



2 DALIS – WP2-LT

REAGAVIMAS Į KAITRĄ

VG TU MI "KOMPOZITAS" VERTIMAS, VILNIUS 2008-2009

2 dalis: Reagavimas į kaitrą

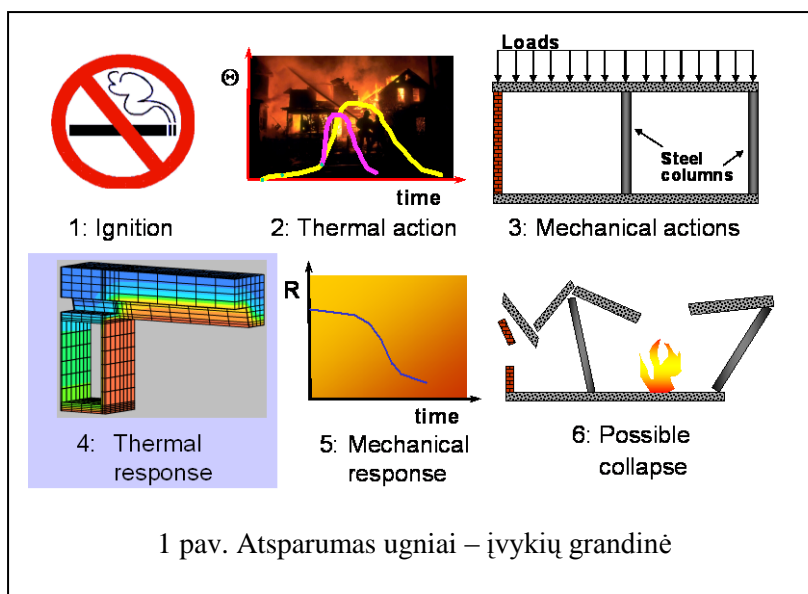
O. Vassart

Arcelor Mittal Long Carbon Europe Research Centre

1. ĮVADAS

Kai gaisro sąlygų veikiamos, pastatų konstrukcijos patiria ir mechaninius ir šiluminius poveikius. Mechaninius poveikius sukelia savasis svoris ir uždėtosios apkrovos, veikiančios konstrukciją gaisro kilimo momentu. Šiluminius poveikius sukelia gaisriniame skyriuje pakilusi dujų temperatūra ir jie yra susiję su šilumos perdavos sąlygomis, susidarantiomis ant konstrukcinių elementų paviršių. Dėl šiluminių poveikių konstrukcijos temperatūra kils. Tai vadinama „reagavimu į kaitrą“ ir tai galimai sukelia kaistančių konstrukcijos dalių pailgėjimą ir mechaninių savybių blogėjimą. Priklausomai nuo aplinkybių šiluminis pailgėjimas gali (iš dalies) būti prislopintas ir sukelti šiluminius priverstinius įtempius. Kartu pasireiškiant ir mechaniniams poveikiams, didelės deformacijos gali atsirasti ir, esant įvairioms aplinkybėms, pastato konstrukcija arba jos dalis gali net sugriūti. Toks vyksmas vadinamas „mechaniniu atoveikiu“.

Aukščiau paminėta įvykių grandinė schematiškai pateikta 1 pav.



Gaisro inžinerijos požiūris į atitinkamus poveikius, pasireiškiančius gaisro metu, yra pateiktas šio kurso 1 dalyje. Mechaninis poveikis aptariamas 3 dalyje. Pateikiamoje 2 dalyje nagrinėjamas reagavimas į kaitrą. Diskusija apsiriboja tik plieniniais ir kompozitiniais plieniniais-betoniniais elementais ir remiasi atitinkamų Eurokodų [1], [2] gaisrinėmis dalimis.

2. PAGRINDINIAI DALYKAI IR PAVYZDŽIAI

Šilumos perdava statybiniame elemente yra apibūdinama tokia diferencialine lygtimi (vadinamąja Furje diferencialine lygtimi) derinama su atitinkamomis kraštinėmis ir pradinėmis sąlygomis:

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

čia:

