

Radim ČAJKA¹, Pavlína MATEČKOVÁ²

STUDIE POŽÁRNÍ ODOLNOSTI ŽELEZOBETONOVÉ DESKY

STUDY OF REINFORCED CONCRETE SLAB FIRERESISTANCE

Abstrakt

ČSN EN 1992-1-2 obsahuje následující návrhové metody: návrh podle tabulek, jednoduchá výpočetní metoda pro určité typy prvků a zpřesněné výpočetní metody pro simulaci chování konstrukčních prvků, částí konstrukce nebo celé konstrukce. Pro výpočet požární odolnosti železobetonové desky byly použity tabulkové hodnoty požární odolnosti a jednoduchá výpočetní metoda, konkrétně metoda izotermy 500. Teplotní pole je stanoveno metodou konečných prvků (Ansys) a numerickým řešením diferenciální rovnice vedení tepla (Nonstac). Vypočtené teploty jsou porovnány s teplotními profily v Příloze A ČSN EN 1992-1-2.

Klíčová slova

Požární odolnost, teplotní odezva, železobetonová deska

Abstract

Eurocode 1992-1-2 includes the following alternative design methods: detailing according to tabulated data, simplified calculating method for specific types of members and advanced calculating method for simulating the behavior of structural members, parts of structure or the entire structure. For determining the fire resistance of reinforced concrete slab structure the tabulated data and the simplified calculating method of isotherm 500 are used. Temperature distribution in concrete cross-section is determined using FEM analysis (ANsys) and numerical solution (Nonstac) of differential equation of heat transfer. Calculated temperatures are compared with temperature profiles given in annex A of ČSN EN 1992-1-2.

Keywords

Fire resistance, heat exposure, reinforced concrete slab

1 TEPLITNÍ ODEZVA

1.1 Modelový příklad a vstupní data

V článku se analyzuje modelový příklad železobetonové desky o tloušťce 200 mm, deska je vyztužena profily 10 po 100 mm, krytí výztuže je 25 mm, vzdálenost těžiště výztuže od exponovaného povrchu je 30 mm. Deska je vyrobena z betonu C20/25 a výztuže B420B.

¹ Prof. Ing. Radim Čajka, CSc., Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 344, e-mail: radim.cajka@vsb.cz.

² Ing. Pavlína Matečková, Ph.D., Katedra konstrukcí, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: (+420) 597 321 394, e-mail: pavlina.mateckova@vsb.cz.

Podle ČSN EN 1992-1-2 [4], dále jen Eurokódu 2, jsou tepelně technické vlastnosti betonu uvažovány jako závislé na teplotě θ . Součinitel tepelné vodivosti je dán horní (1) a dolní (2) mezi v jednotkách $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

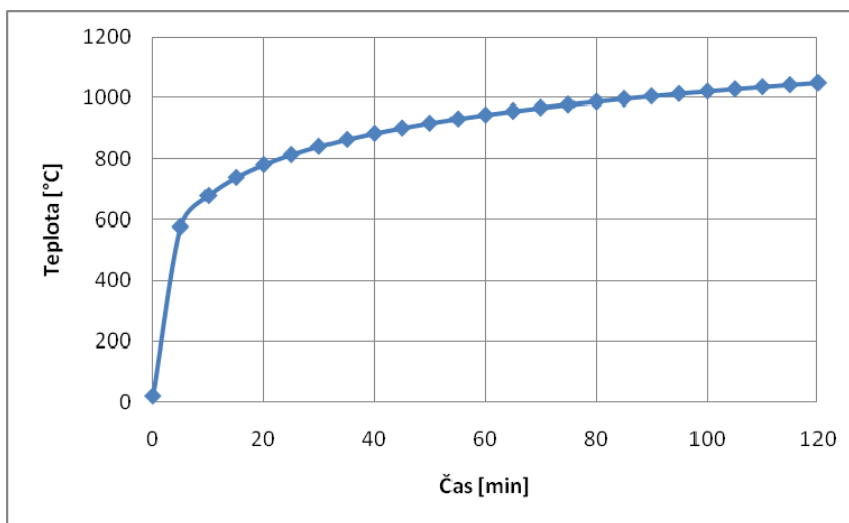
$$\lambda_c = 2,0 - 0,2451(\theta/100) + 0,0107(\theta/100)^2 \quad (1)$$

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136(\theta/100) + 0,0057(\theta/100)^2 \quad (2)$$

Základní hodnota měrného tepla betonu je 900 kJ/kg.K. Se vzrůstající teplotou měrné teplo betonu postupně roste až na hodnotu 1100 kJ/kg.K. Podle Eurokódu 2 [4] lze zohlednit různou počáteční vlhkost betonu významným zvýšením měrného tepla v teplotním intervalu 100°C-115°C. V této studii se ale uvažuje na bezpečné straně nulová počáteční vlhkost, pouze ve výpočtu pro ověření teplotních profilů se uvažuje počáteční vlhkost 1,5%.

