

Požární odolnost litinových sloupů

Příspěvek dokumentuje postup návrhu litinových sloupů za běžné a za zvýšené teploty při požáru podle evropských návrhových norem. Na rekonstrukci Vinohradského pivovaru jsou ukázány možnosti zvýšení požární odolnosti vybetonováním a ochranou zpěňujícím nátěrem.

NÁVRH ZA BĚŽNÉ TEPLoty

Výpočet vzpěrné únosnosti litinových sloupů podle evropské metodiky rozpracovali Rondal a Rasmussen v roce 2003, viz [1]. Návrhová únosnost se stanoví jako

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_c A f_{0,2,c}}{\gamma_{M1}} \quad (1),$$

kde $f_{0,2,c}$ je smluvní mez 0,2 % litiny v tlaku, A plocha průřezu, γ_{M1} dílčí součinitel materiálu a χ_c součinitel vzpěrnosti pro litinový sloup, který lze vypočítat jako

$$\chi_c = \frac{1}{\varphi_c + \sqrt{\varphi_c^2 - \lambda_c^2}} \quad (2),$$

kde

$$\varphi_c = \frac{(1 + \eta_c + \lambda_c^2)}{2}; \quad \lambda_c = \sqrt{\frac{f_{0,2,c}}{\sigma_{E0}}} \quad \text{a} \quad \sigma_{E0} = \pi^2 E_0 \left(\frac{L}{r}\right)^{-2}.$$

Vliv imperfekcí η_c , lze stanovit jako

$$\eta_c = \alpha((\lambda_c - \lambda_l)^\beta - \lambda_0) \quad (3),$$

kde konstanty α , β , λ_0 a λ_l se určí z Ramberg Osgoodova popisu pracovního diagramu pomocí

$$n = \frac{\ln(2)}{\ln\left(\frac{f_{0,2,c}}{f_{0,1,c}}\right)} \quad \text{a} \quad e = \frac{f_{0,2,c}}{E_{0,c}} \quad \text{viz [2].}$$

$f_{0,1,c}$ je smluvní mez 0,1 % v tlaku. Pro hodnoty $e = 0,00426$ a $n = 6$ se získá $\alpha = 0,85$; $\beta = 0,095$; $\lambda_0 = 0,70$; $\lambda_l = 0,5$ a $\eta_c = -0,0193 > \alpha$ a $\eta_c = \alpha = 0,85$, viz [1]. Pro litinu, tak jako pro hliník, se hodnota meze 0,2 % obvykle nahrazuje polovinou meze pevnosti

$$f_{0,2,c} = \frac{f_{0,c}}{2}.$$

Při výpočtu je třeba uvažovat s imperfekcí průřezu vlivem excentricity otvoru k vnějšímu průměru, která vzniká při odlévání v gravitační formě vytlačováním jádra a ohybem formy. Excentricitu lze popsat jako

$$g = \frac{j d_i^2}{(d_e^2 - d_i^2)} \quad \text{kde} \quad j = \frac{(d_e - d_i)}{2 - t_{min}}, \quad \text{viz obr. 1.}$$

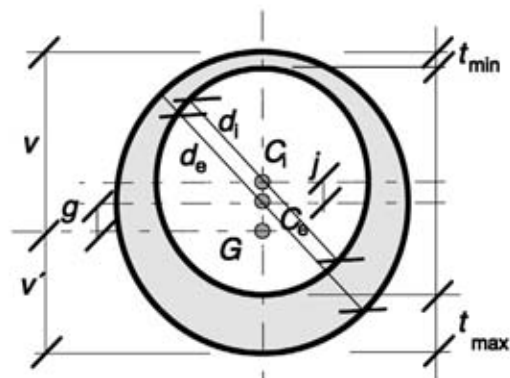
Vzdálenost g lze odhadnout jako

$$\frac{g}{d_e} \approx \frac{1}{30}.$$

Litina má nižší pevnost v tahu než v tlaku. Nesymetrie pracovního diagramu materiálu může způsobit porušení trhlinou při ohybu. Studii výrobků, viz [3], bylo prokázáno, že porušení tahem je rozhodující pro štíhlosti větší než 80. V praxi štíhlost obvykle dosahuje 60, v řešeném případě dále 56. Proto není únosnost sloupů v tahu dále řešena.

