



## NAUJA EUROPOS SĄJUNGOS GAISRO TEMPERATŪRŲ VEIKIAMŲ GELŽBETONINIŲ KONSTRUKCIJŲ PROJEKTAVIMO METODIKA

**Bronius Jonaitis<sup>1</sup>, Vytautas Papinigis<sup>2</sup>**

*Gelžbetoninių ir mūrinių konstrukcijų katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,  
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva  
El. paštas: <sup>1</sup>gelz@st.vtu.lt; <sup>2</sup>vytas@proex.lt*

*Įteikta 2006-02-17; priimta 2006-06-15*

**Santrauka.** Straipsnyje pateikta naujos gaisro temperatūrų veikiamų gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo metodikos analizė. Išanalizuoti pagrindiniai esminiai veiksniai, kuriuos privalo įvertinti projektuojant konstrukcijas ir jų dalis taip, kad jos būtų pakankamos laikomosios galios ir reikiamai ribotų gaisro plitimą. Rengiant gaisrinius projektus, reikia įvertinti konstrukcinės sistemos elgseną veikiant gaisro temperatūroms, galimą šilumos poveikį ir teigiamus aktyviųjų ir pasyviųjų apsaugos prieš gaisrą sistemų efektus kartu su šių trijų savybių neapibrėžtumais ir konstrukcijos griuvimo pasekmėmis. Metodika skirta pastatams, gaisro apkrovą siejant su pastatu ir jo naudojimu. Kartu nagrinėjami gaisro veikiamų konstrukcijų šiluminiai ir mechaniniai poveikiai.

**Reikšminiai žodžiai:** gaisro temperatūros, konstrukcijų projektavimas, šiluminiai ir mechaniniai poveikiai.

## NEW EUROPEAN UNION METHOD FOR THE DESIGN OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES EXPOSED TO FIRE TEMPERATURES

**Bronius Jonaitis<sup>1</sup>, Vytautas Papinigis<sup>2</sup>**

*Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Vilnius Gediminas Technical University,  
Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania  
E-mail: <sup>1</sup>gelz@st.vtu.lt; <sup>2</sup>vytas@proex.lt*

*Received 17 February 2006; accepted 15 June 2006*

**Abstract.** The analysis of a method for the design of reinforced concrete structures exposed to fire temperatures is presented in the article. The main essential factors which must be evaluated in the design of structures and their parts to provide their adequate carrying capacity and ability to prevent fire spread are analyzed. In fire design it is necessary to take into account the behaviour of structural system exposed to fire temperatures, the possible effect of heat and positive effects of active and passive protection systems against fire and the consequences of collapse of the structure. The method is intended for buildings, fire load is associated with the building and its use. At the same time thermal and mechanical actions for structures exposed to fire are considered.

**Keywords:** fire temperatures, design of structures, thermal and mechanical actions.

### 1. Įvadas

Bendrieji gaisrinės saugos reikalavimai – gaisro atveju apriboti riziką, kilusią asmeniniam, visuomeniniam ir kaimynų turtui, o prireikus ir aplinkai.

Statybos gaminių direktyvoje 89/106/EEC pateiktas

toks esminis reikalavimas gaisro rizikai apriboti: statinius reikia taip suprojektuoti ir pastatyti, kad kilus gaisrui galima tarti, kad konstrukcijų laikomoji galia yra pakankama nustatytu laikotarpiu, ugnies ir dūmų susidarymas statinyje yra ribotas, gaisro plitimas į gretimas konstrukcijas yra

ribotas, esantieji statinyje gali išeiti iš jo arba gali būti išgelbėti kitokiomis priemonėmis, yra atsižvelgta į gelbėjimo komandų saugumą.

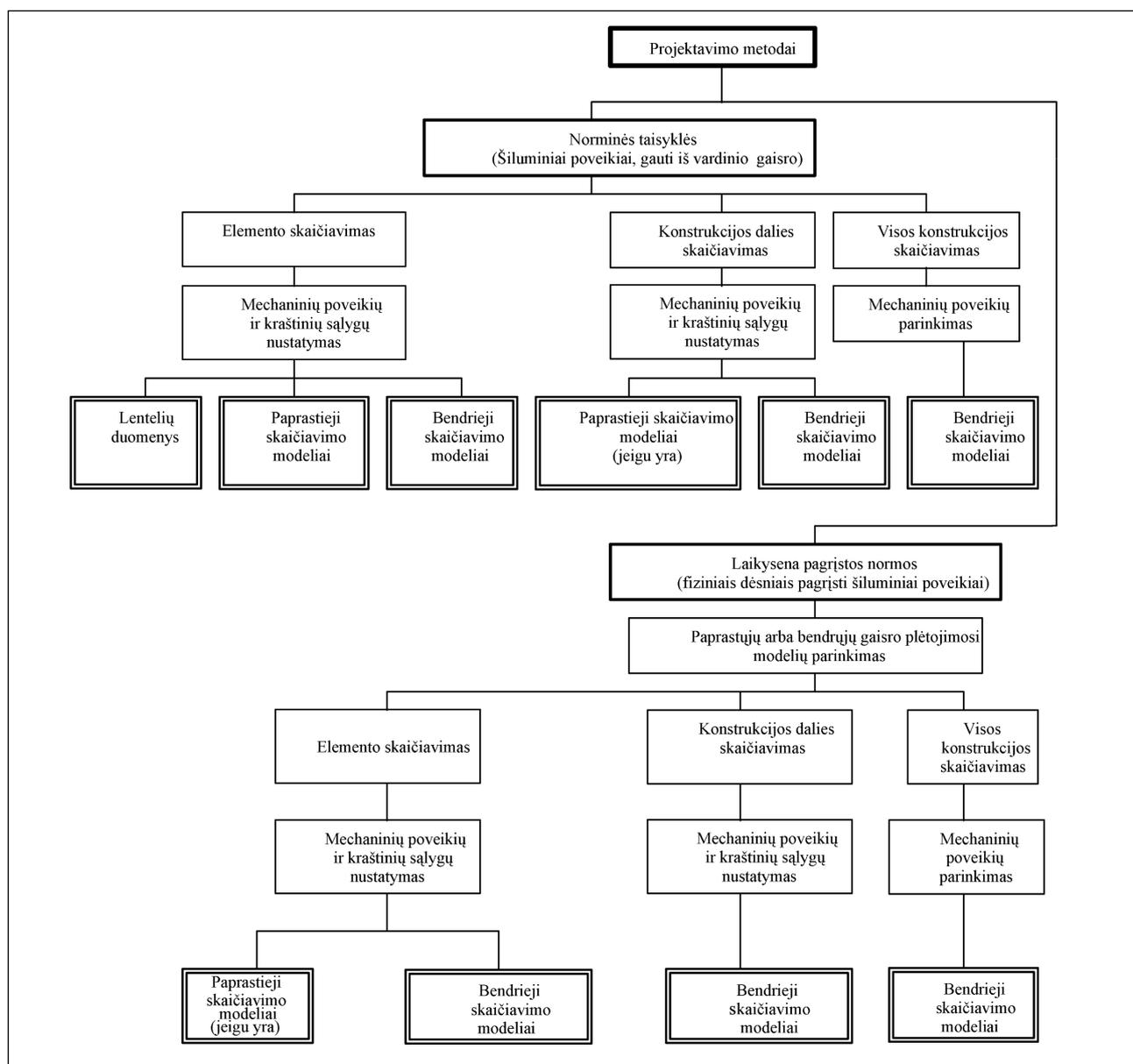
Statybinių konstrukcijų projektavimo euronormų gaisro saugos dalyse nagrinėjami būdingieji pasyvosios apsaugos nuo gaisro aspektai, taikomi projektuojant konstrukcijas ir jų dalis taip, kad jos būtų pakankamos laikomosios galios ir reikiamai ribotų gaisro plitimą [1]. Paskirtis ir naudojimo savybių lygius galima apibrėžti standartinio atsparumo gaisrui laipsniavimo sąvokomis, kurios paprastai pateikiamos nacionalinėse gaisrinės saugos normose [2, 3].

