tepla sáláním. Hodnota výsledné emisivity 0,5 ($= \varepsilon_f \cdot \varepsilon_m$) ⁴ je nutná z toho důvodu, aby bylo dosaženo rozumné shody s výsledky zkoušek. Tento problém se stal ještě více zřejmý poté, co byl představen tzv. deskový teploměr (místo běžných termočlánků), který je vhodným měřicím zařízením pro kontrolu teploty plynu při zkoušení požární odolnosti podle normových teplotních křivek [1], [9].

² V případě vystavení ocelového prvku lokálnímu požáru se uvažuje $\Phi < 1$.

³ Pro přirozený požár se uvažuje $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$.

⁴ Emisivita plamenů se značí ε_f .

Za účelem získání realističtějších a úplnějších výpočetních postupů pro výpočet rozvoje teploty v nechráněných ocelových prvcích a také kvůli zachování shody s budoucí praxí zkoušení požární odolnosti podle normových teplotních křivek byly v EN 1993-1-2 určeny reálné hodnoty koeficientů emisivity: pro povrchovou emisivitu oceli (ϵ_a) 0,7 (což je nízká, přesto stále realistická hodnota) a emisivitu plamenů (ϵ_f) 1,0 (jako přímý důsledek používání deskového teploměru pro kontrolu teploty plynu v peci [9]).

Efekt navýšení hodnot vypočítaných teplot těmito změnami je převážně vykompenzován tím, že se bere v úvahu tzv. vliv zastínění, který není výslovně brán v úvahu v postupu podle ENV. Pokud uvažujeme prvek, který je celý obklopený požárem, jako v případě zjednodušených výpočetních modelů, je efekt zastínění způsoben místním zakrytím proti sálání díky tvaru ocelového profilu. To hraje roli pro průřezy, které mají konkávní tvar, jako např. I-profilu. Pro průřezy konvexního tvaru, jako jsou trubky, vliv zastínění neexistuje (nedochází k lokálnímu zastínění).

Přírůstek teploty $\Delta\theta_{a,t}$ v nechráněném ocelovém prvku za časový úsek Δt může být určen podle vztahu:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \dot{h}_{net,d} \Delta t \quad \dots (3)$$

kde:

k_{sh} je součinitel zastínění

$\dot{h}_{net,d}$ je návrhová hodnota čistého tepelného toku na jednotku plochy vypočítaná pro nechráněnou ocel, tzn. za použití $\epsilon_a = 0,7$ a $\epsilon_{fi} = 1,0$ [W/m^2].

Oproti ENV verzi EC3-1-2 se v tomto vztahu nově objevuje opravný součinitel k_{sh} zohledňující zastínění⁵. Lze prokázat, že pro I-profilu při zatížení podle nominální teplotní křivky je vliv zastínění zahrnut do výpočtu pomocí rovnice: [9]

$$k_{sh} = 0,9 [A_m/V]_{box} / [A_m/V] \quad \dots (4^a)$$

kde

$[A_m/V]_{box}$ je součinitel průřezu pro povrch obdélníka opsaného průřezu⁶

V ostatních případech se má hodnota k_{sh} uvažovat jako:

$$k_{sh} = [A_m/V]_{box} / [A_m/V] \quad \dots (4^b)$$

Z předchozích vztahů definujících k_{sh} vyplývá, že pro trubkové průřezy se vliv zastínění neuvažuje, protože $[A_m/V] = [A_m/V]_{box}$

Na obrázku 8 je souhrn základních rovnic pro nárůst teploty v nechráněných ocelových prvcích.

⁵ Součinitel zastínění nerozlišuje mezi tepelným tokem vlivem sálání a vlivem proudění. Je zřejmé, že přenos tepla prouděním je méně ovlivněn vlivem zastínění než přenos tepla sáláním. Tento fakt je zanedbán, protože vedení tepla hraje pouze malou roli za požáru.

⁶ Součinitel průřezu pro povrch obdélníka opsaného průřezu je definován jako poměr požárem zasaženého povrchu tělesa obalujícího průřez ku celkovému objemu oceli.

$$\frac{d\Theta_a}{dt} = k_{sh} \frac{A_m/V}{\rho_a c_a} \cdot \dot{i}_{met,tot} \quad \dots (1)$$

$$\Delta\Theta_a = k_{sh} \frac{K_{bare}}{\rho_a c_a} \cdot \frac{A_m}{V} \cdot (\Theta_g - \Theta_a) \cdot \Delta t \quad \dots (2)$$

Legenda:

$\Delta\Theta_a$: přírůstek teploty
 Δt : časový interval
 A_m/V : součinitel průřezu
 K_{bare} : souč. přestupu tepla
 k_{sh} : opravný součinitel zastínění

kde

$$K_{bare} = \alpha_c + \frac{\varepsilon_m \sigma [(\Theta_g + 273)^4 - (\Theta_a + 273)^4]}{\Theta_g - \Theta_a} \quad \dots (3)$$

Obr. 8: Přírůstek teploty v nechráněné oceli

3.3 Chráněná ocelová konstrukce

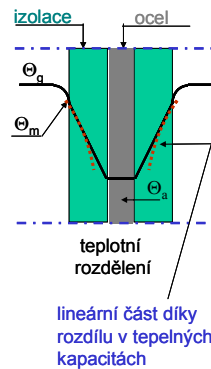
Rovnice pro výpočet rozvoje teploty v požárně chráněné ocelové konstrukci je podobná rovnici (3). V tomto případě však při výpočtu čistého tepelného toku musí být brán v úvahu vliv izolace. Ve skutečnosti je teplotní rozdíl mezi okraji izolace poměrně velký. Důsledkem toho je, že teplota povrchu izolace se blíží teplotě plynu. Proto je efekt přenosu tepla sáláním velmi malý a běžně ho lze zanedbat. To znamená, že vliv zastínění také nehraje velkou roli a proto není třeba zavádět do výpočtu opravný součinitel zastínění k_{sh} tak, jak tomu bylo pro nechráněné ocelové průřezy, viz také [1]. Na obrázku 9. jsou uvedeny základní rovnice pro chráněné ocelové průřezy a také výše popsany princip. Tak jako pro nechráněnou ocel může i zde být definován součinitel pro celkový přenos tepla K_{ins} , který závisí na tloušťce tepelné izolace (d_p), na tepelných vlastnostech oceli (ρ_a, c_a) a také na tepelných vlastnostech tepelné izolace (λ_p, ρ_p, c_p). Viz také [1], kde jsou rovnice uvedeny včetně výše zmíněných vlivů. Na obrázku 9 je také naznačeno, že pokud je tepelná izolace malá v porovnání s tepelnou kapacitou oceli, může být K_{ins} bráno přibližně jako $K_{ins} \approx \lambda_p/d_p$ a díky tomu může být teplotní rozdělení po tloušťce izolace bráno jako lineární. To je také naznačeno na obrázku 9. Součinitel průřezu pro chráněné ocelové prvky je označován jako A_p/V . Více v kapitole 3.4.

$$\Delta\Theta_a = \frac{K_{ins}}{\rho_a c_a} \cdot \frac{A_m}{V} \cdot (\Theta_g - \Theta_a) \cdot \Delta t \quad \dots (a)$$

kde

$$K_{ins} = K_{ins} \left(\frac{\lambda}{d}, \rho_p, c_p, \rho_a, c_a \right) \quad \dots (b)$$

Pozn.: (a) $\Theta_g - \Theta_m \ll \Theta_m - \Theta_a$
 (b) pro lehkou izolaci:
 $K_{ins} \approx \lambda/d$



Obr. 9: Základní rovnice pro přírůstek teploty v chráněných prvcích

3.4 Návrhové parametry pro rozvoj teploty

3.4.1 Obecně

Rozvoj teploty v oceli závisí při daných požárních podmínkách na těchto návrhových parametrech:

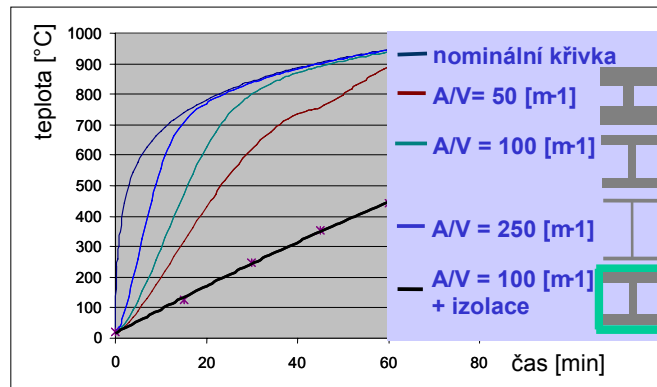
- součinitel průřezu A_m/V , A_p/V (pro nechráněné resp. chráněné ocelové prvky)
- vlastnosti izolace d_p , λ_p , ρ_p , c_p (pouze pro chráněné prvky).