NÁVRH ZA ZVÝŠENÉ TEPLoty

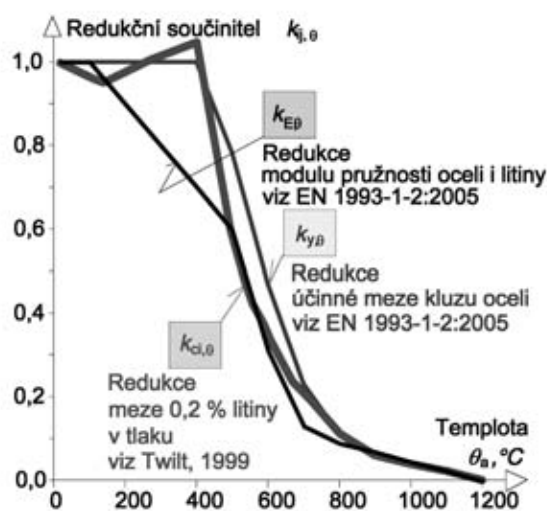
Požární návrh začíná modelováním požáru. Nejjednodušším modelem požáru je již přes 120 let při celulózovém typu hoření nominální normová křivka, viz [4]. Dalším krokem je přestup a rozvoj teploty v konstrukci. Nárůst teploty po otevřeném průřezu se obecně řeší integrací Fourierovy rovnice vedení tepla. Řešení závisí na okrajových podmínkách a lze využít přírůstkové metody nebo numeric-



Obr. 1 – Imperfekce průřezu litinového sloupu (G značí těžiště)

kého řešení MKP. Pro řešený příklad byl využit SAFIRE, viz [5], který umožnil dvou i třírozměrný popis tepelných polí.

Pro mechanickou analýzu je třeba znát redukci materiálových charakteristik, které se popisují redukčním součinitelem. Redukční součinitel pro litinu byl publikován v [6] a [7]. Na obr. 2 je redukce pro litinu porovnána s redukcí pro uhlíkovou ocel, která je popsána v [8].



Obr. 2 – Porovnání redukčního součinitele smluvní meze 0,2 % litiny v tlaku $k_{ci,\theta}$, smluvní meze kluzu oceli $k_{y,\theta}$, a modulu pružnosti $k_{E,\theta}$

Historické litinové sloupy uzavřených průřezů lze klasifikovat podle [10] obvykle do třídy 1. Při známé redukcí pracovního diagramu materiálu lze vzpěrnou únosnost za zvýšené teploty popsat jako

$$N_{b,Rd,\theta} = \frac{\chi_{\theta} k_{ci,\theta} A f_{0,2,c}}{\gamma_{M,\theta}} \quad (4),$$

kde χ_{θ} je součinitel vzpěrnosti za požární situace, $k_{ci,\theta}$ redukční součinitel smluvní meze 0,2 % v tlaku při teplotě θ a $\gamma_{M,\theta}$ dílčí sou-

činitel při požáru. Hodnota χ_θ je u rotačně symetrických průřezů stejná pro vzpěr ve všech směrech

$$\chi_\theta = \frac{I}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \lambda_\theta^2}} \quad (5),$$

kde

$$\varphi_\theta = \frac{(1 + \eta_c + \lambda_\theta^2)}{2}.$$

Při zanedbání nerovnoměrného rozložení teploty po průřezu se součinitel imperfekcí stanoví jako

$$\eta_c = ((\lambda_c - \lambda_l)^\beta - \lambda_0)$$

kde α , β , λ_0 a λ_l jsou funkce parametrů n a

$$e_c = \frac{\sigma_{0,2,c}}{E_0}.$$

Na základě experimentů pro běžné teploty byly hodnoty určeny, viz [1], jako $\eta_c = \alpha = 0,85$; $\beta = 0,095$; $\lambda_0 = 0,70$; $\lambda_l = 0,55$. Poměrná štíhlost λ_θ pro teplotu θ se stanoví jako

$$\lambda_\theta = \lambda_c \left[\frac{k_{ci,\theta}}{k_{Eci,\theta}} \right]^{0,5} \quad (6),$$

kde $k_{ci,\theta}$ je redukční součinitel smluvní meze 0,2 % litiny v tlaku při teplotě θ a $k_{Eci,\theta}$ redukční součinitel modulu pružnosti, který se bere jako

$$\frac{E_{ci,\theta}}{E_{ci}}$$

kde je $E_{ci,\theta}$ modul pružnosti při teplotě θ , viz [7]. Hodnota $k_{Eci,\theta}$ se velice blíží hodnotám pro ocel a ve výpočtu se doporučuje uvažovat s hodnotami pro ocel.