Podle PENV verze Eurokódu 2 [3] se doporučuje uvažovat objemovou hmotnost betonu hodnotou 2300 kg/m³ bez závislosti na teplotě. Podle Eurokódu 2 [4] je objemová hmotnost betonu dána jako funkce teploty v důsledku vypařování vody, ale bez doporučené počáteční hodnoty. Objemová hmotnost obyčejného betonu je dána také v Eurokódu 1-1-1 [1] hodnotou 2400 kg/m³ pro prostý beton a 2500 kg/m³ pro železobeton. Betonářská výztuž sice výslednou objemovou hmotnost ovlivňuje, ale vzhledem k lokálnímu umístění nemůže významně ovlivnit teplotní pole v průřezu. V modelovém příkladu se tedy uvažuje objemová hmotnost hodnotou 2300 kg/m³ a 2400 kg/m³.

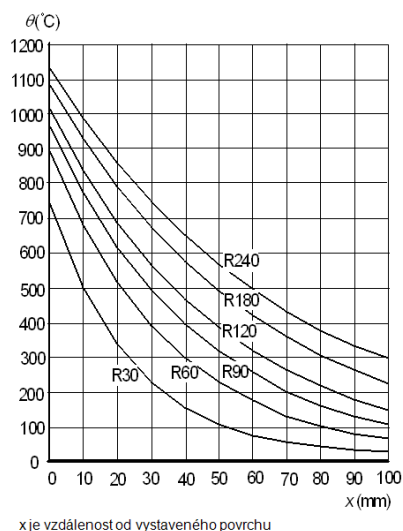
Teplota v hořícím prostoru se uvažuje podle normové teplotní křivky, viz obr. 1., přestup tepla probíhá částečně konvekcí a částečně radiací. Na straně odvrácené od požáru se uvažuje konstantní teplota 20°C. Příslušné parametry přestupu tepla jsou jednoznačně dány v ČSN EN 1991-1-2 [2].



Obr. 1: Normová teplotní křivka dle ČSN EN 1991-1-2

1.2 Teplotní profily

Nejjednodušší možnost stanovení teplot v průřezu vystavenému normovému požáru je použití teplotních profilů podle přílohy A ČSN EN 1992-1-2 [4], viz obr. 2. Teplotní profily byly stanoveny pro dolní mez součinitele tepelné vodivosti, počáteční objemovou hmotnost 2300 kg.m⁻³ a počáteční vlhkost 1,5 %. V Příloze A Eurokódu 2 jsou uvedeny teplotní profily pouze pro desku tloušťky 200 mm. Příslušné teploty jsou porovnány s vypočtenými hodnotami na obr. 3.



Obr. 2: Teplotní profily pro desky (výška h=200) dle ČSN EN 1992-1-2

1.3 MKP analýza

MKP analýza je provedena pomocí programu Ansys. V tab. 1 jsou seřazeny vypočtené teploty ve výztuži pro různé vstupní parametry. Je uveden také výpočet se stejnými vstupními parametry jako pro výpočet teplotních profilů podle Přílohy A Eurokódu 2. Vypočtené teploty jsou pak porovnány na obr. 3.

Tab. 1: Teploty ve výztuži – Ansys

		teplotně závislé			konstantní		
λ	2.0	1.36	2.0	1.36	2.0	1.36	2.0
hustota	2400	2400	2300	2300	2400	2400	2300
vlhkost	0%	0%	0%	1.5%	0%	0%	0%
Čas	Teplota	Teplota	Teplota	Teplota	Teplota	Teplota	Teplota
min	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
0	20	20	20	20	20	20	20
30	271	245	277	237	370	332	367
60	423	402	430	398	574	533	574
90	517	502	524	500	687	647	689
120	585	575	592	573	765	726	767
150	640	632	647	631	824	785	826
180	686	679	693	678	871	833	874
210	725	720	733	720	912	872	914
240	761	756	768	756	946	907	948