Rengiant gaisrinius projektus, reikia įvertinti konstrukcinės sistemos elgseną, veikiant gaisro temperatūroms, galima šilumos poveikį ir teigiamus aktyviųjų ir pasyviųjų apsaugos prieš gaisrą sistemų efektus kartu su šių trijų sa-

vybių neapibrėžtumais ir konstrukcijos griuvimo pasekmėmis [4–11]. Metodai, pateikti euronormose [1], skirti pastatams, gaisro apkrovą siejant su pastatu ir jo naudojimu. Nagrinėjami gaisro veikiamų konstrukcijų šiluminiai ir mechaniniai poveikiai, numatoma, kad bus atsižvelgta į gaisrinio projektavimo dalis, kuriose pateiktos konstrukcijų gaisro atsparumui projektuoti taisyklės (1 pav.).

Laikančiosios konstrukcijos, be gaisro atskyrimo funkcijų, turi būti projektuojamos ir konstruojamos taip, kad jų atlaikymo funkcija  $R$  būtų pakankama.

Gaisro veikiamos konstrukcijos ir elementai su ugnies atskyrimo funkcijomis turi būti projektuojami ir konstruojami taip, kad būtų jų pakankamas sandarumas  $E$  – neturi atsiverti didelių plyšių, susidaryti skylių ir kitokių ertmių, kurios leistų gaisrui plisti į kitas patalpas; izoliavimas



1 pav. Gaisrinio projektavimo metodai

Fig 1. Methods of fire design

$I$  – šilumą izoliuojančios savybės turi būti tokios, kad gaisro sąlygomis neužsidegtų tiesiogiai gaisro neveikiami konstrukcijų paviršiai, apsaugojimas gaisro nepalietos pusės nuo šilumos spinduliavimo.

## 2. Skaičiavimo principas

Nagrinėjamos konstrukcinės sistemos modelis turi pateikti tą konstrukcijos būseną, kuri prognozuojama gaisro metu. Gelžbetoninių konstrukcijų atsparumas ugniai nustatomas taikant vieną iš alternatyvų: elemento skaičiavimo, konstrukcijos dalies skaičiavimo, visos konstrukcijos skaičiavimo [1, 3]. Atitinkamai gaisro poveikio trukmei skaičiavimais turi būti patvirtinta, kad

$$E_{d,fi} \leq R_{d,t,fi}, \quad (1)$$

čia  $E_{d,fi}$  – skaičiuotinis poveikio efektas, įvertinant plėtimosi dėl šilumos ir deformacijų poveikius;  $R_{d,t,fi}$  – skaičiuotinė atlaikymo funkcija, veikiant gaisrui pasirinktu laiko momentu  $t$ .

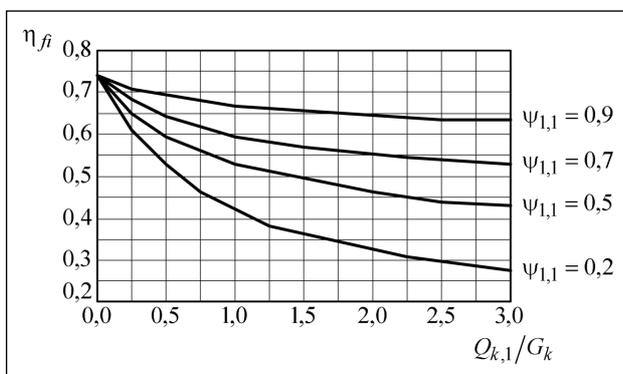
*Elemento skaičiavimas.* Kaip alternatyva konstrukcijos daliai skaičiuoti kilus gaisrui, kai laikas  $t = 0$ , skaičiuojamas elementas. Skaičiuotinis poveikio efektas veikiant gaisro temperatūrai:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d, \quad (2)$$

čia  $E_d$  – skaičiuotinis poveikio efektas, veikiant normaliai temperatūrai;  $\eta_{fi}$  – koeficientas (2 pav.), kuriuo sumažinamos apkrovos kilus gaisrui (2 pav.). Skaičiuojant galima imti  $\eta_{fi} = 0,7$  su prielaida, kad visą gaisro temperatūros poveikio laiką įtvirtinimo sąlygos atramos ir konstrukcijų galuose išlieka nepakitusios.

Elementui skaičiuoti, kilus gaisrui, gali būti taikomi lentelių duomenys, paprastieji ir bendrieji skaičiavimo metodai.

*Konstrukcijų dalies skaičiavimas.* Kaip alternatyva visos konstrukcijos analizei, kilus gaisrui, kai laikas  $t = 0$ ,



2 pav. Koeficiento  $\eta_{fi}$  priklausomybė nuo apkrovų santykio  $Q_{k,1}/G_k$ , esant  $\gamma_{GA}=1,0$ ,  $\gamma_G=1,35$  ir  $\gamma_Q=1,5$

Fig 2. Relationship between coefficient  $\eta_{fi}$  and the ratio of loads  $Q_{k,1}/G_k$  when  $\gamma_{GA}=1,0$ ,  $\gamma_G=1,35$  ir  $\gamma_Q=1,5$

konstrukcijos poveikių efektai gali būti apskaičiuojami taikant konstrukcijos dalies analizės metodą, veikiant įprastai temperatūrai. Ta konstrukcijos dalis, kurios analizė bus atliekama, turi būti modeliuojama remiantis galimu jos šiluminiu plėtimusi ir deformacijomis. Analizuojant tam tikrą konstrukcijos dalį, kaip ir skaičiuojant visą konstrukciją, būtina atsižvelgti į jos irties pobūdį dėl gaisro poveikio, nuo temperatūros priklausančias medžiagos savybes, konstrukcijos dalies standumą, šiluminio plėtimosi ir deformacijų poveikius (netiesioginius gaisro poveikius). Laikoma, kad įtvirtinimo sąlygos atramos ir konstrukcijos poveikių efektai, kai laikas  $t = 0$ , išlieka nepakitę per visą ugnies poveikio laiką.

*Visos konstrukcijos skaičiavimas.* Skaičiuojant visą konstrukciją, kilus gaisrui, būtina atsižvelgti į atitinkamą konstrukcijos irties dėl gaisro veikimo pobūdį, nuo temperatūros priklausančias medžiagų savybes, konstrukcijos elementų standumą, taip pat šiluminio plėtimosi ir deformacijų poveikį (netiesioginį gaisro poveikį).

## 3. Betono ir armatūros stipris, deformacijos ir šiluminės savybės

Gniuždomo betono  $\sigma - \epsilon$  priklausomybė, pateikta 3 pav., apibūdinama dviem parametrais: gniuždomuoju stipriu  $f_{ck(\theta)}$  ir jį atitinkančia deformacija  $\epsilon_{c1(\theta)}$ .

Kiekvieno šių parametru vertės kaip betono temperatūrų funkcija pateikiamos rekomendacijose [1]. Norint nustatyti tarpines temperatūros vertes, taikomas tiesinės interpoliacijos metodas. Parametrai gali būti taikomi paprastam betonui arba lengvesniems betonams, kurių tankis svyruoja nuo 1600 iki 2000 kg/m<sup>3</sup>.

Veikiant natūraliam gaisrui, atsižvelgiant į žemyn krantančią kreivės dalį, turi būti modifikuojamas betono įtempimų ir deformacijų tarpusavio priklausomybės modelis, pateiktas 3 pav.

Betono tempiamojo stiprio charakteristinė reikšmė nustatoma pagal išraišką

$$f_{ck,t(\theta)} = k_{ck,t}(\theta) f_{ck,t}. \quad (3)$$

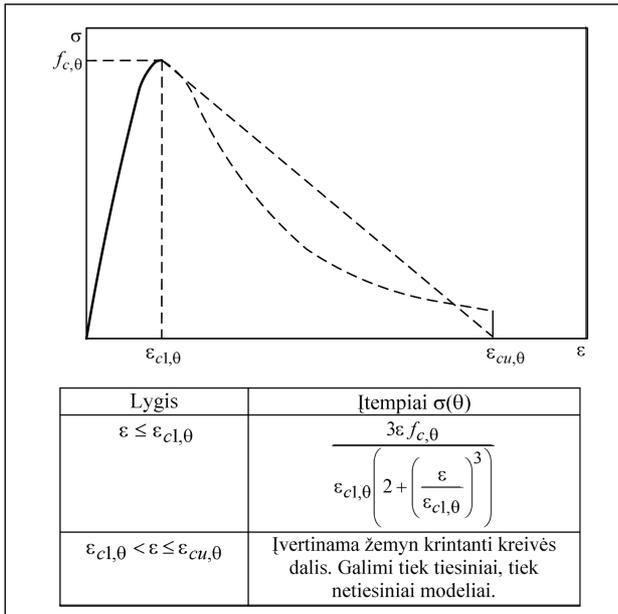
Kai nėra tikslesnių duomenų, turėtų būti imamos tokios  $k_{ck,t(\theta)}$  reikšmės (žr. 4 pav.):

$$k_{ck,t(\theta)} = 1,0, \text{ kai } 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$k_{ck,t(\theta)} = 1,0 - 1,0 (\theta - 100)/500, \text{ kai } 100 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 600 \text{ }^\circ\text{C}.$$