SLOUPY VINOHRADSKÉHO PIVOVARU

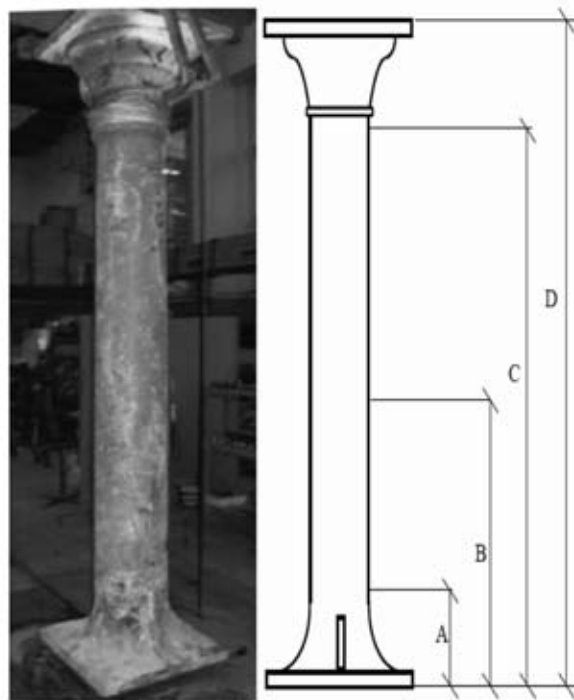
Areál Vinohradského pivovaru byl rekonstruován pro rezidenční bydlení a na kancelářské prostory, viz [11]. Litinové sloupky byly navrženy na základě experimentů. Originální sloupky v prostorách



Obr. 3 – Využití originálních sloupů v prodejně v přízemní



Obr. 4 – Originální sloupky v projekčním ateliéru v prvním podlaží



Obr. 5 – Zkoušený sloup v laboratoři a jeho geometrie

projekčního ateliéru a obchodů přináší autenticitu prostoru, viz obr. 3 a 4. Geometrie sloupky je popsána na obr. 5. Na úrovni $A = 300$ mm byl průměrný vnější průměr sloupky 316,4 mm a tloušťka 29,2 mm, na $B = 1\,000$ mm byl průměr 304 mm a tloušťka 31,4 mm; na $C = 2\,100$ mm pak 285,8 mm a 35,4 mm. Změřená výška sloupky byla $D = 2\,605$ mm a průměrná tloušťka z měření 32 mm s průměrným vnitřním průměrem 238,1 mm a vnějším průměrem 302,1 mm. Výpočet vycházel ze zkoušek vzorků ze sloupů budovy České pošty v Jindřišské ulici, kde byla stanovena mez pevnosti v tlaku $f_{u,c} = 213,1$ MPa a návrhové

smluvní meze $f_{0,1,c} = 29,9$ MPa a $f_{0,2,c} = 49,1$ MPa. Hodnota tvarového součinitele n byla volena jako 6,0; viz [12].

Pro výpočet za běžné a zvýšené teploty byly použity geometrické imperfekce $g = 10,07$ mm, vzdálenost ke krajnímu vláknu $G = 161,12$ mm; plocha průřezu $27\,153,41$ mm²; moment setrvač-