1.4 Numerické řešení - Nonstac

Numerické řešení je provedeno pomocí programu Nonstac [5]. Ačkoliv je teplotní pole v průřezu v případě vystavení požáru obecně třírozměrné, často s dostatečnou přesností vyhovuje i jednorozměrné teplotní pole. Nonstac řeší numericky Fourierovu diferenciální rovnici přestupu tepla Runge-Kuttovou metodou [6]. Nonstac umožňuje zadat tepelně technické materiálové vlastnosti v závislosti na teplotě a přestup tepla prouděním i sáláním. Tepelně technické materiálové charakteristiky v závislosti na teplotě se zadávají jako polynomy do třetího stupně. Podle EN 1992-1-2 [4] jsou materiálové vlastnosti zadány zpravidla lineárně po určitých teplotních intervalech a do programu Nonstac je tedy nutné zadat je pomocí regresních polynomů. V Tab. 2 jsou seřazeny vypočtené teploty ve výztuži desky pro různé hodnoty vstupních dat. Pokud uvážíme konstantní hodnoty tepelně technických vlastností materiálů, pak si hodnoty teplot vypočtených pomocí programu Nonstac a Ansys odpovídají. Uvážíme-li ale tepelně technické vlastnosti materiálů v závislosti na teplotě, pak pomocí programu Nonstac vypočteme vyšší hodnoty teplot, kde jedna z příčin může nepřesné zadání materiálových charakteristik v závislosti na teplotě. Vypočtené teploty jsou porovnány na obr. 3.

Tab. 2: Teploty ve výztuži – Nonstac

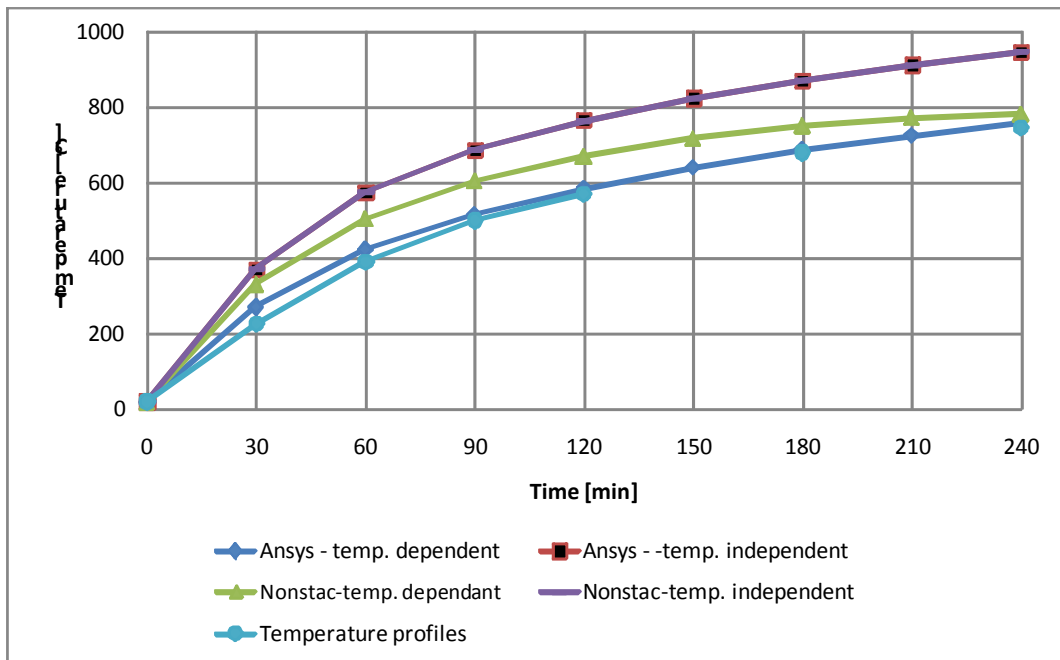
	teplotně závislé		konstantní		
λ	2.0	1.36	2.0	1.36	2.0
density	2400	2400	2400	2400	2300
Čas	Teplota	Teplota	Teplota	Teplota	Teplota
min	°C	°C	°C	°C	°C
0	20	20	20	20	20
30	331	291	370	332	340
60	504	465	574	533	540
90	604	569	687	647	654
120	670	643	765	726	732
150	718	699	824	785	791
180	751	744	871	833	838
210	772	782	912	872	877
240	782	814	946	907	911

2 MECHANICKÁ ODEZVA A POŽÁRNÍ ODOLNOST

2.1 Účinky zatížení

V tomto modelovém příkladě je moment od účinků zatížení pro trvalou a dočasnou návrhovou situaci $m_{Ed} \cong m_{Rd} = 46$ kNm/m.

Redukční součinitel pro zatížení při nehodové návrhové situaci v případě požáru se pohybuje v intervalu přibližně od 0,4 do 0,7. Zjednodušeně na bezpečné straně lze uvážit hodnotu 0,7, pak $m_{Ed,fi} = \eta_{fi} \cdot m_{Ed} = 0,7 \cdot 46 = 32$ kNm/m.