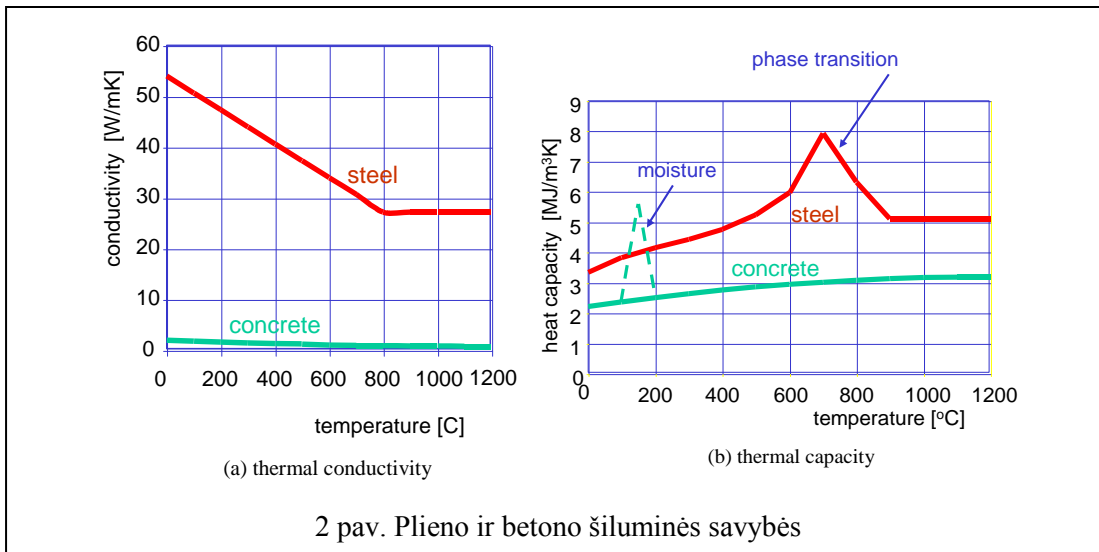
- x, y, z yra koordinatės, m
- Θ yra x, y, z taškų temperatūra, °C
- ρ yra tankis, kg/m³
- c yra savitoji šiluma, J/kg
- λ yra šilumos laidumas, W/m °K

Trumpą šios pagrindinės lygties paaiškinimą žiūrėti A priede.

Iš 1-os lygties galima padaryti išvadą, kad tokios šiluminės medžiagų savybės turi poveikį į tai, kaip plinta temperatūra kaitros veikiamu statybiniu elementu:

- šilumos laidumas;
- savitoji šiluma.

Įprasta sieti savitąją šilumą su tankiu. Užrašoma: "šilumos talpa", dimensija: J/m³. Daugelio statybinių medžiagų šilumos laidumas ir savitoji šiluma labai priklauso nuo temperatūros. Betonui ir plieniui tai yra parodyta 2a ir 2b paveiksluose [1], [2].



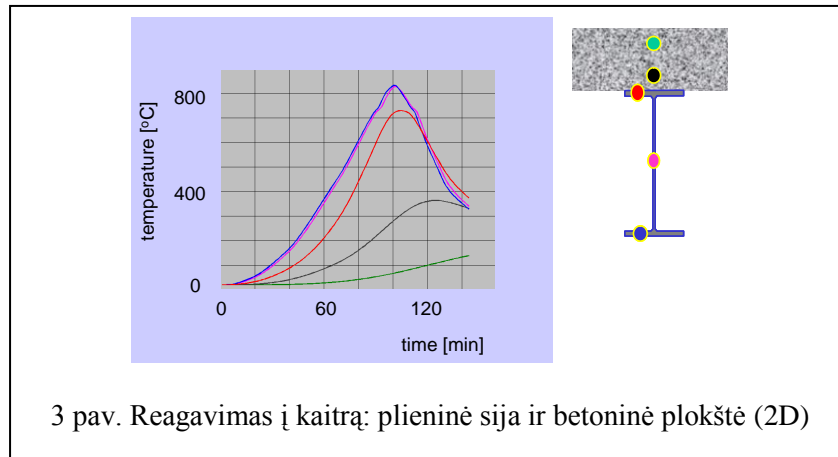
2 pav. Plieno ir betono šiluminės savybės

Plieno šilumos talpos kreivės aukščiausias taškas, atitinkantis apie 730 °C, priklauso nuo plieno fazinės pereinimo; betono šilumos talpos kreivės smaile turi būti atsižvelgiama į drėgmės išgaravimo poveikį.