Dále bude každý parametr stručně popsán. Hlavní důraz je kladen na podmínky normového požáru, protože se v praxi takovéto podmínky nejčastěji používají. Výklad bude doplněn poznámkami ohledně možného použití koncepce odolnosti vůči přirozenému požáru (Natural Fire Safety Concept) pro nechráněné i chráněné ocelové prvky, viz kapitola 3.4.4.

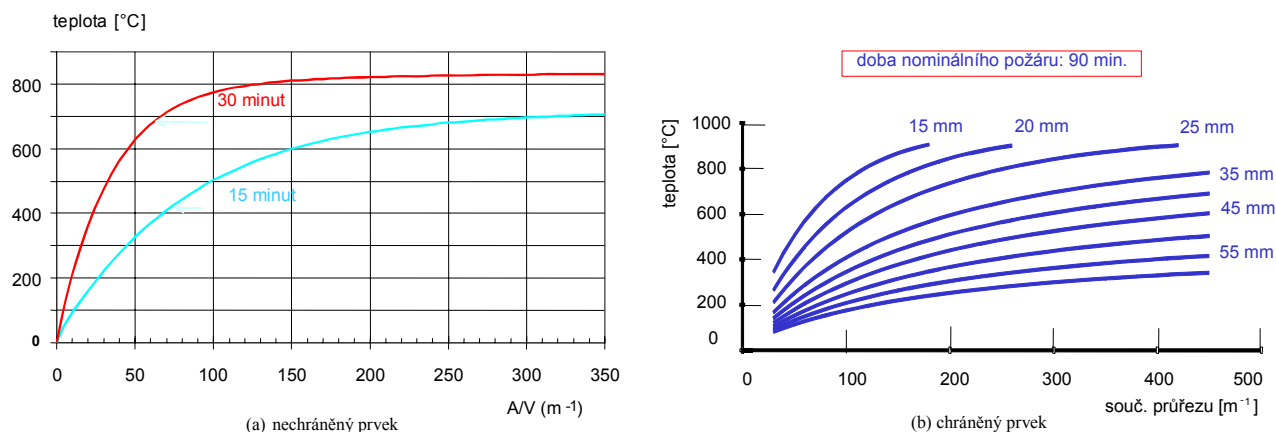
3.4.2 Vliv a určení součinitele průřezu

Na obrázku 10 je zobrazen vliv součinitele průřezu na rozvoj teploty v nechráněném ocelovém průřezu během tepelného zatížení podle normové teplotní křivky. Je zde použit reálný rozsah součinitele průřezu, tj. mezi 50 a 400 m^{-1} . Pro součinitel průřezu 100 m^{-1} je uveden i možný vliv požární izolace.

Podobné údaje, i když více zobecněné, jsou uvedeny na obrázku 11a,b. Obrázek 11a se týká nechráněného ocelového prvku. Jednotlivé křivky vyjadřují určitou požární odolnost při nominálním normovém požáru. obrázku 11b se týká ocelového prvku opatřeného izolačním systémem a vystaveného nominálnímu požáru po dobu 90 min. Jednotlivé křivky vyjadřují určitou tloušťku požární ochrany. Jak vyplývá z těchto obrázků, součinitel průřezu má podstatný vliv na rozvoj teploty v ocelovém prvku, zvláště pro nízké hodnoty součinitele průřezu a pro malé tloušťky požární izolace.



Obr. 10: Rozvoj teploty ocelového profilu v čase

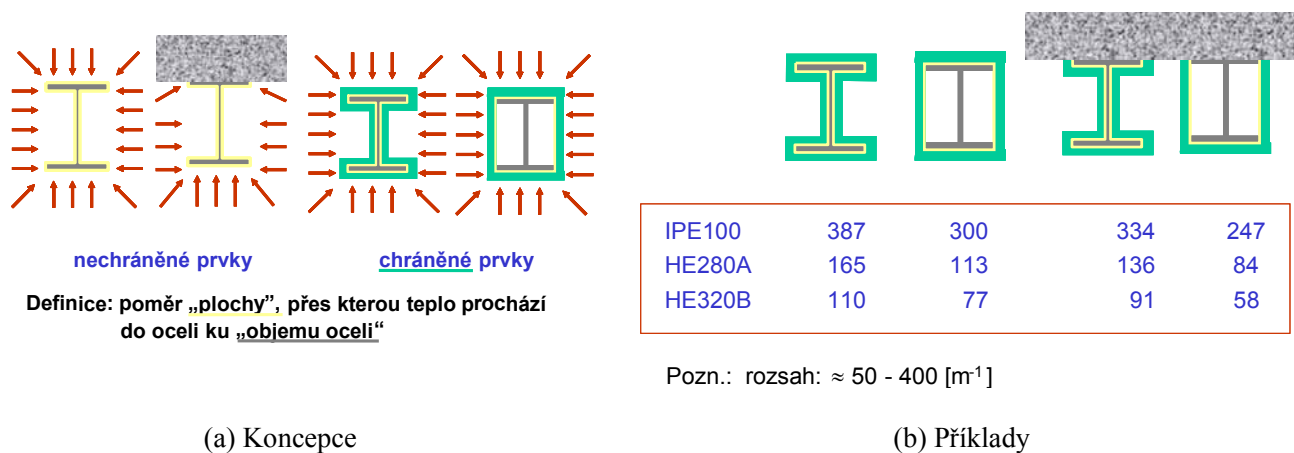


Obr. 11: Teploty oceli v závislosti na součiniteli průřezu

Jak již bylo zmíněno dříve, součinitel průřezu je definován jako poměr plochy, přes kterou teplo prochází do oceli ku objemu oceli. Navíc se aplikují následující (smluvní) pravidla:

- při truhlíkovém zakrytí se bere obvod oceli roven obvodu zakrývajícího obkladu
- u ocelových profilů s betonovou deskou se zanedbává výměna tepla mezi ocelí a betonem.

Tato koncepce je zobrazena na obrázku 12. Obrázek je doplněn také o několik číselných příkladů. Více informací lze nalézt v [1].



Pozn.: rozsah: $\approx 50 - 400 \text{ [m}^{-1}\text{]}$

Obr. 12: Součinitel průřezu pro ocelové profily

3.4.3 Vlastnosti požární izolace na ocelové konstrukci

V kapitole 3.4.1 byly zmíněny následující vlastnosti požární izolace:

- tepelná vodivost λ_p
- měrné teplo c_p
- objemová hmotnost ρ_p
- tloušťka d_p

První tři vlastnosti jsou fyzikálními vlastnostmi. Je třeba si uvědomit, že jejich hodnoty závisí na změnách, ke kterým dochází v izolaci během požáru, jako např. praskání, odlupávání, přesun vlhkosti, atd. Toto platí zvláště pro tepelnou vodivost. Navíc tepelná vodivost většiny materiálů, které se používají jako požární izolace, s rostoucí teplotou výrazně roste. Z tohoto důvodu by tabulkové hodnoty λ_p za běžné teploty neměly být použity pro návrh za požáru.