Obr. 3: Porovnání teploty ve výztuži

2.1 Požární odolnost

Požární odolnost pro určité prvky lze stanovit jednoduše pomocí tabulek, uvedených v kap. 5 Eurokódu 2 [4]. V Tabulce 5.8. [4] lze odečíst požární odolnost desky 90 minut.

V tabulce 3 jsou uvedeny momenty na mezi únosnosti pro mimořádnou návrhovou situaci při požáru pro čas 90 minut. Teplota ve výztuži je stanovena pomocí teplotních profilů a pomocí programu Ansys a Nonstac pro teplotně závislé materiálové charakteristiky.

Tab. 3: Momenty na mezi únosnosti, čas 90 minut

			Teplotní profily	Ansys	Ansys	Nonstac
Tepelná vodivost – závislé na tepl.	λ	kJ/kg.K		2.0	2.0	2.0
Hustota – závislé na tepl.	ρ	kg/m ³		2400	2300	2400
Teplota ve výztuži v čase 90 minut	θ_R	°C	500	517	524	604
Pevnost výztuže	$f_{yd,fi}$	MPa	328	305	232	193
Únosnost v ohybu	$m_{Rd,fi}$	kNm/m	42	39	30	25
Moment od účinků zatížení	$m_{Ed,fi}$	kNm/m	32	32	32	32
Posouzení			OK	OK	X	X

Je zřejmé, že stanovení teploty ve výztuži pomocí teplotních profilů a následné stanovení požární odolnosti koresponduje s tabulkovou požární odolností.

Teplota ve výztuži stanovená pomocí teplotních profilů dobře odpovídá teplotě vypočtené pomocí programu Ansys pro příslušné vstupní parametry uvedené v Příloze A Eurokódu 2.

Uvážíme-li počáteční objemovou hmotnost 2300 kg/m^3 a součinitel tepelné vodivosti na horní hranici, pak teploty ve výztuži jsou vyšší a kritérium R momentové únosnosti pro čas 90 minut není splněno.

Teploty ve výztuži stanovené pomocí programu Nonstac jsou vyšší než teploty stanovené pomocí programu Ansys a kritérium ohybové únosnosti v čase 90 minut není splněno.

3 ZÁVĚR

V článku se analyzuje modelový příklad železobetonové desky, vystavené účinkům normového požáru. Teplota ve výztuži je stanovena pomocí teplotních profilů, pomocí výpočetního programu Nonstac a Ansys. Vstupní data pro analýzu teplotního pole nejsou podle normy [4] zadána jednoznačně. V článku jsou porovnány teploty ve výztuži stanovené pro různé vstupní údaje a pomocí různých metod. Numerické řešení Fourierovy diferenciální rovnice vedení tepla je provedeno metodou konečných prvků pomocí programu Ansys a Runge-Kuttovou metodou pomocí programu Nonstac. Uváží-li se teplotně nezávislé vlastnosti materiálů, pak si vypočtené teploty odpovídají. Uváží-li se ale teplotně závislé vlastnosti materiálů, pak teploty vypočtené pomocí programu Nonstac jsou vyšší než teploty vypočtené pomocí programu Ansys.

Tabulková požární odolnost analyzované desky je 90 minut. V čase 90 minut je tedy stanovena únosnost průřezu pro různé vypočtené teploty ve výztuži. Vzhledem k tomu, že jednoduchá výpočetní metoda je pokročilejší než navrhování podle tabulkových hodnot, očekává se pomocí jednoduché výpočetní metody příznivější požární odolnost než tabulková. Tato studie má poukázat na to, že v některých případech je tabulková požární odolnost příznivější než jednoduchá výpočetní metoda.

PODĚKOVÁNÍ

Při řešení byly využity výsledky dosažené za finančního přispění MŠMT, projekt 1M0579, v rámci činnosti výzkumného centra CIDEAS.

LITERATURA

- [1] ČSN EN1991-1-1: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. Praha 2004
- [2] ČSN EN 1991-1-2: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Praha 2004
- [3] ČSN PENV 1992-1-2: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha 1998
- [4] ČSN EN 1992-1-2: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. Praha 2006
- [5] Čajka, R.: Software Nonstac, registrační číslo AR-SW-2010-02, výstup projektu Reologická kluzná spára s teplotně řízenými visko elastickými vlastnostmi. No. FR-TI2/746. Ostrava 2010
- [6] Nevřiva, P.: Simulace regulačních systémů na číselném počítači. SNTL Praha 1975.

Oponentní posudek vypracoval:

Ing. Isabela Bradáčová, CSc, FBI VŠB TU Ostrava

Ing. Radek Štefan, FSv, ČVUT Praha