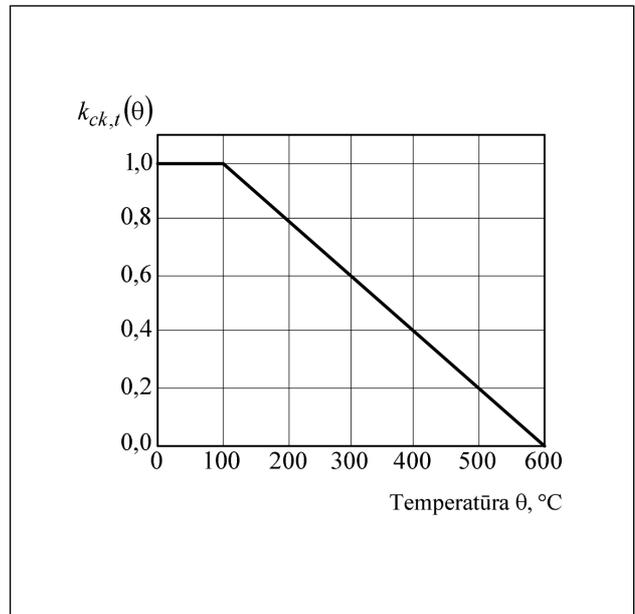
Armatūrinio plieno stiprio ir deformacijų savybės, veikiant gaisro temperatūrai, apskaičiuojamos pagal – priklausomybę, kaip parodyta 5 pav., remiantis rekomendacijomis [1].

Armatūrinio plieno priklausomybė  $\sigma - \epsilon$  charakterizuojama trimis parametrais: tamprumo moduliu  $E_{s,\theta}$ , porcingumo riba  $f_{sp,\theta}$ , ribiniais įtempiais  $f_{yp,\theta}$ .



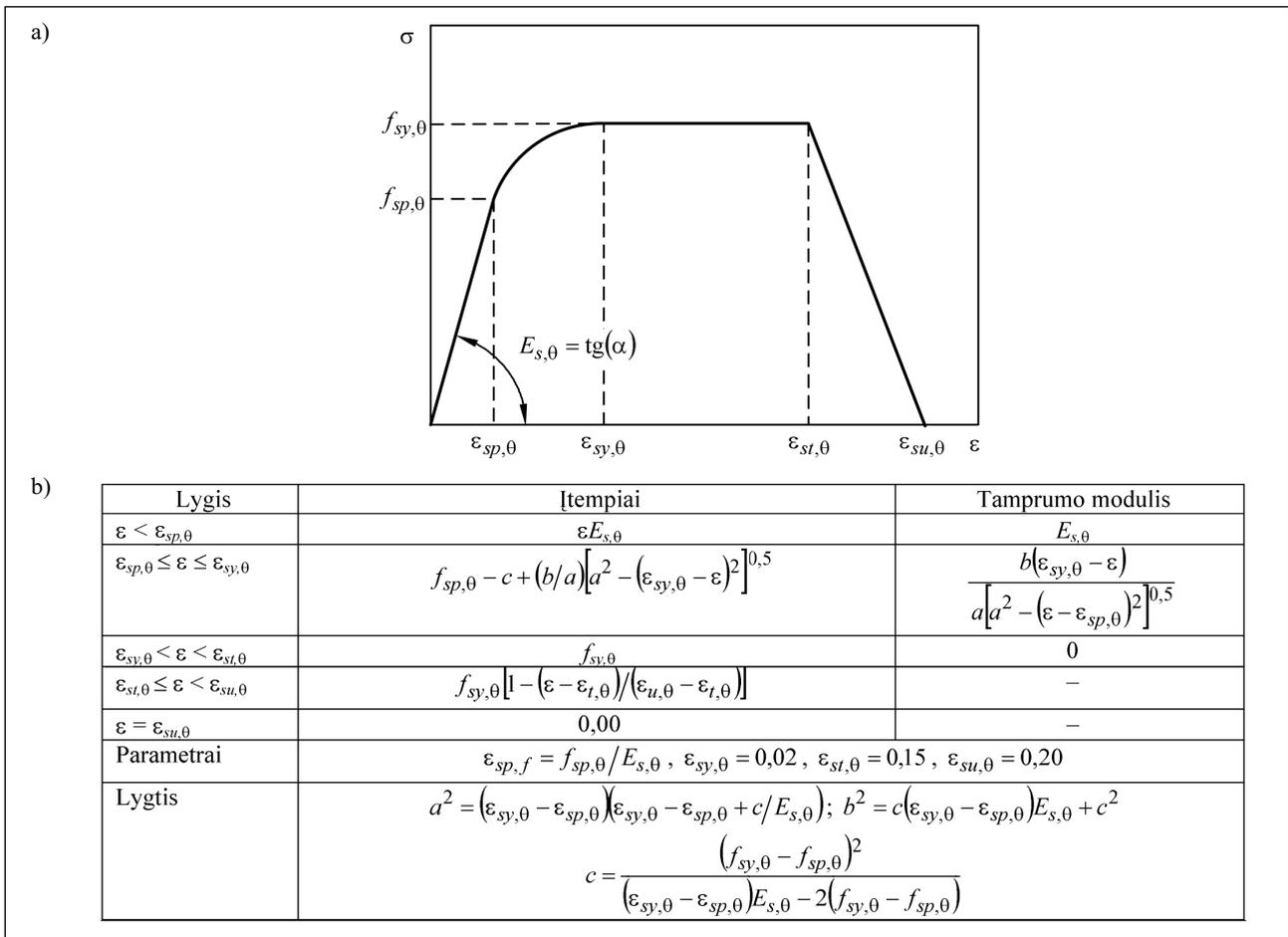
3 pav. Gniuždomojo betono, veikiant gaisro temperatūrai,  $\sigma - \epsilon$  diagrama

Fig 3. Diagram  $\sigma - \epsilon$  for concrete subjected to compression and exposed to fire temperature



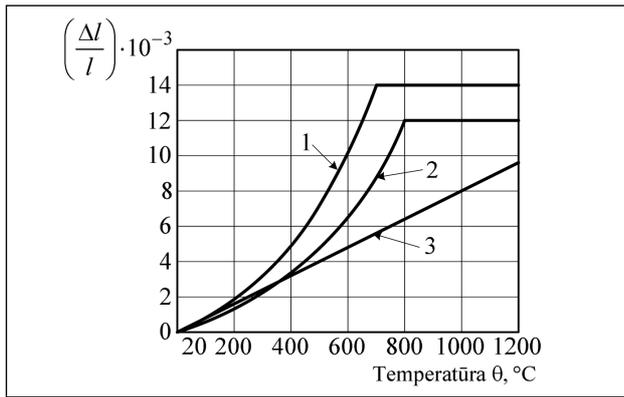
4 pav. Betono tempiamojo stiprio sumažinimo koeficiento  $k_{ck,t}(\theta)$  priklausomybė nuo gaisro temperatūros

Fig 4. Relationship between coefficient  $k_{ck,t}(\theta)$  for reduction of concrete tension strength and fire temperature



5 pav. Paprastosios ir įtemptosios armatūros  $\sigma - \epsilon$  diagrama (a) ir plieno matematinis modelis (b) veikiant gaisro temperatūrai (įtemptoji armatūra vietoje „s“ žymima „p“)

Fig 5. Diagram  $\sigma - \epsilon$  for non-prestressed and prestressed reinforcement (a) and mathematical model for steel (b) exposed to fire temperature (prestressed reinforcement is noted by „p“ instead of „s“ )



**6 pav.** Bendras betono plėtimasis dėl gaisro temperatūros poveikio: 1 – normalūs užpildai; 2 – kalkakmenio užpildai; 3 – lengvasis betonas

**Fig 6.** General expansion of concrete due to fire temperature: 1 – normal aggregates; 2 – limestone aggregates; 3 – lightweight concrete

Įtemptosios armatūros stiprio ir deformacijų savybės, veikiant gaisro temperatūrai, apskaičiuojamos taikant tą patį matematinį modelį kaip armatūriniam plienui.