Pro určení tepelné vodivosti byl vyvinut podrobný polo-empirický přístup [10]. V tomto postupu jsou použity dva různé typy zkoušek:

- (a) zkoušky na zatížených a nezatížených nosnících
- (b) zkoušky na nezatížených krátkých sloupech.

ad. (a): Cílem těchto zkoušek je prokázat, zda izolační systém „zůstane souvislý a soudržný s povrchem oceli během příslušné doby vystavení požáru“⁷ tak, jak je požadováno v odstavci 3.4 v [1]. Za tímto účelem byly vystaveny dva páry nosníků o stejných průřezích podmínkám nominálního požáru ve zkušební peci. Jeden pár nosníků byl opatřen maximální používanou tloušťkou požární izolace, druhý pár jen minimální možnou tloušťkou izolace. V každém páru byl jeden nosník zatížen a druhý byl bez zatížení. Předpokládalo se, že rozdíly v teplotních odezvách mezi zatíženým a nezatíženým nosníkem jsou způsobeny deformací, která byla vyvolána namáháním zatíženého nosníku. Pro započítání takovýchto vlivů byly zavedeny opravné součinitele.

ad. (b): Cílem těchto zkoušek (běžně označované jako „výzkumné zkoušky“) je nalézt takové hodnoty tepelné vodivosti, které jsou typické pro dané požární podmínky. K tomuto účelu bylo 10 nezatížených krátkých (typicky 1 m dlouhých) sloupů vystaveno nominálnímu požáru. Tloušťky izolace a součinitele průřezu byly systematicky měněny. U případů, kde bylo potřeba upravit naměřené teploty oceli, bylo toto provedeno na základě výsledků získaných ze zkoušek nosníků. Měřené teploty oceli byly, kde bylo třeba, opraveny na základě zkoušek na nosnících. Podle výsledků byly vytvořeny návrhové grafy, např. ten na obrázku 11b, ale používají se i jiná uspořádání těchto výsledků. Jsou k dispozici výpočetní programy, pomocí nichž může být taková analýza provedena, ale také programy, které mohou získané informace využít pro účely požárního návrhu.

Na obrázku 13a,b jsou fotografie zatíženého nosníku před a po požární zkoušce. Jsou patrné významné deformace, které mohou vést k porušení soudržnosti izolace.



(a) před požární zkouškou



(b) po požární zkoušce

Obr. 13: Deformace zatíženého nosníku způsobená vlivem požáru

⁷ Toto se obecně nazývá „soudržnost“.

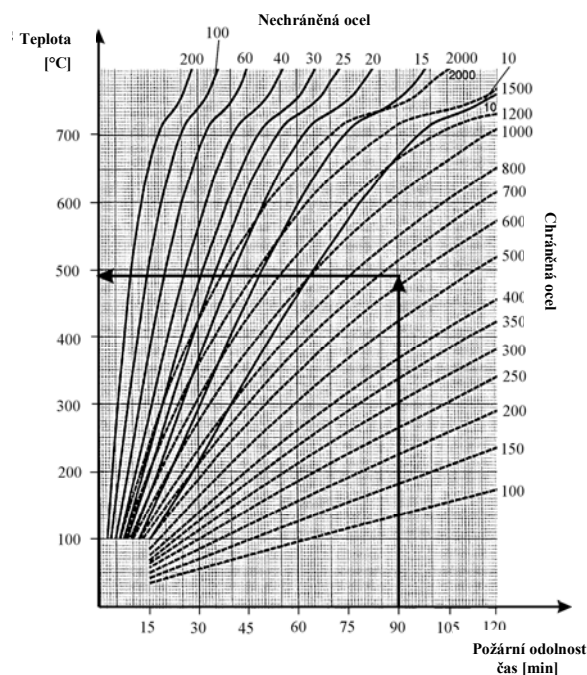
Tento postup zkoušení se používá pro takové izolační systémy, které se používají pro ocelové prvky. Ty jsou na trhu k dostání v několika různých formách:

- nástřiky
- desky
- zpěňující nátěry.

Dalším typem ochranných prostředků jsou clony. Mohou být použity buď svisle (jako ochrana spojovacích prostředků dělicích prvků) nebo vodorovně (jako stropní prvky, které mají ochránit ocelové nosníky ve stropních nebo střešních konstrukcích). Jsou k dispozici evropské normy, které na základě podobných principů, které byly popsány výše, stanovují vliv těchto ochranných systémů na celkovou požární odolnost ocelové konstrukce [11], [12]. Tyto normy jsou však mimo rozsah tohoto sylabu.

Jak bylo zmíněno výše, je vhodné používat takové hodnoty charakteristik izolací, které byly získány z požárních experimentů pro jednotlivé teploty. Někdy je potřeba mít k dispozici rychlý a jednoduchý odhad nárůstu teploty v ocelové konstrukci, která je vystavena požáru. Za tímto účelem vyvinulo Evropské sdružení výrobců ocelových konstrukcí (European Convention for Constructional Steelwork - ECCS) nomogramy [13]. Jeden takový nomogram je pro ilustraci uveden na obrázku 14. Pro daný čas působení nominálního požáru může být nalezena teplota nechráněného ocelového prvku v závislosti na součiniteli průřezu A_m/V . Pro chráněný prvek je použit následující součinitel jako vstupní parametr (viz také obrázek 9): $(\lambda_p/d_p) \cdot (A_p/V)$.

Pozn.: Nomogram [13] byl určen na základě ENV verze EC3-1-2 a pro EN 1993-1-2 lze použít pouze orientačně.



Obr. 14: Nomogram na odhad přestupu tepla do konstrukce podle [13]

3.4.4 Použití podmínek nenormového požáru

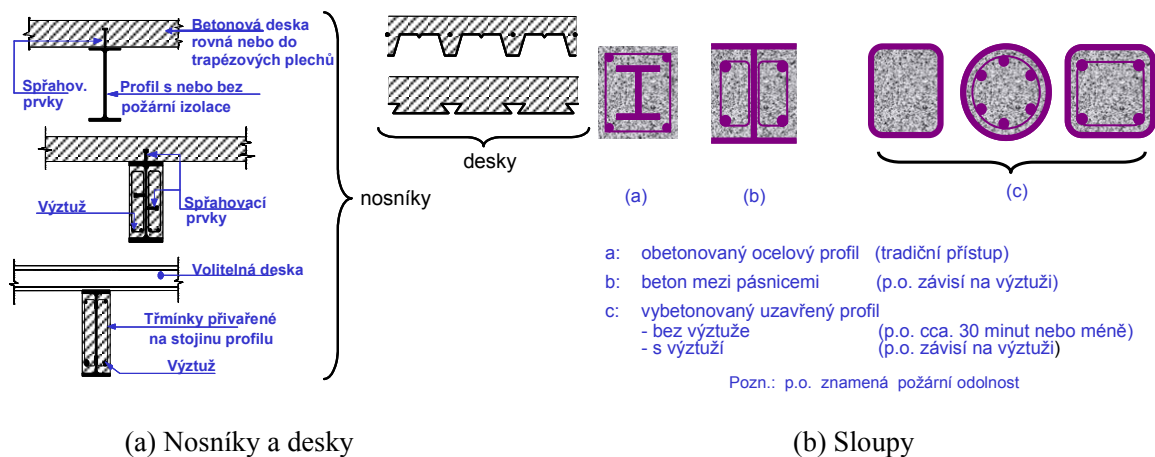
V části 1 byl hlavní důraz na přístup, který vycházel z koncepce odolnosti prvku vůči přirozenému požáru. Takový přístup může být použit přímo na nechráněnou konstrukci, protože teplotní (a mechanické) vlastnosti

oceli jsou platné také při podmínkách nenormového požáru. To však neplatí pro vlastnosti charakterizující izolační systémy, které se používají pro ochranu ocelové konstrukce. Jak bylo vysvětleno v předchozí části, takové charakteristiky jsou určeny na základě získaných výsledků ze zkoušek s nominální teplotní křivkou. Stručně řečeno jejich hodnoty jsou známy jen pro konkrétní podmínky požáru. Nejsou k dispozici žádné postupy, pomocí kterých bychom mohli tyto hodnoty upravit na libovolný požár, který se výrazně liší od nominální požáru. S použitím koncepce odolnosti vůči přirozenému požáru pro návrh chráněných ocelových konstrukcí by proto mělo být zacházeno s jistou opatrností. Na druhou stranu je však nutné si uvědomit, že současné teplotní charakteristiky jsou přijímány bez jakéhokoliv ohledu na to, že ve skutečnosti se podmínky při přirozeném požáru mohou velmi lišit od těch normových. Z tohoto důvodu lze obhajovat použití těchto charakteristik také při koncepci odolnosti vůči přirozenému požáru.

4. VÝPOČETNÍ POSTUP PRO OCELOBETONOVÉ PRVKY

4.1 Úvod

EN 1994-1-2 pokrývá širokou škálu ocelobetonových prvků. Přehled je na obrázku 15.