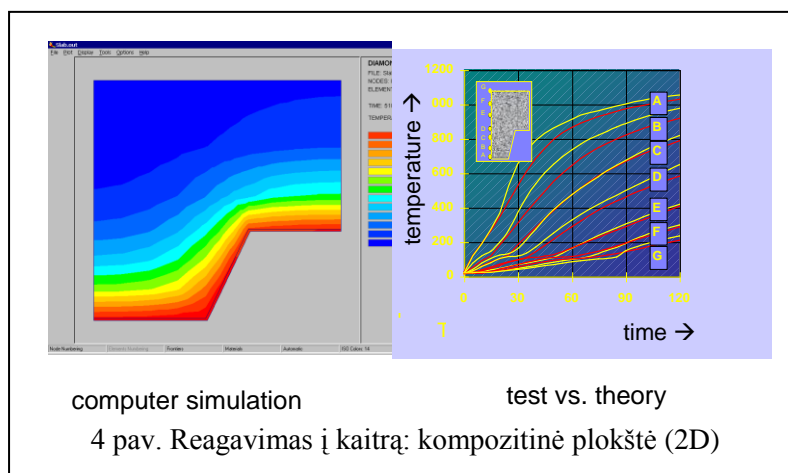
Pažymėtina, kad plieno šilumos laidumas visa eile didesnis nei betono. Dėl to temperatūros pasiskirstymas kaitros veikiamuose plieniniuose elementuose yra daug tolygesnis nei kompozitinių elementų betoninėse dalyse. Dėl supaprastinimo dažnai netgi tariama, kad plieniniuose elementuose temperatūra pasiskirsto tolygiai. Žr. 3 skyrių.

Jei medžiagų, iš kurių statybinis elementas susideda, šiluminės savybės yra žinomos, temperatūros pasiskirstymas, tam tikriems šilumos poveikiams esant, gali būti apskaičiuojamas remiantis (1) lygtimi. Tačiau išskirtiniams (paprastiems) atvejams analitiniai sprendiniai yra galimi [3]. Praktiniais atvejais skaitmeniniai metodai (kompiuteriniai modeliai) turi būti naudojami. Šiuo metu yra tokių metodų įvairovė. Žr. 4 dalį.

3, 4 ir 5 pav. reagavimo į kaitrą kai kurių modelių konkurencingumas yra paaiškintas.

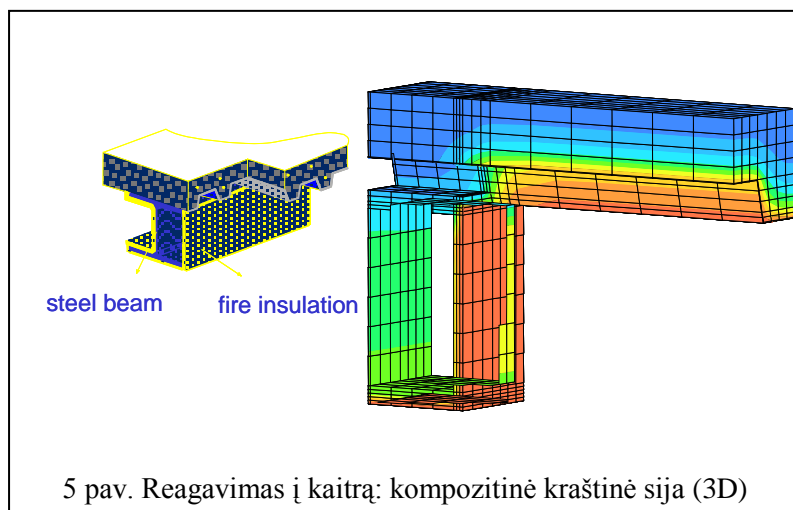


3 pav. neizoliuotos plieninės sijos su betonine plokšte virš jos, veikiamos natūralaus gaisro iš apačios, reagavimas į kaitrą yra pateiktas [4]. Yra matyti, kad apatinės juostos ir sienelės temperatūra praktiškai yra tokia pat. Tačiau viršutinės juostos temperatūros sklaida vėluoja. Taip yra dėl šilumos netekties į sąlyginai šaltą betoninę plokštę, esančią ant viršutinės juostos viršaus. Paprastiesiems skaičiavimo modeliams, skirtiems plienui remiantis EN 1993-1-2, tolygi temperatūros sklaida, kuri pagrįsta plieninio profiliuotio apatinių dalių temperatūra, yra priimta. Norint atsižvelgti į žemesnes viršutinės juostos temperatūras, mechaninės apkrovos pataisos koeficientas κ yra panaudotas. Žr. 3 dalį.



4 pav. plokštuminė temperatūros sklaida betono plokštėje, turinčioje lakštinį plieninį profiliuotį, pateikta po 120 min standartinio gaisro poveikio, apskaičiuoto DIANA [5] priemonėmis. Taip pat

palyginti apskaičiuotieji temperatūros laukai ir bandymo rezultatai. Atrodo, kad gerai dera bandymai ir teorija, ypač kritinėse srityse ant briaunų viršutinių pusių (t.y. padėtis D dešinėje 4 pav. pusėje). Pažymėtina, kad temperatūros sklaida yra itin netolygi. Tai yra dėl sąlyginai nedidelės betono šilumos laidumo reikšmės.