Betono deformacijos, veikiant gaisro temperatūrai,  $\epsilon_{c,(\theta)}$  nustatomas taikant empirines priklausomybes, gautas eksperimentiniu būdu pagal rekomendacijas [1]. Betono plėtimosi variantai dėl gaisro temperatūros poveikio pateikti 6 pav.

Paprastojo betono deformacijos, veikiant gaisro temperatūrai

$$\epsilon_{c,(\theta)} = -1,8 \cdot 10^{-4} + 9 \cdot 10^{-6} \theta + 2,3 \cdot 10^{-11} \theta^3,$$

kai  $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

$$\epsilon_{c,(\theta)} = 14 \cdot 10^{-3}, \text{ kai } 700 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Lengvojo betono deformacijos, veikiant gaisro temperatūrai,

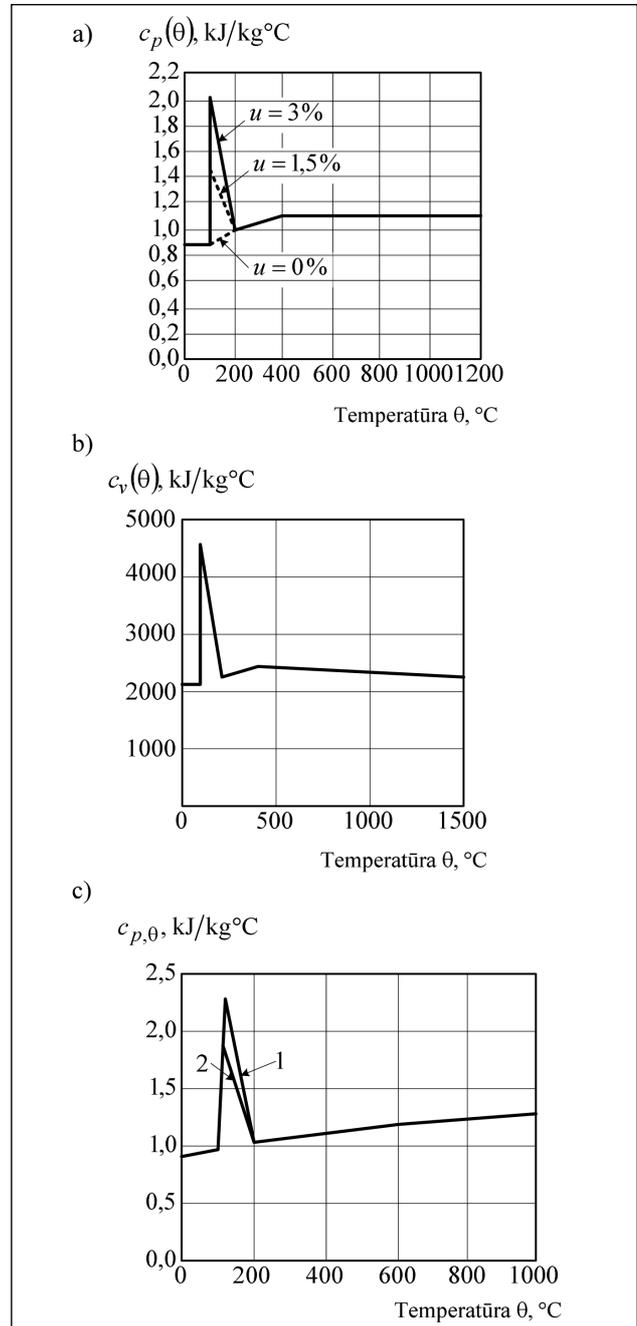
$$\epsilon_{c,(\theta)} = 8 \cdot 10^{-6} (\theta - 20),$$

kai  $20 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , čia  $\theta$  yra betono temperatūra ( $^\circ\text{C}$ ). Maksimali standartinio gaisro temperatūra ant elemento paviršiaus –  $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Pagrindinės betono šiluminės savybės: betono specifinė (savitoji) šiluma  $c_{p\theta}$ , kuri siejama su drėgmės kiekiu betone ir jo tankiu  $\rho_\theta$  bei betono šiluminis laidumas  $\lambda_c$ . Sausojo betono specifinės šilumos  $c_{p\theta}$  priklausomybė nuo gaisro temperatūros, esant skirtingiems betono drėgmės  $u$  kiekiams, ir tūrinės specifinės šilumos  $c_v = \rho_\theta \cdot c_{p\theta}$  kitimas pateikti 7 pav. Jei drėgmės kiekis betone nėra tiksliai žinomas, paprasto betono ar betono su kalkakmenio užpildais specifinės šilumos funkcija gali būti apskaičiuojama pagal aukščiausią vertę, t. y. nuo  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  ir  $115 \text{ }^\circ\text{C}$ , pavyzdžiui:  $c_{p,peak} = 1470 \text{ J/kgK}$ , kai drėgmės kiekis sudaro 1,5 % betono svorio;  $c_{p,peak} = 2020 \text{ J/kgK}$ , kai drėgmės kiekis sudaro 3,0 % betono svorio. Specifinės šilumos  $c_{p,peak}$

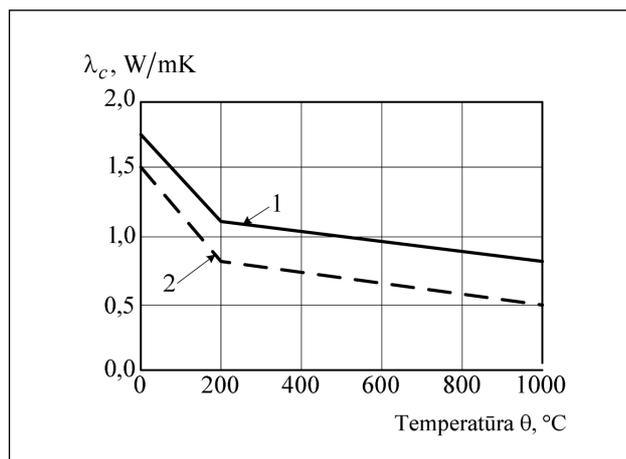
aukščiausios vertės pateiktos 7 pav., a.

Betono, veikiamo gaisro temperatūros, tankis priklauso nuo išdžiūvimo. Paprastojo betono, kurio drėgmės kiekis sudaro 3 % svorio, o tankis –  $2300 \text{ kg/m}^3$ , tankio ir specifinės šilumos pokyčiai  $c_{p\theta}$  yra pavaizduoti 7 pav., b.



**7 pav.** Normalaus betono specifinės šilumos  $c_{p\theta}$  priklausomybė nuo gaisro temperatūros esant skirtingiems betono drėgmės  $u$  kiekiams (a) ir tūrinės specifinės šilumos  $c_v = \rho_\theta \cdot c_{p\theta}$  (b) kitimas, kai  $u = 3$  ir  $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ ; stipriojo betono specifinė šiluma  $c_{p\theta}$ , esant santykinei drėgmei: 1–40 %; 2–60 % (c)

**Fig 7.** Relationship between specific heat  $c_{p\theta}$  of normal concrete and fire temperature at different moisture contents  $u$  in concrete (a) and variation of volumetric specific heat  $c_v = \rho_\theta \cdot c_{p\theta}$  (b) when  $u = 3$  and  $\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$ ; specific heat  $c_{p\theta}$  of high strength concrete when relative moisture: 1–40 %; 2–60 % (c)



**8 pav.** Normalaus ir stipriojo betono šiluminis laidumas  $\lambda_c$  veikiant gaisro temperatūroms: 1 – stiprusis betonas; 2 – normalus betonas

**Fig 8.** Thermal conductivity  $\lambda_c$  of normal and high strength concrete exposed to fire temperatures: 1 – high strength concrete; 2 – normal weight concrete

Betono šiluminio laidumo  $\lambda_c$  kitimas, atsižvelgiant į gaisro temperatūrą, pateiktas 8 pav.