Obr. 15: Varianty ocelobetonových prvků podle EN 1994-1-2

V závislosti na jejich povaze mohou mít ocelobetonové prvky nosnou anebo dělicí funkci. Proto se jich mohou týkat všechna tři kritéria požární odolnosti:

- únosnost za požáru
- izolace
- celistvost⁸.

Beton je nedílnou součástí průřezu jakéhokoliv ocelobetonového prvku. Předpoklad rovnoměrného rozdělení teploty po průřezu (jako v případě zjednodušených modelů pro ocelové prvky) je pro ocelobetonové prvky nereálné. Nerovnoměrné rozdělení teploty komplikuje postup výpočtu. Proto jsou v EN 1994-1-2 popsány nejen možnosti použití zjednodušených a pokročilých modelů (stejně jako pro ocel), ale také tabulkové hodnoty [2].

Analýza teplotní odezvy ocelobetonového prvku na základě tabulkových hodnot nebude v tomto sylabu probírána. Důvodem je to, že u tabulkových hodnot únosností nejsou uvedeny předpoklady ohledně teplotní

⁸ Pro ověření kritéria celistvosti zatím neexistuje žádný výpočetní model a toto kritérium je tudíž mimo rozsah tohoto kurzu. Pro možná řešení splnění kritéria celistvosti viz [2].

odezvy. Uváděné údaje jsou převážně založeny na zkušenostech ze zkoušek s nominální teplotní křivkou. Co se týká tabulkových hodnot pro izolaci, pro nosníky s nadbetonovanou deskou konstantní tloušťky (tzv. rovné desky) se odvolává na obecně uznávaná pravidla pro rovné betonové desky. Pro desky s trapézovými plechy nejsou uvedeny žádné hodnoty.

U zjednodušených výpočetních modelů je teplotní odezva často – ale ne vždy – založena na pokročilém modelu pro přestup tepla, který byl vysvětlen v kapitole 2. V zásadě jsou používány tři možnosti:

- zjednodušený výpočetní model je založen na polo-empirických pravidlech, které jsou založeny na smluvních předpokladech; tímto přístupem se lze řídit např. u ocelobetonových sloupů s betonem mezi pásnicemi (viz obrázek 15b)
- výsledky z metodických výpočtů založených na pokročilém modelu se používají v parametrické studii za účelem dosažení zjednodušených výpočetních postupů; tento přístup se používá pro ocelobetonové desky (viz obrázek 15a)
- pokročilý model jako takový se používá u zjednodušeného modelu (který tak přestává být zjednodušený) a zjednodušení se týká mechanické odezvy; tento přístup se používá pro uzavřené průřezy sloupů vyplněné betonem (viz obrázek 15c)

Přehled různých možností dostupných v EN 1994-1-2 včetně tabulkových hodnot a analýzy odezvy u zjednodušených modelů je uveden v Příloze C.

Základem pro pokročilé modely teplotní odezvy je (a má být!) rovnice pro přestup tepla, jak bylo popsáno v kapitole 2. Na obrázku 3, obrázku 4 a obrázku 5 jsou uvedeny příklady. Postupy potřebné pro vyřešení této rovnice pro ocelobetonové prvky jsou podobné těm postupům, které se používají pro beton a ocel při použití pokročilých modelů pro teplotní odezvu.

V dalších částech budou probrány příklady výše zmíněných principů:

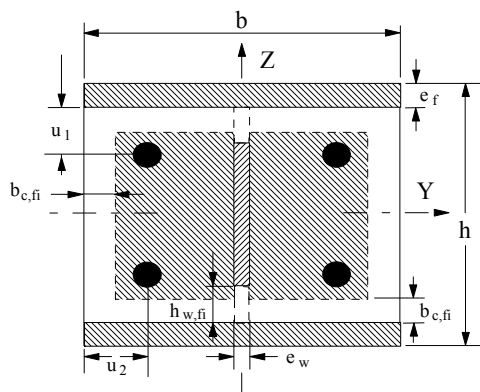
- výpočetní postupy pro teplotní odezvu ocelobetonových sloupů s částečně obetonovanými ocelovými průřezy (tj. ocelové sloupy s betonem mezi pásnicemi)
- zjednodušené výpočetní postupy pro ověření kriteria teplotní izolace betonových desek s trapézovými plechy
- zjednodušené výpočetní postupy pro stanovení teploty výztuže v oblasti kladných momentů u betonových desek s trapézovými plechy
- použití pokročilého modelu pro teplotní odezvu při „zjednodušeném“ modelu pro výpočet požární odolnosti betonem vyplněných sloupů uzavřených průřezů.

4.2 *Výpočet teplotní odezvy ocelobetonových sloupů s částečně obetonovanými ocelovými průřezy*

K výpočtu teplotní odezvy ocelobetonového sloupu s částečně obetonovaným ocelovým průřezem je třeba rozdělit průřez na čtyři části:

- pásnice ocelového profilu
- stojina ocelového profilu
- beton obsažený v ocelovém profilu
- výztuž.

Pro každou část průřezu je vyčíslena redukovaná únosnost a tuhost (v závislosti na průměrné teplotě). Pro beton a stojinu ocelového profilu se počítá s redukovaným průřezem, viz obrázku 16.



Obr. 16: Redukovaný průřez ocelobetonového sloupu s částečným obetonováním

Zjednodušené výpočetní postupy platí pouze pro nominální požár a pouze tehdy, je-li průřez vystaven požáru ze čtyř stran.

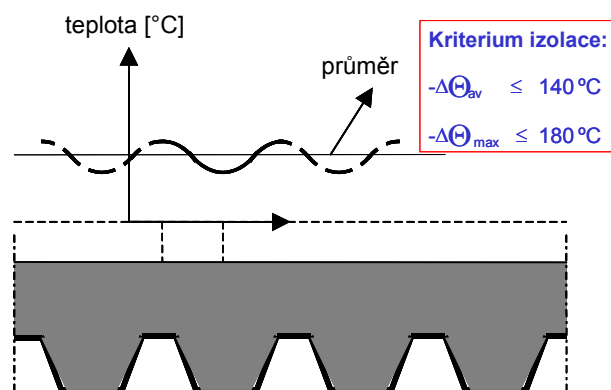
Průměrná teplota a redukce betonového průřezu závisí na čase vystavení nominálnímu požáru (tj. 30, 60, 90 a 120 min) a na geometrii průřezu, která je patrná z obrázku 16. Geometrie průřezu je popsána součinitelem průřezu:

$$A_m / V = \frac{2(b+h)}{b \cdot h} \quad \dots (5)$$

Potřebné vztahy jsou polo-empirické povahy a jsou odvozeny ze zkoušek při nominálním požáru. Pro podrobnější přehled, viz [2]. Nějaké podklady jsou prezentovány také v [20].

4.3 Výpočetní postupy pro ověření kritéria teplotní izolace betonových desek s trapézovými plechy

U zjednodušených výpočetních modelů je kritérium pro teplotní izolaci totožné kritériu, které se používá při zkoušení podle nominální teplotní křivky, tj.: nárůst teploty na straně nevystavené požáru nesmí být v průměru vyšší než 140 °C nebo nesmí v žádném bodě přesáhnout 180°C [14]. Ani jedno z těchto dvou kritérií nesmí být překročeno. V případě ocelobetonové desky s trapézovým plechem se teplota na straně nevystavené požáru liší podle polohy měřícího bodu, což je způsobeno vlnitým tvarem průřezu plechu. Viz obrázek 17.



Obr. 17: Typické teplotní rozdělení u desky na straně nevystavené požáru

U zjednodušených výpočetních modelů pro posouzení kritéria izolace je tento efekt brán v úvahu. Za tímto účelem byly provedeny podrobné výpočty teplotní odezvy ocelových záklopů z profilovaných plechů dostupných v současnosti v Evropě. Mezi nimi byly jak klasické trapézové plechy, tak samosvorné plechy. Přehled je uveden v tabulce 1.