5 pav. erdvinis (3D) kompozitinės kraštinės sijos reagavimas yra parodytas [6]. Plieninis profiliuotis iš vienos pusės turi dėžinę apsaugą, o iš kitos pusės – apsaugą visu perimetru. Erdviniai (3D) skaičiavimai, kurių rezultatai čia yra parodyti, yra per sudėtingi ir retai naudojami praktinio projektavimo metu. Šių rezultatų parodymo čia tikslas yra tikrai byloti apie šiuo metu esamų skaičiavimo priemonių galimybes.

3 PLIENINIŲ ELEMENTŲ SKAIČIAVIMO TAISYKLĖS

3.1 Esmė

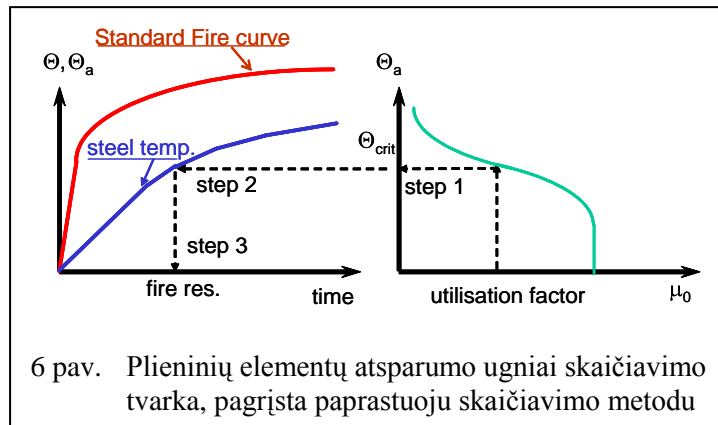
Pagrindinis plieninio strypyno reagavimo į kaitrą skaičiavimo tikslas – rasti atsparių ugniai. Kadangi plieniniai elementai paprastai neturi atitvarinės paskirties, tik atsparumo kaitrai kriterijus, siejamas su apkrovos laikomąja galia, yra svarbus.

EN 1993.1.2 tokias pasirinkimo galimybes skaičiuojant gaisro veikiamo plieninio strypyno elgseną¹:

- paprastieji skaičiavimo modeliai;
- sudėtingesnieji skaičiavimo modeliai.

Sudėtingesniųjų modelių atveju reagavimas į kaitrą yra grindžiamas (1) lygtimi, derinama su atitinkamais šiluminiais poveikiais. Tokie modeliai yra labiausiai paplitę. Pagrindinė prielaida, taikoma paprastesiems modeliams, yra, kad temperatūra pasklidusi tolygiai. Tai beveik tiesa dėl plieno sąlyginai aukšto šilumos laidumo. Žiūrėk taip pat aptarimą ankstesniame skyriuje.

Tarus, kad plieno temperatūra tolygiai pasiskirsčiusi, atspario ugniai skaičiavimas gali būti schematiškai apžvelgtas, kaip parodyta 6 pav.



Tokie trys žingsniai turi būti daromi:

- 1-asis žingsnis: nustatyti kritinę plieno temperatūrą (t.y. temperatūrą, kuriai esant įvyksta irtis); ši temperatūra priklauso nuo nagrinėjamo elemento tikrosios apkrovos ir laikomosios galios kambario temperatūroje ir yra su 3 dalimi susijusio mechaninio atoveikio skaičiavimo pasekmė;
- 2-asis žingsnis: nustatyti temperatūros sklaidą plieniniame profiliuotyje; tai yra su šia konspekto dalimi susijusios reagavimo į kaitrą skaičiavimo pasekmė;
- 3-asis žingsnis: nustatyti plieninio profiliuoties atsparių ugniai; tai paprasčiausiai yra 1-ojo ir 2-ojo žingsnių derinys.

¹ Atkreiptinas dėmesys, kad plienui nepateikiami jokie tabuluoti duomenys.

Toliau bus aptarti įvairūs 2-ojo žingsnio aspektai. Priimti bendrai aukštą plieno šilumos talpumo reikšmę. Kadangi plieno temperatūra yra tolygiai pasklidusi, (1) lygtis pavirsta į tokią (žr. B priedą):

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

čia:

- θ_a – plieno temperatūra °C (priimta esanti tolygiai pasklidusi);
- t – laikas s;
- ρ_a – plieno tankis kg/m³;
- c_a – plieno savitoji šiluma J/kg;
- $\dot{h}_{net,tot}$ – bendras grynas šilumos srautas į plieninį elementą W/m²;
- A_m – plieninio profilio ugniai atviro paviršiaus plotas m²/m’;
- V – plieninio profilio tūris m³/m’.