Pagal rekomendacijas [1] betono šiluminis laidumas  $\lambda_c$ , atsižvelgiant į gaisro temperatūrą, apskaičiuojamas taip:

$$\lambda_c = 1,5 - 0,7(\theta - 20)/180, \text{ kai } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C};$$

$$\lambda_c = 0,8 - 0,3(\theta - 200)/800, \text{ kai } 200^\circ\text{C} < \theta \leq 1000^\circ\text{C};$$

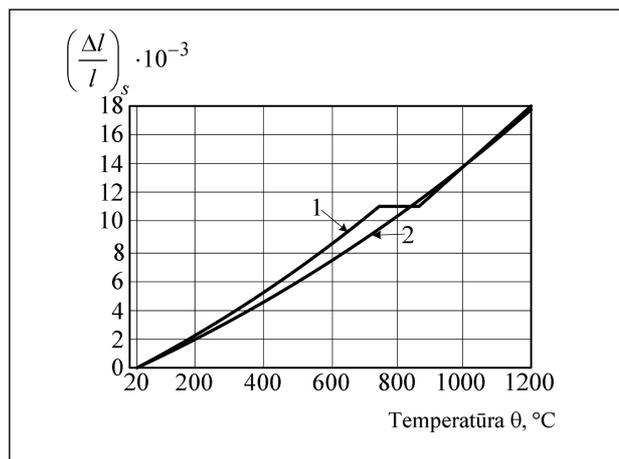
$$\lambda_c = 0,5, \text{ kai } 1000^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C}.$$

Plieno deformacijos dėl temperatūros poveikio  $\varepsilon_{s,\theta}$ , kai standartinė aplinkos temperatūra yra  $20^\circ\text{C}$ , gali būti nustatytos taikant 9 pav. pateiktus plieno deformacijų priklausomybės nuo gaisro temperatūros grafikus [1].

#### 4. Konstrukcijų skaičiavimo metodai

Elementams skaičiuoti, veikiant gaisro temperatūroms, taikomi alternatyvūs konstrukcijų skaičiavimo metodai: taikant lentelių duomenis – tai detalizavimas pagal pripažintus skaičiavimo metodus, kai duomenys pateikiami lentelėse; paprastieji skaičiavimo metodai taikomi tik tam tikriems konstrukciniams elementams, veikiant tik lenkimo momentams ir ašinėms jėgoms (dėl sukimo ir šlyties vis dar vyksta diskusijos); bendrieji skaičiavimo metodai modeliuoja elementų, konstrukcijos dalių ar visos konstrukcijos elgseną, veikiant gaisro temperatūroms [1, 3].

Reikia imtis priemonių, kad būtų išvengta betono atskilimo ir atsižvelgti į betono atskilimo poveikį naudojimo reikalavimams  $R$  ir (arba)  $EI$ . Būtina įvertinti elementų, armuotų įtemptą armatūra, iš lynų tolydžios irties riziką, galinčią kilti dėl per didelio plieno plėtimosi, veikiant temperatūrai, taip pat privalu imtis ypatingų priemonių standaus įtvirtinimo vietoms apsaugoti nuo temperatūros poveikio.



**9 pav.** Plieno temperatūrinių deformacijų grafikas: 1 – armatūrinis plienas; 2 – įtemptoji armatūra

**Fig 9.** Graph of temperature deformations for steel: 1 – reinforcing non-prestressed steel; 2 – prestressed reinforcement

*Lentelių duomenys.* Lentelės sudarytos empiriškai, patvirtintos patirtimi ir teoriniais atliktų bandymų vertinimais. Skaičiavimui taikomi standartiniams gaisrai iki 240 minučių. Lentelėse pateikti duomenys taikomi paprastam betonui (nuo 2000 iki 2600 kg/m<sup>3</sup>), pagamintam su normaliais užpildais. Kai sijose ir plokštėse naudojamas betonas su kalkakmenio užpildais, minimalūs jo skerspjūvio matmenys arba armatūros centro atstumas iki skerspjūvio krašto  $a$  turėtų būti mažinami 10 %. Šutinto betono su lengvaisiais užpildais, kurio tankis iki 1200 kg/m<sup>3</sup>, šios vertės sumažinamos 20 %, išskyrus nelaikančiąsias sienas. Skaičiuojant, kai tankis yra nuo 1200 kg/m<sup>3</sup> ir 2000 kg/m<sup>3</sup>, galima taikyti tiesinės interpoliacijos metodą.

Kai naudojamos lentelių duomenimis, nereikalaujama atlikti jokių tolesnių šlyties ir sukimosi gebos, taip pat inkarinio įtvirtinimo elementų skaičiavimų, taip pat nereikalaujama atlikti jokių tolesnių atskilimo tyrimų, išskyrus paviršiaus armatūros. Sandarumo  $E$  ir izoliavimo  $I$  savybės yra tinkamos, kai sienų storis yra ne mažesnis už pateiktą lentelėse.

Įvykdžius mažiausiųjų skerspjūvio matmenų ir armatūros centro atstumo iki skerspjūvio krašto reikalavimus, nustatytus lentelėse, atlaikymo funkcija  $R$  bus pakankama ir galios sąlyga (1).

Lentelių duomenys pagrįsti skaičiuojamosios apkrovos lygio sumažėjimo veiksmu, kilus gaisrai,  $\eta_{fi} = 0,7$ , nebent atitinkamuose punktuose būtų numatyta kitaip.

Lenkiamųjų elementų tempiamosiose zonose esančio plieno apsaugai garantuoti būtini lentelių duomenys grindžiami kritiškąja plieno temperatūra  $\theta_{cr} = 500^\circ\text{C}$ . Ši prielaida apytiksliai atitinka  $E_{d,fi} = 0,7E_d$  ir  $\gamma_p = 1,15$ .

Iš anksto įtemptų strypų plieno kritinė temperatūra yra lygi  $400^\circ\text{C}$ , o lynų ir vielų –  $350^\circ\text{C}$ . Kai neatliekami tem-

piamųjų elementų, sijų ar plokščių patikrinamieji skaičiavimai, armatūros centro atstumas iki skerspjūvio krašto  $a$  turi būti padidintas iš anksto įtemptų strypų – 10 mm, iš anksto įtemptųjų vielų ir lynų – 15 mm.

Kai kritinė temperatūra nelygi 500 °C, lentelėse pateikti armatūros centro atstumai iki skerspjūvio krašto turi būti modifikuojami.

Kai temperatūra yra mažesnė ar viršija šias ribas (350 °C <  $\theta_{cr}$  < 700 °C), norint gauti tikslesnius temperatūros rezultatus, būtina atlikti temperatūrinius skaičiavimus.

*Paprastieji skaičiavimo metodai.* Norint nustatyti gaisro temperatūros veikiamo skerspjūvio ribinį atsparumą ir palyginti jį atitinkamais poveikių deriniais, gali būti taikomi paprastieji skaičiavimo metodai. Gaisro ugnies veikiamo konstrukcijų betono temperatūra nustatoma bandymais arba skaičiavimais.

Paprastuoju skaičiavimo modeliu nustatoma kaitinamo skerspjūvio laikomoji geba. Šis metodas tinka konstrukcijoms, paveiktoms standartinio gaisro iki maksimalios gaisro temperatūros. Metodas taip pat tinka skaičiuoti laikomajai gebai pasirinktuoju laiko momentu bet kokio kito gaisro atveju, jeigu temperatūros profiliai (laukai), atitinkantys tą laiko momentą, yra žinomi arba apskaičiuoti, o medžiagų savybės yra žinomos. Iš pradžių nustatomi temperatūrų laukai skerspjūviuose, tada sumažinamas skerspjūvis, betono ir armatūros stipris, tamprumo modulis ir galiausiai apskaičiuojama laikomoji geba, įvertinant sumažintą skerspjūvį, vadovaujantis rekomendacijų [1] bei reglamento [3] reikalavimais. Elementai turi būti sukonstruoti taip, kad ne-

atplyštų apsauginis betono sluoksnius. Elemento suirimo dėl betono sprogo, armatūros inkaravimo pažeidimo arba nepakankamos gebos sukimo momentui atlaikyti tikimybė būtų mažesnė, negu suirimo dėl lenkimo momento, skersinės arba išilginės jėgos veikimo.

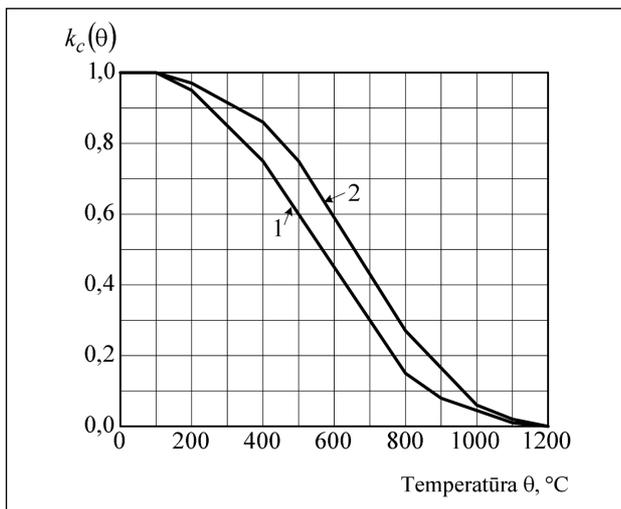
Gaisro veikiamose gelžbetoninėse konstrukcijose temperatūrų pasiskirstymas gali būti nustatomas bandymais arba skaičiavimais. Reglamento [3] 1 priede pateikti temperatūrų laukai naudojami, kai tikslesnės informacijos gauti nėra galimybės. Šie laukai tinka normaliam sunkiajam betonui, veikiamam standartinio gaisro. Šie laukai gana gerai tinka ir esant daugeliui kitos rūšies betono užpildų, bet tik esant standartiniam gaisrui.