Tab. 1: Teplotní výpočty s profilovanými plechy, které jsou v současnosti dostupné

Typ plechu	Tloušťka desky H_B [mm]	Typ betonu
Samosvorný (6x)	50, 60, 70, 80,	Normální a lehčený
Trapézový (49x)	90, 100, 110, 120	Podle EN1994-1-2:2005

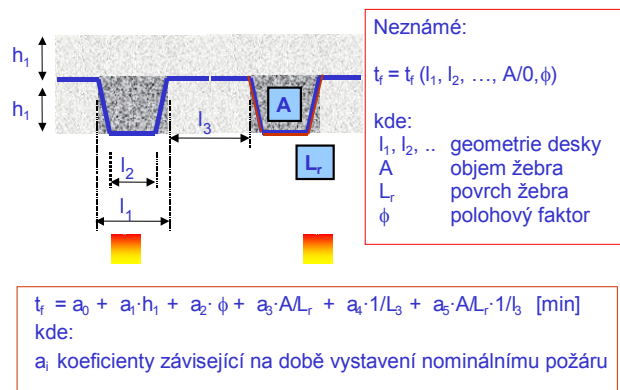
Výpočty jsou založeny na rovnici (1) a jsou provedeny pro betony s normální hmotností, ale také pro betony lehčené. Byly použity následující předpoklady:

- teplota podle nominální křivky byla uvažována přímo na povrchu vystaveném požáru (tj. na spodním povrchu)
- podmínky přestupu tepla na exponované straně (tj. proudění a sálání) se uvažují pro profilovaný tvar desek i s vlivem zinkové vrstvy; pro podrobnosti viz [15]
- tepelná vodivost (λ_c) a tepelná kapacita ($\rho_c c_c$) betonu jsou brány podle předpokladů v Eurokódu
- průměrný obsah vody v betonu byl 4% pro normální beton a 5% pro lehčený beton (v suchém stavu)

Pro všechny uvažované případy (viz tabulka 1) byl vypočítán čas ($= t_{f,i}$) do dosažení shora uvedených kritérií. Výsledky jsou analyzovány pomocí lineární regrese za použití následujících parametrů:

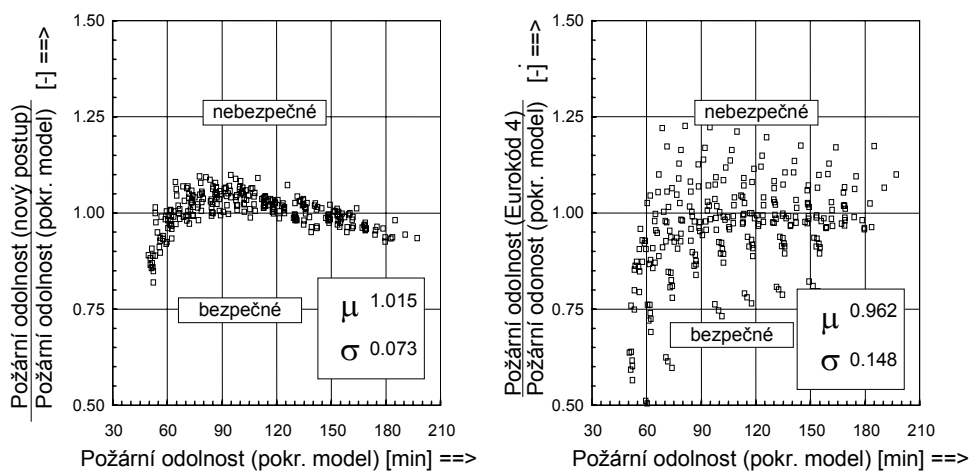
- součinitel geometrie žeber (A/L_T)
- polohový faktor pro horní část plechu (Φ)
- tloušťka betonové desky (h_1)
- šířka horní části plechu (l_3).

Regresní koeficienty byly určeny zjednodušenými postupy lineární regrese, které jsou dostupné v běžných tabulkových programech. Tento postup je shrnut na obrázku 18. Podrobnější popis je uveden v Příloze D, převzatý z [2]. Úplné podklady jsou prezentovány v [15].



Obr. 18: Kriterium teplotní izolace ocelobetonových desek

Výsledná rovnice pro odolnost vůči požáru s ohledem na kritérium izolace je stanovena v EN 1994-1-2 a nahrazuje odpovídající rovnici ve verzi ENV. Na obrázku 19a je srovnání mezi výstupy ze zjednodušeného a z pokročilého modelu. Pro úplnost je na obrázku 19b podobné srovnání, které je založeno na postupu uvedeném v ENV verzi požární části Eurokódu pro ocelobetonové konstrukce. Závěrem těchto srovnání je, že použitím nových postupů výpočtu lze dosáhnout přesnější hodnoty požární odolnosti s ohledem na kritérium izolace.



Obr. 19: Srovnání postupu pro kritérium izolace s výstupy pokročilého modelu

Přehled odpovídajících regresních koeficientů je zobrazen v tabulce 2.

Tab. 2: Regresní koeficienty pro určení požární odolnosti s ohledem na kritérium teplotní izolace

	a_0 [min]	a_1 [min/mm]	a_2 [min]	a_3 [min/mm]	a_4 [mm min]	a_5 [min]
Beton s normální hmotností	-28,8	1,55	-12,6	0,33	-735	48,0
Lehčený beton	-79,2	2,18	-2,44	0,56	-542	52,3

4.4 Výpočetní postup pro stanovení teploty výztuže v oblasti kladných momentů u betonových desek s trapézovými plechy

Informace o teplotním rozdělení v průřezu ocelobetonové desky je nutné pro výpočet plastické momentové únosnosti. Rozlišuje se mezi únosností v oblasti kladných momentů (obvykle ve středu rozpětí) a únosností v oblasti záporných momentů (případně v podpoře). Nyní se zaměříme na teplotu ve výztuži, která má vliv na kladnou momentovou únosnost.

Teplota v přídavné výztuži (pokud vůbec nějaká je), která je umístěna ve středu žebra, je zvláště důležitá pro kladnou momentovou únosnost⁹. Teplota této výztuže je silně ovlivněna působením požáru.

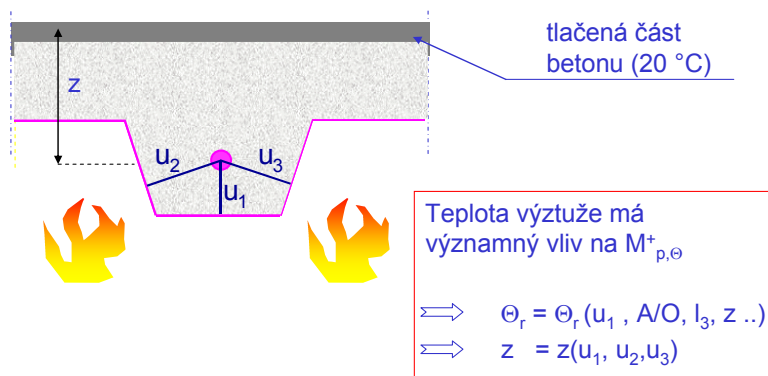
Podobným způsobem, jaký byl použit v odstavci 4.3 pro kritérium izolace, byla vytvořena rovnice, která udává teplotu v přídavné výztuži (Θ_r) v závislosti na těchto hlavních parametrech:

- vzdálenost od spodní části plechu u_3
- poloha výztuže v žebře z , podle Přílohy E
- úhel stojiny plechu α

Na základě podrobných výpočtů byla odvozena následující rovnice:

$$\theta_s = c_0 + \left(c_1 \cdot \frac{u_3}{h_2} \right) + (c_2 \cdot z) + \left(c_3 \cdot \frac{A}{L_r} \right) + (c_4 \cdot \alpha) + \left(c_5 \cdot \frac{I}{l_3} \right) \quad \dots (6)$$

Postup výpočtu je zobrazen na obrázku 20. Podrobný popis je vyložěn v příloze E. Kompletní průprava je prezentována v [15].