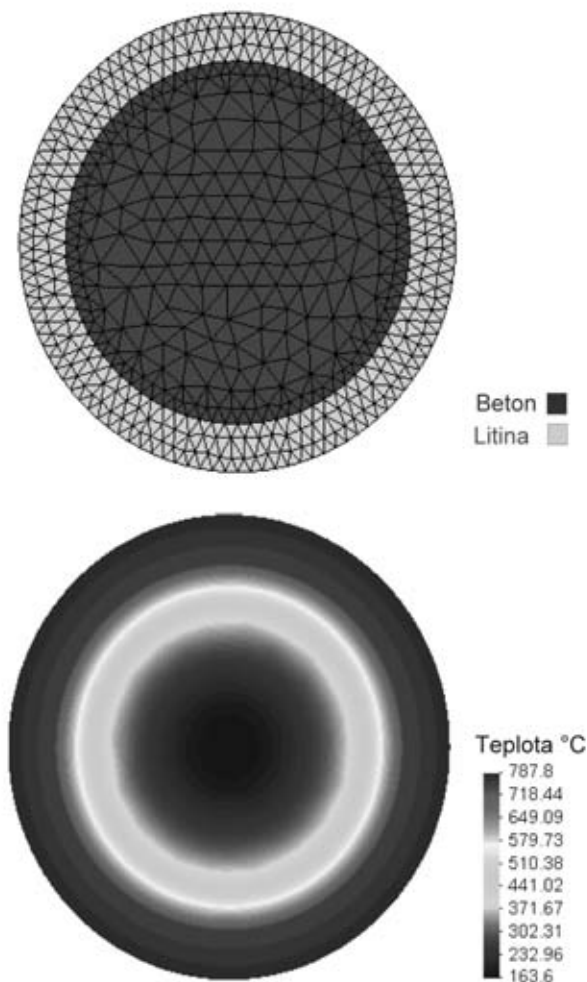
Obr. 6 – Porušení patní desky při zkoušce za běžné teploty

nosti $251\,094\,438,07$ mm⁴; poloměr setrvačnosti $96,16$ mm a štíhlost $27,09$. Zvolené konstanty $\alpha = 0,85$; $\beta = 0,095$; $\lambda_0 = 0,7$; $\lambda_1 = 0,55$ umožnily stanovit součinitel vzpěrnosti χ_c pro štíhlost $\lambda_c = 0,56$ a $\eta_c = 0,85$; $\varphi_c = 1,08$. Pro $\chi_c = 0,50$ byla vypočtena návrhová únosnost litinového sloupu F_{Rd} za běžné teploty jako $4\,589,5$ kN.

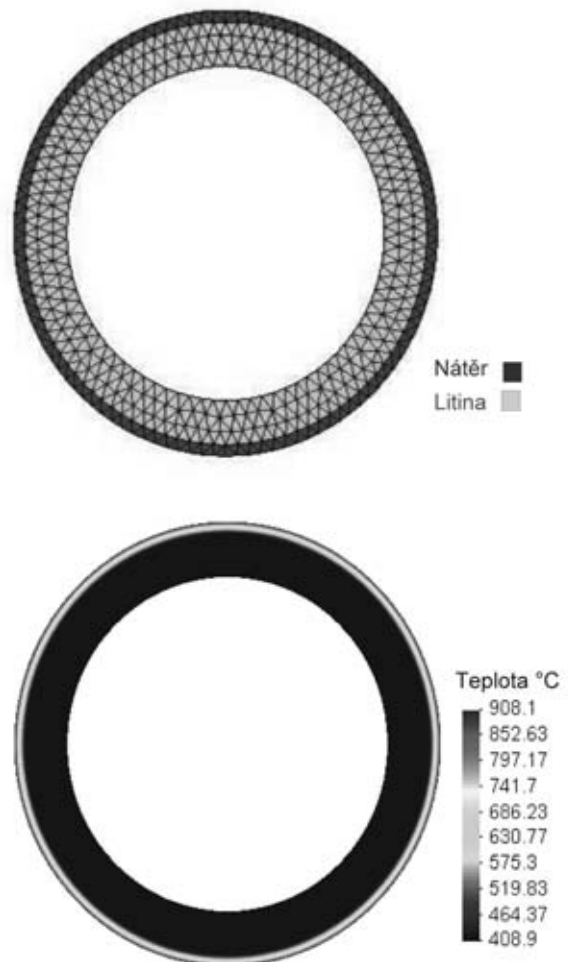
Sloupy z objektu byly zkoušeny za běžné teploty na provozní $N_{Ed,ser} = 1\,800$ kN a na návrhové zatížení $N_{Ed,ult} = 2\,700$ kN. Požadované hodnoty byly dosaženy. K porušení došlo v patní desce, viz obr. 6. Za požární situace se požadovala návrhová únosnost $N_{Ed,\theta} = 1\,500$ kN.