Betono charakteristinis gniuždomasis stipris  $f_{ck}$ , veikiant gaisro temperatūrai  $\theta$ , nustatomas taikant redukavimo koeficientą  $k_{c(\theta)}$  pagal 10 pav. pateiktą grafiką.

Armatūrinio plieno charakteristinio stiprio  $f_{yk}$  vertės atsižvelgiant į gaisro temperatūrą  $\theta$ , gali būti nustatomos pagal 11 ir 12 pav. grafikus atitinkamai paprastajai ir įtemptajai armatūrai.

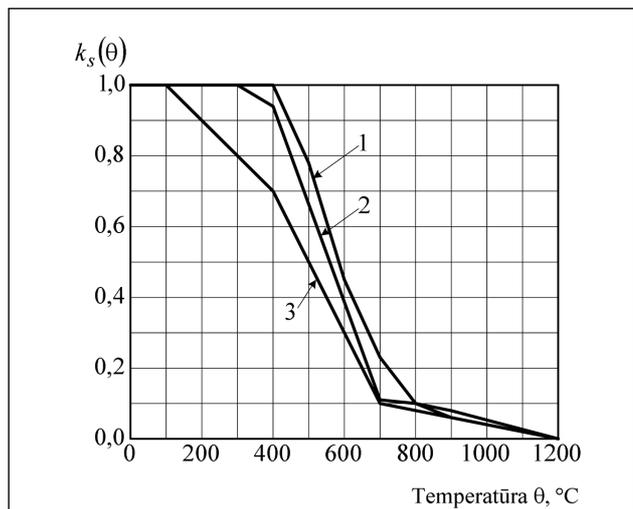
Teigiama, kad stačiakampio skerspjūvio gniuždomosiose zonose izotermos yra lygiagrečios su skerspjūvio šonais. Gaisro pažeistas skerspjūvis yra vaizduojamas sumažintu skerspjūviu, kuriame betonas laikomas vienodai pažeistas. Skerspjūvis sumažinamas atmetant pažeistas zonas, kurių storis lygus  $a_z$  ties tais paviršiais, kurie veikiami gaisro.

Sumažinto skerspjūvio betono gniuždomasis stipris ir tamprumo modulis laikomas lygus apskaičiuotajam taške  $M$ . Taškas  $M$  yra ekvivalentinis zonos viduryje.



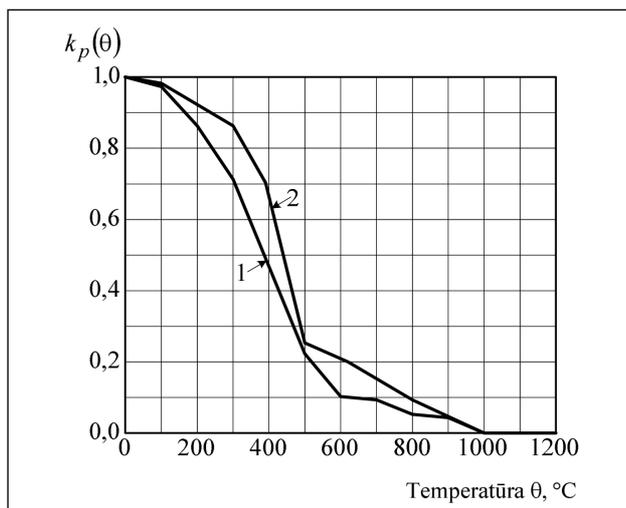
**10 pav.** Betono charakteristinio stiprio  $f_{ck}$  redukavimo koeficiento  $k_{c(\theta)}$  priklausomybės nuo gaisro temperatūros grafikai betonui su silicio užpildu (1) ir kalkakmenio užpildu (2)

**Fig 10.** Graphs expressing relationship between the coefficient  $k_{c(\theta)}$  for reduction of characteristic concrete strength  $f_{ck}$  and the fire temperature for concrete with silicon aggregate (1) and limestone aggregate (2)



**11 pav.** Paprastosios armatūros charakteristinio stiprio  $f_{yk}$  redukavimo koeficiento  $k_{s(\theta)}$  priklausomybė nuo temperatūros  $\theta$ : 1 – karštai valcuoto plieno, kai  $\epsilon_{s,fi} \geq 2\%$ ; 2 – šaltai valcuoto plieno, kai  $\epsilon_{s,fi} \geq 2\%$ ; 3 – gniuždomosios ir tempiamosios armatūros, kai  $\epsilon_{s,fi} < 2\%$

**Fig 11.** Relationship between the coefficient  $k_{s(\theta)}$  for reduction of characteristic strength  $f_{yk}$  of non-prestressed reinforcement and temperature  $\theta$  when: 1 – for hot-rolled steel when  $\epsilon_{s,fi} \geq 2\%$ ; 2 – for cold-rolled steel when  $\epsilon_{s,fi} \geq 2\%$ ; 3 – for tension and compression reinforcement when  $\epsilon_{s,fi} < 2\%$



**12 pav.** Įtemptosios armatūros charakteristinio stiprio vertės  $0,9f_{pk}$  redukavimo koeficiento  $k_{p(\theta)}$  priklausomybė nuo temperatūros  $\theta$ : 1 – vielų ir lynų; 2 – strypų

**Fig 12.** Relationship between coefficient  $k_{p(\theta)}$  for reduction of characteristic strength value  $0,9f_{pk}$  for prestressed reinforcement and temperature  $\theta$ : 1 – for wires and strands; 2 – for bars

Iš abiejų šonų veikiamo gaisro betono sumažintas gniuždomasis stipris  $f_{cd}$ ,  $M$  taške  $M$  nustatomas taip:

$$f_{cd, \theta M} = k_c(\theta_M) f_{ck}(20^\circ \text{C}), \quad (4)$$

čia  $M$  – temperatūra taške  $M$ .

Skaičiuotinis betono gniuždomasis stipris apskaičiuojamas pagal formulę

$$f_{cd}(\theta) = k_c(\theta) f_{ck}(20^\circ \text{C}). \quad (5)$$

Sumažėjęs betono tamprumo modulis šiame taške:

$$E_{cd, \theta M} = (k_c(\theta_M))^2 E_{ck}(20^\circ \text{C}). \quad (6)$$

Armatūra įvertinama, atsižvelgiant į jos sumažintą stiprį pagal kiekvieno strypo temperatūrą.

*Bendrieji skaičiavimo metodai* gali būti taikomi atskiriems konstrukcijų elementams, konstrukcijų dalims ar visoms konstrukcijoms, taip pat bet kurio tipo skerspjūviams. Šie metodai turi užtikrinti realią gaisro veikiamų konstrukcijų analizę. Jie turi būti grindžiami pagrindine fizine konstrukcijų būkle, numatant patikimą galimos ugnies veikiamo atitinkamo konstrukcijos elemento būklės aproksimaciją. Metodai pagrįsti nusistovėjusiais plieno ir betono terminiais bei mechaniniais modeliais, mokslininkų patvirtintais ir tinkamais toms betono bei plieno medžiagoms, kurios bus naudojamos skaičiuoti.

Bendrieji skaičiavimo metodai gali apimti atskirus modelius, kuriais būtų siekiama nustatyti:

- temperatūros raidą ir pasiskirstymą konstrukcijos elementuose;
- konstrukcijos ar bet kurios jos dalies mechaninę būklę.

Tam tikromis priemonėmis turi būti atmetas bet koks

galimas suirimo pobūdis, kurio neapima bendrasis skaičiavimų metodas (pvz., nepakankama sukamoji geba, atskilimas, gniuždomosios armatūros išklupimas, šlytis ar atramų suirimas, atramų sugadinimas). Bendrasis skaičiavimų metodas gali būti taikomas kartu su bet kokia temperatūrų kreive, galiojant sąlygai, kad medžiagų savybės atitiktų atitinkamos temperatūros diapazoną ir atitinkamą kaitimo intensyvumą.