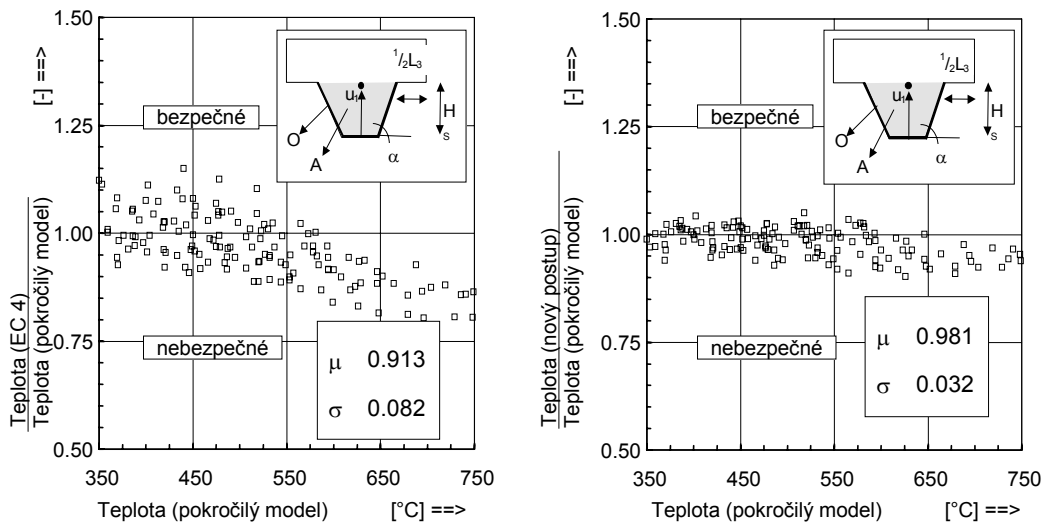
Obr. 20: Výpočetní postup pro určení teploty výztuže

⁹ Teploty v horní části průřezu (tlačená část průřezu!) jsou nízké. To je důvodem, proč se do výpočtu kladné momentové únosnosti uvažují hodnoty pevností betonu za běžné teploty.

Regresní konstanty závisí na době, po kterou je deska vystavena normovému požáru. Pro oba případy (normální beton a lehčený beton) jsou zobrazeny v tabulce 3. Na obrázku 21a je srovnání mezi výstupy podle zjednodušeného modelu a pokročilého modelu. Pro úplnost je na obrázku 21b podobné srovnání založené na postupu uvedeném v ENV verzi požární části Eurokódu pro ocelobetonové konstrukce [16]. Závěrem tohoto srovnání je, že použitím nových postupů výpočtu lze dosáhnout přesnější hodnoty teplot přídatné výztuže.

Tab. 3: Koeficienty pro určení teploty výztuže umístěné v žebrech plechu.

Beton	Pož. odolnost [min]	c_0 [°C]	c_1 [°C]	c_2 [°C/mm ^{0,5}]	c_3 [°C/mm]	c_4 [°C/°]	c_5 [°Cmm]
Normální beton	60	1191	-250	-240	-5,01	1,04	-925
	90	1342	-256	-235	-5,30	1,39	-1267
	120	1387	-238	-227	-4,79	1,68	-1326
Lehčený beton	30	809	-135	-243	-0,70	0,48	-315
	60	1336	-242	-292	-6,11	1,63	-900
	90	1381	-240	-269	-5,46	2,24	-918
	120	1397	-230	-253	-4,44	2,47	-906



(a) Srovnání s EN 1994-1-2

(b) Srovnání s pokročilým modelem

Obr. 21: Srovnání zjednodušeného postupu pro výpočet teploty přídatné výztuže s výstupy z pokročilého modelu

Přístup zmíněný výše je použit v EN 1994-1-2. Samotný plech může také poměrně významně přispět ke kladné momentové únosnosti. Tento fakt je důvodem toho, proč EN 1994-1-2 udává zjednodušený postup pro výpočet rozvoje teploty v různých částech ocelového plechu. Forma těchto pravidel je podobná té, která tu byla právě popsána pro výpočet teploty přídatné výztuže.

4.5 Model teplotní odezvy použitý pro výpočet požární odolnosti betonem vyplněných sloupů uzavřených průřezů

Zjednodušený postup pro betonem vyplněné sloupy uzavřených průřezů je – co se týká teplotní odezvy – založen na pokročilém výpočetním modelu podle rovnice (1) a ke zjednodušení dochází u modelu

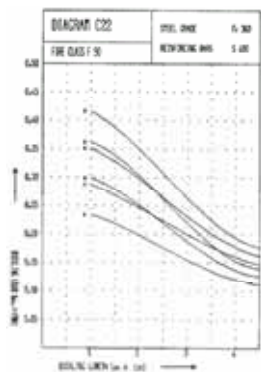
mechanické odezvy. Teplotní odezva je dále založena na podmínkách normového požáru v kombinaci s podmínkami přestupu tepla podle [7]. Hlavními parametry jsou¹⁰:

- doba, po kterou je průřez vystaven (normovému) požáru
- rozměry uzavřeného průřezu sloupů.

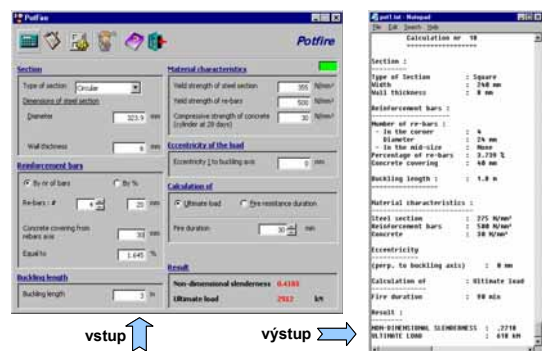
Z tohoto přístupu vyplývá, že neexistuje žádný zjednodušený analytický postup výpočtu pro určení požární odolnosti betonem vyplněných sloupů uzavřených průřezů. Bylo by totiž potřeba velké množství grafů, které by poskytly uživateli potřebné informace pro návrh. Jako příklad může sloužit příručka pro navrhování sloupů uzavřených průřezů vystavených požáru (CIDECT Design Guide for SHS Columns Exposed to Fire), ve které jsou tyto informace pro návrh uvedeny na základě ENV verze EN 1994-1-2 a která obsahuje více než 40 diagramů [17]. Příklad diagramů je na obrázku 22a.

- Dostupné návrhové grafy
- Nepraktické
- Potřeba návrhového nástroje
- ⇒ např. POTFIRE

č.	kvalita betonu	% vyztužení
1	C20	1,0
2	C20	2,5
3	C20	4,0
4	C30	1,0
5	C30	2,5
6	C30	4,0
7	C40	1,0
8	C40	2,5
9	C40	4,0



(a) Pomocí grafu

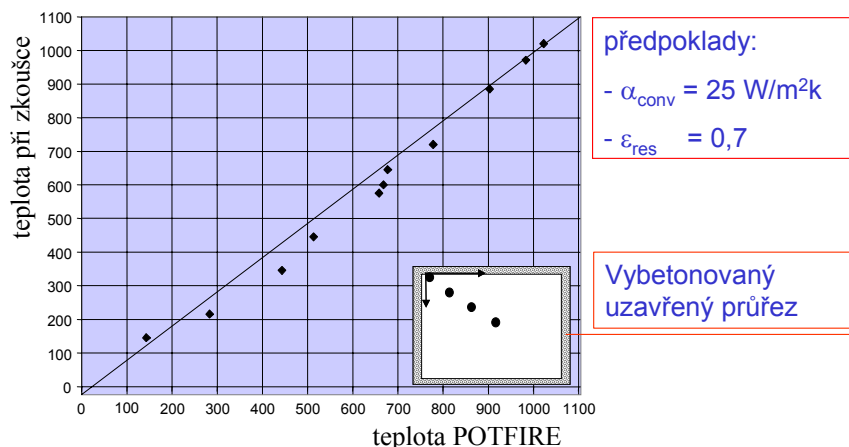


(b) Programem POTFIRE

Obr. 22: Požární návrh betonem vyplněných sloupů uzavřených průřezů

Pro tento účel byl vyvinut uživatelsky přívětivý počítačový program, který usnadní stanovení požární odolnosti betonem vyplněných sloupů uzavřených průřezů při působení normového požáru POTFIRE [18]. Tento program je plně ve shodě s pravidly EN 1994-1-2. Na obrázku 22b jsou zobrazeny vstupní a výstupní stránky. Tento program je rozsáhle ověřován pomocí hodnot získaných z výstupů zkoušek za působení normového požáru [19]. Na obrázku 23 je příklad, na kterém jsou porovnávány výsledky měření teploty v různých místech průřezu sloupů uzavřeného průřezu (při působení normového požáru) s výsledky výpočtu programu POTFIRE [19]. Shoda je uspokojivá.

¹⁰ Parametry potřebné pro mechanickou odezvu jsou: druh oceli, druh betonu, procento vyztužení.



Obr. 23: Ověření modelu v programu POTFIRE

Poznámka: I komplexní modely, jako je POTFIRE, jsou spojeny s jistým rozsahem použití, viz tabulka 4. Z obrázku 23 je zřejmé, že je to způsobeno spíše neurčitostmi v modelu mechanické odezvy než neurčitostmi v modelu teplotní odezvy.