ZVÝŠENÍ POŽÁRNÍ ODOLNOSTI

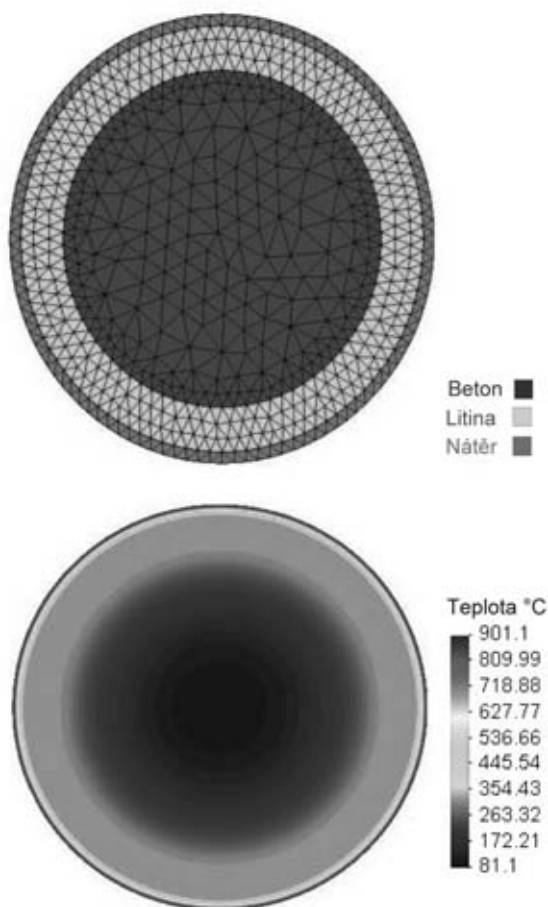
Přestup tepla do konstrukce byl počítán programem SAFIR, viz [5]. Bylo použito dvojrozměrné řešení. Kolem sloupu se uvažovalo rovnoměrné rozdělení teploty podle nominální normové teplotní křivky. Byl simulován sloup nechráněný, vyplněný betonem, chráněný zpěňujícím nátěrem a vyplněný a současně chráněný zpěňujícím nátěrem. Počítalo se s vnějším průměrem $d_e = 301,8$ mm; s vnitřním průměrem $d_i = 238,4$ mm; s tepelnou vodivostí 55 W/mK a s měrným teplem 460 J/kgK litiny. Pro požární nátěr PROMAPAIN[®] SC se brala tepelná vodivost $0,2$ W/mK; měrné teplo $1\,100$ J/kgK; hustota 350 kg/m; emisivita $0,8$ a účinná tloušťka 8 mm, viz [12]. Průměrná teplota litiny ve výpočtu je shrnuta v tab. 1. Rozdělení teploty je ukázáno na obr. 7, 8 a 9. V 60 min. požáru se teplota nechráněného sloupu měnila po tloušťce od 788 po 750 °C. Pro chráněný sloup pouze od 409 do



Obr. 7 – Volba sítě prvků a teplotní pole ve sloupu vyplněném betonem vystaveném nominální teplotní křivce po 60 minutách



Obr. 8 – Volba sítě prvků a teplotní pole ve sloupu chráněném požárním nátěrem vystaveném nominální teplotní křivce po 60 minutách



Obr. 9 – Volba sítě prvků a teplotní pole ve sloupu vyplněném betonem a chráněném požárním nátěrem vystaveném nominální teplotní křivce po 60 minutách

413 °C a pro vyplněný betonem od 354 do 274 °C. Požární odolnost byla počítána za předpokladu stejných imperfekcí za běžné a za zvýšené teploty podle [13]. Výsledky výpočtu požární odolnosti jsou shrnuty v tab. 2.