Temperatūrų pasiskirstymo apskaičiavimo metodai turi būti pagrįsti pripažintais šilumos perdavimo teorijos principais bei prielaidomis. Skaičiavimo modelyje būtina atsižvelgti į šilumos poveikio tipus, šiluminės medžiagų savybes, apsauginių sluoksnių įtaką. Į drėgmės kiekio ir drėgmės judėjimo betone ar apsauginiuose sluoksniuose, jei tokie yra, įtaką galima ir neatsižvelgti. Temperatūros laukai gelžbetonio konstrukcijų elementuose gali būti vertinami atskirai nuo armatūros. Kai būtina, reikėtų atsižvelgti į netolygų šilumos poveikį ir šilumos perdavimo įtaką gretimoms pastato konstrukcijoms.

Bendrieji mechaninės elgsenos skaičiavimo metodai turi būti pagrįsti pripažintais statybinės mechanikos teorijos principais bei prielaidomis, atsižvelgiant į mechaninių savybių pokyčius dėl temperatūros. Skaičiavimo metodikoje leistinosios deformacijos turėtų būti apribojamos pagal poreikius, siekiant užtikrinti suderinamumą tarp visų konstrukcijos dalių. Prireikus būtina įvertinti geometrinį netiesiškumą.

Temperatūrinės deformacijos ir įtempiai turi būti nustatomi dėl temperatūros didėjimo ir dėl temperatūros gradientų.

Suminė deformacija nustatoma taip:

$$\varepsilon = \varepsilon_{th} + \varepsilon_{load} + \varepsilon_{creep} + \varepsilon_{tr}, \quad (7)$$

čia  $\varepsilon_{th}$  – temperatūros sukelta deformacija;  $\varepsilon_{load}$  – apkrovų sukelta deformacija;  $\varepsilon_{creep}$  – valkšnumo deformacija;  $\varepsilon_{tr}$  – kintamoji deformacija.

Atliekant skaičiavimus, deformacijos ir antriniai poveikiai, kilus gaisrui, gali būti modeliuojami elementų ašies pailgėjimu ir kreiviu.

Elementų konstrukcijos dalių arba visos konstrukcijos laikomoji galia, esant gaisrui, gali būti skaičiuojama taikant plastinius analizės metodus.

Gelžbetoninių elementų skerspjūvių plastinių lankstų susidarymas įvertinamas, atsižvelgiant į didesnes ribines betono ir armatūros deformacijas  $\varepsilon_{cu}$  ir  $\varepsilon_{su}$  karščio sąlygomis.

Skerspjūvio gniuždomoji zona, ypač kai ji tiesiogiai veikiama gaisro (pavyzdžiui, esant neigiamiesiems lenkimo momentams nekarpytosiose sijose), turi būti patikrinta ir sukonstruota, atsižvelgiant į galimą apsauginio betoninio sluoksnio atskilimą.

Atliekant elementų arba konstrukcijos dalių analizę, ypač daug dėmesio turi būti skiriama kraštinėms sąlygoms, nes svarbu išvengti suirimo dėl galimo kraštinių sąlygų, kilus gaisrui, pasikeitimo.

*Šlytis, sukimas ir inkaravimas.* Konstrukcija geba atlaikyti šlytį ir sukimą bei inkaravimo reikalavimai apskaičiuojami imant sumažintas medžiagų savybių vertes. Daroma prielaida, kad konstrukcijų geba atlaikyti šlytį ir sukimą bei inkaravimo reikalavimai bus pakankami, mažiausius skerspjūvio matmenis ir armatūros atstumą iki skerspjūvio krašto parinkus pagal lentelių duomenis.

*Atskilimas.* Būtina vengti sprogstamojo atskilimo arba būtina atsižvelgti į sprogstamojo atskilimo poveikį naudojimo kriterijams  $R$  ir (arba)  $EI$ . Kai drėgmės kiekis betone sudaro mažiau negu 3 % bendro svorio, tikimybė, kad įvyks sprogstamasis atskilimas, maža. Kai drėgmės kiekis viršija 3 %, būtina atlikti tiksliau įvertinti drėgmės kiekį, užpildo tipą, betono pralaidumą ir įkaitimo intensyvumą.

Daroma prielaida, kad jei konstrukcijų elementai skaičiuojami kaip priskirtini klasėms  $XO$  ir  $XC1$ , drėgmės kiekis tuose elementuose yra mažesnis negu 3 % bendro svorio.

Kai kurių rūšių betonui su lengvaisiais užpildais itin būdingas sprogstamasis atskilimas. Tokiam betonui būtini atitinkamų atsparumo ugniai bandymų dokumentai, kuriuose būtų nurodytas minimalus konstrukcinio elemento dydis ir papildomos apsaugos priemonės.

Sprogstamojo atskilimo įtaka kriterijui  $R$  gali būti įvertinta darant prielaidą, kad apsauginis armatūros sluoksniu tam tikrose vietose nukris ir apskaičiuojant sumažintą laikinąją gebą. Toks vertinimas nebūtinai tiems konstrukciniams elementams, kurių būklė sprogstamųjų atskilimų atžvilgiu buvo patikrinta bandymais ir kuriems taikoma bandymais patvirtinta papildoma apsauga.

Esant gana dideliame armatūros strypų skaičiui, daroma prielaida, kad galimas įtempių persiskirstymas elemento skerspjūvyje, neprarandant laikomosios gebos  $R$ . Šis principas taikomas monolitiniams plokštėms su tolygiai paskirstytais strypais ir didesnio negu 400 mm pločio sijoms su daugiau negu 8 strypais tempiamojoje zonoje.

Būtina vengti betono atskilimo vėlesnėse gaisro stadijose arba reikia į tai atsižvelgti, nustatant naudojimo reikalavimus  $R$  ir (arba)  $EI$ .

Tais atvejais, kai betono apsauginio sluoksnio storis yra 70 mm ir didesnis, o bandymai, įrodantys, kad betonas neatskils, atlikti nebuvo, būtina įrengti paviršiaus armatūrą. Paviršiaus armatūros tinklas turi būti ne retesnis negu 100 mm (atstumas tarp strypų), strypo skersmuo – ne mažesnis negu 4 mm.

*Sandūros.* Sandūrų skaičiavimas turi būti pagrįstas bendru konstrukcijos būklės įvertinimu gaisro metu. Sandūros konstruojamos taip, kad atitiktų  $R$  ir  $EI$  kriterijus, taikomus konstrukciniams sandūrų elementams, siekiant užtikrinti bendrą konstrukcijos stabilumą.

*Apsauginiai sluoksniai.* Reikiamas atsparumas ugniai gali būti pasiekiamas naudojant tinkamus apsauginius sluoksnius.

Apsauginių sluoksnių medžiagų savybės ir naudojimo duomenys įvertinami taikant atitinkamą bandymo procedū-

lą. Kita alternatyva – pagal bendrąjį skaičiavimų metodą atlikti terminę analizę.

## 5. Stiprusis betonas

Konstrukciniai elementai iš stipriojo betono, veikiant gaisro temperatūrai, apskaičiuojami pagal šios klasės betono charakteristikas, atsižvelgiant į atskilimo riziką. Charakteristikos ir rekomendacijos dėl atskilimo taikomos šiems dviem stipriojo betono klasių tipams  $C \geq 55/67$  iki  $C \leq 80/95$  ir  $C > 80/95$  iki  $C \leq 90/105$  ir pateikiamos tik ugnies poveikiui pagal standartinę temperatūros ir laiko grafiką.

*Atskilimas.* Betono klasės  $C > 80/95$  iki  $C \leq 90/105$  turi atskilimo riziką, todėl būtina užtikrinti bent vieną iš tokių sąlygų: numatytas armatūros tinklas; betonas turi būti toks, kuris pagal vietos praktiką ir atliktus bandymus, kilus gaisrui, neatskils; turi būti įrodyta, kad šio betono apsauginiai sluoksniai kilus gaisrui, neatskils; betono mišinyje turi būti daugiau negu  $2 \text{ kg/m}^3$  propileno monoplūšto.