Tab. 4: Rozsah použití pro návrh betonem vyplněných sloupů uzavřených průřezů podle EN 1994-1-2

Spodní hranice	Hledisko	Horní hranice
0	Vzpěrná délka	13,5 m
230 mm	Výška průřezu	1100 mm
230 mm	Šířka průřezu	500 mm
0 %	Procento vyztužení	6%
0 min	Požární odolnost	120 min

4.6 Zhodnocení

Výpočet teplotní odezvy ocelobetonových prvků je, v porovnání s analýzou teplotní odezvy nechráněných a chráněných ocelových prvků, komplikované. To je způsobeno tím, že teplotní rozdělení v těchto prvcích je obecně nerovnoměrné. Pro vypořádání se s tímto problémem nabízí EN 1994-1-2 následující nástroje:

- tabulkové hodnoty
- zjednodušené výpočetní modely.

Tabulkové hodnoty jsou založeny na zkušenostech získaných na základě výsledků zkoušek při působení normového požáru.

Podklady pro tyto zjednodušené výpočetní modely se výrazně liší. Někdy jsou založeny na přímé interpretaci výsledků zkoušek za působení normového požáru včetně přidání několika základních teoretických úvah. Takovým příkladem je ocelobetonový sloup s betonem mezi pásnicemi. V některých případech jsou zjednodušené postupy vytvořeny zobecněním podrobných výpočtů na základě pokročilých modelů. Příkladem je ocelobetonová deska s trapézovým plechem. V ostatních případech je použit pokročilý model (např. betonem vyplněný sloup uzavřeného průřezu). Základní vlastností zjednodušených modelů pro analýzu teplotní odezvy je jejich praktická využitelnost pouze v případě normového požáru.

Koncepce odolnosti vůči přirozenému požáru (Natural Fire Safety Concept) je vhodná pro teplotní odezvu ocelobetonových konstrukcí, ale vyžaduje použití pokročilých modelů. V současnosti je k dispozici množství potřebných nástrojů, např. počítačové programy. Viz část 4.

5 NÁRODNÍ PŘÍLOHY K ČSN EN 1993-1-2 A ČSN EN 1994-1-2

Národní příloha k normě ČSN EN 1993-1-2 (navrhování ocelových konstrukcí) umožňuje změnu a volby součinitelů v šesti člancích. Příloha přejímá doporučené hodnoty a postupy s výjimkou kritické teploty tenkostěnných prvků (bude upřesněno v části 3).

Národní příloha k normě ČSN EN 1993-1-2 (navrhování ocelobetonových konstrukcí) se týká osmi článků, v nichž je umožněna volba parametrů. Ve čtyřech případech jsou převzaty doporučené hodnoty bez jakýchkoli změn, v jedné záležitosti byla pro použití v ČR vybrána ze dvou možností varianta doporučená autorem normy J.B. Schleichem a ve třech případech se příloha odvolává na existující normy přijaté do systému ČSN. Tímto postupem je zajištěno, že mezinárodní software bude použitelný v ČR bez jakýchkoli modifikací.

LITERATURA

- [1] ČSN EN 1993-1-2: Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI, Praha, 2006.
- [2] ČSN EN 1994-1-2: Eurokód 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI, Praha, 2006.
- [3] Welty, J.R., Wicks, C.E. and Wilson, R.E.: “Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer”. John Wiley & Sons, New York, 1976.
- [4] Twilt, L. et al.: “Design tools for the behaviour of multi-storey steel-framed buildings exposed to natural fires”. Report EUR 20953 EN, European Commission, Science Research and Development, 2004.
- [5] Both, C., Stark, J.W.B. and Twilt, L.: “Numerical simulation of thermal and structural response of composite steel/concrete structures to fire”. Proceedings 4th Pacific Structural Steel Conference, pp 171-178, Singapore, 1995.
- [6] Both, C.: “3D analysis of fire exposed composite slabs”. Proceedings 3rd CIB/W14 Workshop on Modelling, Delft, 1993.
- [7] ČSN EN 1991-1-2: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru, ČNI, Praha, 2004.
- [8] ENV 1993-1-2: “Eurocode 3: Design of Steel Structures, part 1.2: General Rules – Structural fire design”. CEN TC 250, 1995.
- [9] Twilt, L., Leur, P.H.E. v.d., and Both, C.: “Characteristics of the heat transfer for calculating the temperature development in structural steelwork exposed to standard fire conditions under plate thermocouple control”. Proceedings of the first international workshop “Structures in Fire”, Copenhagen, June 19 and 20, 2001.
- [10] ENV 13381-4: “Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 4: Applied protection to steel members”. CEN TC 127, 2002.
- [11] prENV 13381-1: “Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 1: Horizontal protective membranes”. CEN TC 127, (under preparation).
- [12] ENV 13381-2: “Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 1: Vertical protective membranes”. CEN TC 127, 2002.
- [13] ECCS TC3: Euro-nomograms for fire exposed steelwork.
- [14] EN 1363-1: Fire resistance tests – Part 1: General requirements”, CEN TC 127, 1999.
- [15] Both, C.: The Fire Resistance of Composites Steel-Concrete Slabs”, Dissertation TU Delft, 1998.
- [16] ČSN ENV 1994-1-2: Eurokód 4: Navrhování spřažených ocelobetonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI, Praha, 1996.

Příloha A: FOURIEROVA DIFFERENCIÁLNÍ ROVNICE

Uvažuje se tepelný tok ve směru osy x (q [W/m^2]) do objemového prvku s charakteristikami ρ [kg/m^3], c_p [J/kg], λ [W/mK] a rozměry Δx , Δy , Δz [m]. Dále θ značí teplotu [$^\circ\text{C}$] a t je čas [s].

Tepelná rovnováha nastane, když se žádné další teplo nepřenáší do prvku:

$$\Delta q \cdot \Delta y \cdot \Delta z + \Delta(\rho \cdot c_p \cdot \theta) \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z = 0$$

$$\rightarrow \Delta q / \Delta x + \Delta(\rho \cdot c_p \cdot \theta) / \Delta t = 0$$

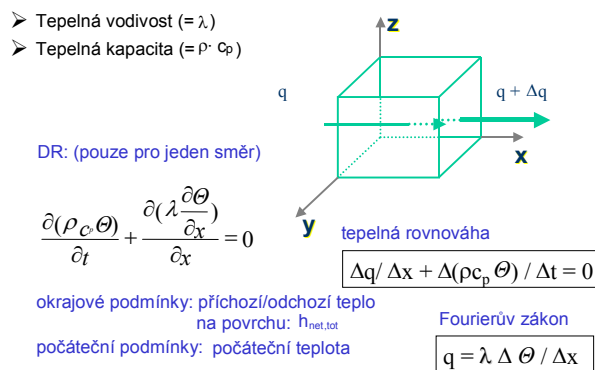
Fourierův zákon: (pouze ve směru osy x)

$$q = \lambda \Delta \theta / \Delta x$$

Z toho vyplývá:

$$\Delta(\lambda \Delta \theta / \Delta x) / \Delta x + \Delta(\rho \cdot c_p \cdot \theta) / \Delta t = 0$$

Pro $\Delta \rightarrow 0$ se získá výše zmíněná diferenciální rovnice, viz obrázek A.1, která může být snadno rozšířena i pro směry y a z . Tato rovnice může být (číselně) vyřešena při známých okrajových podmínkách (\rightarrow tepelné zatížení) a počátečních podmínkách (\rightarrow počáteční teplota).



Obr. A.1: Základní vztahy pro přestup tepla do prvku

Příloha B: PŘESTUP TEPLA DO OCELOVÉHO PRVKU

Předpokládejme rovnoměrné rozdělení teploty po průřezu ($\lambda \rightarrow \infty$). Z toho vyplývá $\partial \theta / \partial x \rightarrow 0$, $\partial \theta / \partial y \rightarrow 0$, $\partial \theta / \partial z \rightarrow 0$.