Tab. 1 – Průměrné teploty sloupů a redukční součinitele smluvní meze 0,2 % v tlaku a modulu pružnosti litiny při R60		
Požární řešení sloupů	Teplota	Součinitel
Požárně nechráněné	864 °C	0,08/0,07
Vyplněné betonem	769 °C	0,14/0,07
Se zpěňovacím nátěrem	411 °C	1,00/0,67
Vyplněné a chráněné	314 °C	1,00/0,82

Tab. 2 – Požární odolnost sloupů Vinohradského pivovaru při R60		
Požární řešení sloupů	Požární odolnost	% únosnosti za běžné teploty
Požárně nechráněné	395 kN	8 %
Vyplněné betonem	687 kN	15 %
Se zpěňovacím nátěrem	4 530 kN	99 %
Vyplněné a chráněné	4 547 kN	99 %

ZÁVĚR

V příspěvku je shrnuta evropská metodika návrhu vzpěrné pevnosti litinových sloupů. Metodika je rozšířena na sloupy vystavené zvýšené teplotě za požáru. Její využití je ukázáno na příkladu rekonstrukce Vinohradského pivovaru. Požární odolnost litinových sloupů je poměrně vysoká. Numerická simulace přestupu a rozvoje tepla v litinovém průřezu dokládá velmi malý přírůstek vyplnění betonem. Pro rekonstrukci bylo použito vyplnění betonem i ochrana zpěňujícím nátěrem.

Tato práce byla vypracována s podporou výzkumného centra MŠMT CIDEAS č. 1M0579.

Mgr. Mekonnen Degefa,
mekonnen_degefa@yahoo.com,
prof. ing. František Wald, CSc.,
wald@fsv.cvut.cz,
doc. ing. Jiří Kolisko, Ph.D.,
kolisko@klok.cvut.cz,
ČVUT v Praze,

Ing. Miroslav Matějka,
matejka@matejkaeng.cz,
MATĚJKA Engineering s.r.o.

LITERATURA:

- [1] Rondal J. and Rasmussen Kim J. R., On the Strength of Cast Iron Columns. Research Report No R829. The University of Sydney, Department of Civil Engineering, 2003, Sydney.
- [2] Ramberg W. and Osgood, W. R., Description of Stress Strain Curves by Three Parameters. Technical Note No. 902, National Advisory Committee for Aeronautics, 1943, Washington DC.
- [3] Blanchard J., Bussell M., Marsden, A. and Lewis, D., Appraisal of Existing Ferrous Metal Structures Stahlbau 66(6). 1997, s. 333–345.
- [4] ČSN EN 1991-1-2, Zatížení konstrukcí, Obecná zatížení, Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru, ČSN, Praha 2004.
- [5] Franssen J. M., Users Manual for SAFIR 2007. A Computer Program for Analysis of Structures Subjected to Fire, University of Liege. 2007, Liege.
- [6] Twilt L., Urban Heritage and Building Maintenance. Problems and Possibilities, in Urban Heritage Building Maintenance – Iron and Steel, Delft University of Technology, 1999.
- [7] Wouters I., Mollaert M., Evaluation of the Fire Resistance of the 19th Century Iron Framed Buildings, Fire technology, 38, Kluwer Academic Publishers. 2002, s. 383–390.
- Degefa M., Cast Iron Columns under Ambient and Elevated Temperature, with Vinohrady Brewery's Case Study, magisterská práce na ČVUT v Praze, 64 s., 2008.
- [8] ČSN EN 1993-1-2: 2005, Navrhování ocelových konstrukcí, Všeobecná pravidla, Navrhování na účinky požáru, ČNI, Praha, 2006.
- [9] ČSN EN 1991-1-3: 2005, Navrhování ocelových konstrukcí, Obecná pravidla, ČNI, Praha, 2006.
- [10] Korunní dvůr, <http://www.korunnidvur.cz/lokalita-historie.php>.
- [11] Wald, F., Strejček, M., Účinné vlastnosti požárně ochranných materiálů, In: Konstrukce. 2007, roč. 6, č. 5, s. 29–31. ISSN 1213-8762.
- [12] Degefa, M., Wald, F., Kolisko, J., Matějka, M., Improvement of Fire Resistance of Cast Iron Columns, v Protection of Historical Buildings PROHITECH 09. London: Taylor & Francis, 2009, vol. 1,2, s. 1378–1391. ISBN 978-0-415-55803-7.

Fire Resistance of Cast Iron Columns

The paper presents a procedure for design of cast-iron columns at ambient temperature and exposed to fire according to Eurocodes. On case study of reconstruction of the Vinohrady brewery in Prague is shown the ability of increase of fire resistance by filling by concrete and the intumescent coating protection.