### Šiluminės savybės

Specifinė (savitoji) išdžiovinto betono šiluma gali būti apskaičiuojama pagal šią formulę:

$$c_{p,\theta} = 900 + 80 \frac{\theta}{120} - 4 \left( \frac{\theta}{120} \right)^2, \text{ J/(kgK)}. \quad (8)$$

Siekiant išgarinti vandenį iš betono, būtina papildoma šiluma. Kai, skaičiuojant šilumos ir masės pusiausvyrą, į drėgmės kiekį betone neatsižvelgiama, šis veiksnys įtraukiamas, įterpiant aukščiausią kreivės tašką, kai specifinė šiluma nuo 100 iki 200 °C (7 pav., c).

Stipriojo betono, kurio  $V/C = 0,3$ , silicio mikrodalelių ir cemento santykis – 0,1, o santykinė drėgmė – 40 %, išgarinamos drėgmės kiekis pagal masę apytiksliai yra 0,105. Atitinkama vertė, esant 60 % santykinei drėgmei, lygi 0,155.

Atliekant preliminarinius skaičiavimus pagal standartinę temperatūros ir laiko grafiką, temperatūrų laukai imami pagal eksperimentinių tyrimų grafikus.

Kolonų ir sienų iš stipriojo betono laikomoji galia skaičiuojama veikiant gaisro temperatūroms, taikant skerspjūvio sumažinimo metodą.

Skaičiuojant reikiamą skerspjūvį, sumažintas betono storis turi būti lygus 500 °C izotermos vidurinei vertei  $a_{500}$ , padidintai 35 %. Dėl šio didinimo vidutinė 500 °C izotermos vertė vidutiniškai pavirsta į 400 °C tą pačią izotermos vertę.

Lentelių duomenys kolonomis ir sienoms gali būti taikomi ir elementams iš stipriojo betono skaičiuoti, tačiau atstumas  $a$  sumažinamas 35 %.

Sijų ir plokščių iš stipriojo betono laikomoji galia veikiant gaisro temperatūroms, skaičiuojama sumažinant elementų laikomąją galią pagal tokią formulę:

$$M_{d,fi} = M_{500} \cdot \eta, \quad (9)$$

čia  $M_{d,fi}$  – skaičiuojamas atlaikymo momentas gaisro metu;  $M_{500}$  – atitinkamo skerspjūvio atlaikymo momentas pagal 500 °C izotermą;  $\eta$  – sumažinimo koeficientas. Kai plokštės storis – nuo 50 iki 120 mm, veikiant ugniai tempimo pusėje, sumažinimo koeficientas gaunamas tiesinės interpoliacijos būdu.

Lentelių duomenys sijoms ir plokštėms taip pat gali būti taikomi ir stipriojo betono konstrukciniams elementams, atstumą  $a$  mažinant 10 %.

## 6. Išvados

1. Atliekant konstrukcijų dalies skaičiavimus, ta konstrukcijos dalis, kurios analizė atliekama, turi būti modeliuojama remiantis galimu jos šiluminiu plėtimusi ir deformacijomis. Nagrinėjamos pagrindinės betono šiluminės savybės: betono specifinė (savitoji) šiluma ir betono šiluminis laidumas.

2. Konstrukcijų atsparumas ugniai nustatomas taikant vieną iš alternatyvų: elemento skaičiavimo, konstrukcijos dalies skaičiavimo ir visos konstrukcijos skaičiavimo. Realizuojama taikant lentelių duomenis, paprastus ir bendrojo skaičiavimo modelius.

3. Betono charakteristinis gniuždomasis stipris  $f_{ck}$  ir armatūrinio plieno charakteristinis stipris  $f_{yk}$ , veikiant gaisro temperatūrai  $\theta$ , nustatomi taikant atitinkamus redukavimo koeficientus  $k_{c(\theta)}$  ir  $k_{s(\theta)}$ .

4. Konstrukcijų geba atlaikyti šlytį ir sukimą bei inkaravimo reikalavimai apskaičiuojami imant sumažintas medžiagų savybių vertes. Daroma prielaida, kad konstrukcijų geba atlaikyti šlytį ir sukimą bei inkaravimo reikalavimai bus pakankami, mažiausius skerspjūvio matmenis ir armatūros atstumą iki skerspjūvio krašto parinkus pagal lentelių duomenis.

5. Būtina vengti sprogstamojo atskilimo arba būtina atsižvelgti į sprogstamojo atskilimo poveikį naudojimo kriterijams  $R$  ir (arba)  $EI$ . Sprogstamojo atskilimo įtaka kriterijui  $R$  gali būti įvertinta darant prielaidą, kad apsauginis armatūros sluoksnis tam tikrose vietose nukris, ir apskaičiuojant sumažintą laikančiąją gebą. Taip vertinti nebūtina tų konstrukcijų elementų, kurių būklė sprogstamųjų atskilimų atžvilgiu buvo patikrinta bandymais ir kuriems taikoma bandymais patvirtinta papildoma apsauga.

6. Sandūrų skaičiavimas turi būti pagrįstas bendru konstrukcijos būklės įvertinimu gaisro metu. Sandūros konstruojamos taip, kad atitiktų  $R$  ir  $EI$  kriterijus, taikomus kon-

strukciniams sandūrų elementams, siekiant užtikrinti bendrą konstrukcijos stabilumą.

7. Konstrukciniai elementai iš stipriojo betono, veikiant gaisro temperatūrai, apskaičiuojami pagal šios klasės betono charakteristikas, atsižvelgiant į atskilimo riziką. Charakteristikos ir rekomendacijos dėl atskilimo taikomos šiems dviem stipriojo betono klasių tipams  $C \geq 55/67$  iki  $C \leq 80/95$  ir  $C > 80/95$  iki  $C \leq 90/105$  ir pateikiamos tik ugnies poveikiui pagal standartinę temperatūros ir laiko grafiką.

## Literatūra

1. EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2. Design of concrete structures – Part 1.2: General rules – Structural fire design. 102 p.
2. Fire safety. Basic requirements (Gaisrinė sauga. Pagrindiniai reikalavimai). Technical regulation for construction. Reference No. STR 2.01.04:2004 Ministry of Environment of LR, 2004. 45 p. (in Lithuanian).
3. Reinforced concrete structures subjected to the action of fire temperatures (Gaisro temperatūrų veikiamų gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas). Technical regulation for construction. Reference No. STR 2.05.11:2005 Ministry of Environment of LR, 2005. 30 p. (in Lithuanian).
4. Jonaitis, B.; Papinigis, V. Mechanical properties of concrete after long-term action of loads and fire temperatures. Application of Codes, Design and Regulations. In: *Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee*, Scotland, UK on 5-7 July, 2005, p. 395–402.
5. Wetzig, V. Influences on the fire resistance of concrete. Application of Codes, Design and Regulations. In: *Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee*, Scotland, UK on 5–7 July 2005, p. 367–374.
6. Bačinskas, D.; Kaklauskas, G.; Geda, E. FE Software ATENA application to non-linear analysis of RC beams subjected to high temperatures. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol X, Suppl 1, 2004, p. 11–18 (in Lithuanian).
7. Sakr, K.; El-Hakim, E. Effects of high temperature or fire on heavy weight concrete properties. *Cement and Concrete Research*, No 35, 2005, p. 590–596.
8. Li, Min; ChunXiang, Qian; Wei, Sun. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and Concrete Research*, No 34, 2004, p. 1001–1005.
9. Iianzhuag, Xiao; Konig, Gert. Study on concrete at high temperature in China an overview. *Fire Safety Journal*, Vol 39, Issue 1, 2004, p. 89–103.
10. Kerem Peker and Bekir Pekmerci. Damage Analysis for a Fire Exposed Industrial Building. *Structural Engineering International*, Vol 14, No 1, 2004, p. 245–248.
11. Jonaitis, B.; Papinigis, V. Effect of long-term loading and fire temperatures on mechanical properties of concrete. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol XI, No 4, 2005, p. 283–288 (in Lithuanian).

**BRONIUS JONAITIS.** Doctor, Associate Professor. Dept of Reinforced Concrete and Masonry Structures. Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania. E-mail: gelz@st.vtu.lt

Doctor (1985). Author of over 50 publications, 3 patented inventions. Research interests: theory of reinforced concrete behaviour, composite structures, strengthening of structures.

**VYTAUTAS PAPIGIGIS.** Doctor, Associate Professor. Dept of Reinforced Concrete and Masonry Structures. Vilnius Gediminas Technical University (VGTU), Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania. E-mail: vytas@proex.lt

Doctor (1982). Author of over 50 publications. Research interests: theory of reinforced concrete behaviour, composite structures, strengthening of structures.