Dále předpokládejme ocelové těleso (objemu V a exponované plochy A_m), které je plně pohlceno požárem. Čistý tepelný tok, který vstupuje do tohoto tělesa za časový interval dt , je:

$$\left(\int_A \dot{h}_{tot} dt \right) \cdot dt = \dot{h}_{tot} A dt \quad \text{v [J]} \quad \dots \text{(B.1)}$$

Nárůst tepla v ocelovém tělese za časový interval dt dostáváme jako (pro rovnoměrně rozloženou teplotu po průřezu!):

$$\rho_a c_a V d\Theta_a \quad \text{v [J]} \quad \dots \text{(B.2)}$$

Tepelná rovnováha znamená, že nárůst tepla v ocelovém tělese se rovná tepelnému toku proudícímu do tělesa. Z rovnic (B.1) a (B.2) dostaneme po úpravě:

$$\frac{d\Theta_a}{dt} = \frac{A_m/V}{\rho_a c_a} \cdot \dot{h}_{net,tot} \quad \dots \text{(B.3)}$$

kde:

A_m/V je součinitel průřezu ocelového profilu [m^{-1}]
 $c_a \rho_a$ je tepelná kapacita oceli [$\text{J}/\text{m}^3\text{C}$]

Tato běžná diferenciální rovnice může být řešena numericky pro dané počáteční a okrajové podmínky.

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial(\rho_a c_a \Theta)}{\partial t} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial x})}{\partial x} = 0 \\ \text{okrajové a počáteční} \\ \text{podmínky} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{d\Theta_a}{dt} = \frac{\dot{h}_{tot} A_m}{\rho_a c_a V}$$

kde

A_m je velikost exponované plochy prvku [m^2/m]

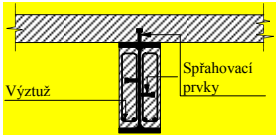
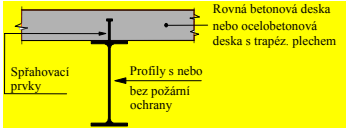
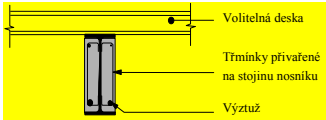

V je objem prvku [m^3/m]

Pozn.: Klíčové je rovnoměrné rozdělení teploty



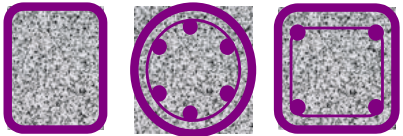
Obr. B.1: Přestup tepla do ocelového profilu pro rovnoměrné rozdělení teploty

Příloha C: TABULKOVÉ HODNOTY A ZJEDNODUŠENÉ MODELÝ PODLE EN 1994-1-2

Tab. C1: Přehled tabulkových hodnot a analýza teplotní odezvy u zjednodušených modelů (vodorovné prvky)

Typ prvku	Dostupnost tabulkových hodnot	Analýza teplotní odezvy u zjednodušených modelů
	Ano	Ne
	Ne	Polo-empirický přístup
	Ne	Polo-empirický přístup
	Ne	Zobecnění výstupů z pokročilých výpočetních modelů

Tabulka C2: Přehled tabulkových hodnot a analýza teplotní odezvy u zjednodušených modelů (svislé prvky)

Typ prvku	Dostupnost tabulkových hodnot	Analýza teplotní odezvy u zjednodušených modelů
	Ano	Zjednodušený model není k dispozici
	Ano	Polo-empirický přístup
	Ano	Přímá aplikace pokročilého teplotního modelu

Příloha D:

POŽÁRNÍ ODOLNOST OCELOBETONOVÝCH DESEK S TRAPÉZOVÝM PLECHEM

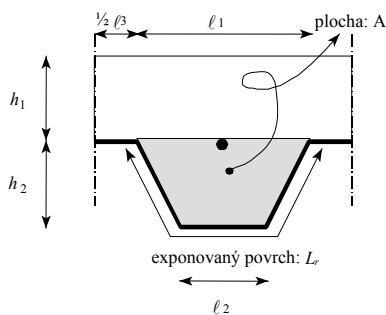
(1) Rozhodující požární odolnost s ohledem jak na nárůst průměrné teploty (=140°C), tak na maximální nárůst teploty v jednom bodě (=180°C), neboli kritérium izolace, vychází z následující rovnice:

$$t_i = a_0 + a_1 \cdot h_1 + a_2 \cdot \Phi + a_3 \cdot \frac{A}{L_r} + a_4 \cdot \frac{1}{\ell_3} + a_5 \cdot \frac{A}{L_r} \cdot \frac{1}{\ell_3} \quad \dots (D.1)$$

kde:

- t_i požární odolnost s ohledem na teplotní izolaci [min];
- A objem betonu v žeburu na jeden metr délky žebra [mm³/m];
- L_r exponovaná plocha žebra na jeden metr délky žebra [mm²/m];
- A/L_r součinitel geometrie žebra [mm];
- Φ polohový faktor horní části plechu [-];
- ℓ_3 šířka horní části plechu (viz obrázek D.1) [mm].

Hodnoty součinitele a_i pro různé hodnoty tloušťky betonu h_1 a pro normální i lehčený beton jsou uvedeny v tabulce 1 hlavního textu. Pro mezilehlé hodnoty lze lineárně interpolovat.



$$\frac{A}{L_r} = \frac{h_2 \cdot \left(\frac{\ell_1 + \ell_2}{2} \right)}{\ell_2 + 2 \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{\ell_1 - \ell_2}{2} \right)^2}} \quad \dots (D.2)$$

Obr. D.1 : Definice součinitele geometrie žebra A/L_r pro žebra ocelobetonových desek.

(2) Polohový faktor Φ horní části plechu může být určen podle následujícího vztahu:

$$\Phi = \left(\sqrt{h_2^2 + \left(\ell_3 + \frac{\ell_1 - \ell_2}{2} \right)^2} - \sqrt{h_2^2 + \left(\frac{\ell_1 - \ell_2}{2} \right)^2} \right) / \ell_3 \quad \dots (D.3)$$

**Příloha E:
VYZTUŽENÍ OCELOBETONOVÝCH DESEK S TRAPÉZOVÝMI PLECHY V OBLASTI
KLADNÝCH MOMENTŮ**

(1) Teplota výztuže umístěné v žebru, pokud je výztuž použita, může být určena podle obrázku E.1 následovně:

$$\theta_s = c_0 + \left(c_1 \cdot \frac{u_3}{h_2} \right) + (c_2 \cdot z) + \left(c_3 \cdot \frac{A}{L_r} \right) + (c_4 \cdot \alpha) + \left(c_5 \cdot \frac{I}{\ell_3} \right) \quad \dots(E.1)$$

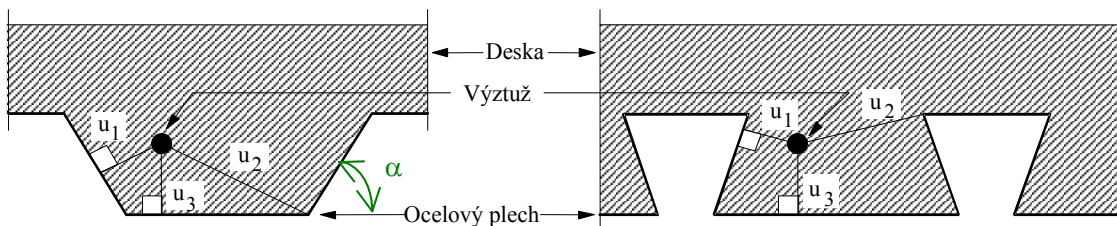
kde:

θ_R je teplota přídavné výztuže v žebru [°C]
 u_3 vzdálenost od spodní části plechu [mm]
 z údaj o poloze v žebru [mm^{-0.5}]
 α úhel stojiny plechu [stupeň]

Součinitele c_i , pro různé hodnoty požární odolnosti a pro normální i lehčený beton, jsou uvedeny v tabulce 3 hlavního textu. Pro mezilehlé hodnoty je možno lineárně interpolovat.

(2) Součinitel z , který určuje polohu výztuže v žebru, se určí podle:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{\sqrt{u_1}} + \frac{1}{\sqrt{u_2}} + \frac{1}{\sqrt{u_3}} \quad \dots(E.2)$$



Obr. E.1: Poloha výztuže

(3) Vzdálenosti u_1 , u_2 a u_3 jsou vyjádřeny v mm a jsou definovány následovně:

- u_1 , u_2 je nejkratší vzdálenost středu výztuže k jakémukoliv bodu stojiny plechu;
- u_3 : vzdálenost středu výztuže od spodní části plechu.