(2) lygties dešinėje pusėje tokie dydžiai yra išskirti:

- dydis “ $\dot{h}_{net,tot}$ ” atitinka šiluminių poveikį, priklausantį nuo atitinkamo gaisro modelio (t.y. standartinio gaisro sąlygų, angliavandenilinių gaisrų, natūralaus gaisro) ir plieninio profilio apsaugos (jei tokia yra). Žr. taip pat 1 dalį;
- dydis “ $\rho_a c_a$ ” atitinka plieno šiluminių savybių poveikį;
- dydis “ A_m/V ” atitinka plieninio profilio matmenų poveikį ir būdą, koku jis veikiamas gaisro (veikiamas iš visų pusių, 3 pusių ir t.t.); paprastai šis dydis įvardijamas kaip “profilio koeficientas”.

(2) lygtis yra plieno temperatūros sklaidos skaičiavimo taisyklių pagrindas, tiksliai apibrėžianti paprastą skaičiavimo modelį plieninių konstrukcijų Eurokodo gaisrinėje dalyje ir gali būti išspręsta tiksliai, jei pradinės ir kraštinės sąlygos yra žinomos. Bendra prielaida ryšium su pradinėmis sąlygomis yra tai, kad prieš įvykstant gaisrui išlaikomos kambario temperatūros sąlygos, t.y. 20 °C. Kraštinės sąlygos yra nustatomos bendru grynuoju šilumos srautu (lygiu šilumos poveikiui) iš gaisro aplinkos į plieninį elementą. Šis šilumos srautas priklauso nuo spinduliavimo ir konvekcijos. Kai kurios pagrindinės lygtys paminėtos 7 pav. Taip pat žiūrėti 1 dalį.

➤ Radiative heat transfer: $\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \epsilon_m \cdot \sigma \cdot [\Theta_r + 273]^4 - (\Theta_m + 273)^4$

➤ Convective heat transfer: $\dot{h}_{net,c} = \alpha_m \cdot (\Theta_g - \Theta_m)$

with:

- Θ_{rad} is radiation temperature [°C] ⇒ $\Theta_{rad} \approx \Theta_g \rightarrow$ fire curve
- Θ_m is surface temperature [°C] ⇒ thermal response
- ϵ_m is surface emissivity [-] ⇒ safe: 0.8
- α_c is coefficient convection ⇒ 25 - 50 W/m²K
(depending on fire model)
- Φ is configuration factor [-] ≤ 1.0 ⇒ safe: 1.0
- σ is Stephan Boltzmann constant = 5.67·10⁻⁸ W/m²K⁴

7 pav. Šilumos perdava veikiamojoje pusėje

Galioja tokios pastabos:

Stefano Bolzmano spinduliavimo dėsnis pripažįsta spinduliuotinę šilumos perdavą. Pagal šį dėsnį taip vadinama gaisro aplinkos spinduliuotinė temperatūra nustato didžiausią spinduliavimą į plieninį elementą [3]. Gali būti parodyta, kad – aproksimacijos su atsarga būdu – spinduliuotinė temperatūra gali būti imama lygi aplinkos temperatūrai ir priklauso nuo gaisro modelio, į kurį atsižvelgiama. Žr. 1 dalį. Tai yra pagrindas grynajai spinduliuotinei šilumos perdavai, apibrėžtai EN 1993.1.2 [1]. Šioje lygtyje tokie fizikiniai veiksniai yra svarbūs:

- Stefano Bolzmano konstanta ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$): tai yra fizikinė konstanta;
- profiliuoties paviršiaus išskiriamumas (ϵ_m): jis priklauso nuo medžiagos, panaudotos paviršiuje;
- formos koeficiento (Φ): geometrinis koeficientas ≤ 1 ; daugeliui praktinių atvejų (t.y. simulation of standartinio gaisro bandymų modeliavimas) šis koeficientas gali būti imamas lygus vienetui².

Pažymėtina, kad paviršiaus temperatūros (Θ_m) reikšmė tam tikram laiko žingsniui priklauso nuo temperatūros, gautos sprendžiant (1) lygtį ankstesnio laiko žingsniui.

Grynosios konvekcinės šilumos perdava gali būti aproksimuota proporcingai temperatūrų skirtumui ($\Theta_g - \Theta_m$) ir yra apibūdinama konvekcijos koeficientu (α_c); praktikoje jis kinta nuo 25 (standartinio gaisro sąlygos) iki 50 $\text{W/m}^2\text{K}$ (angliavandenilinės sąlygos)³. Taip pat žr. [7]. Kai kurios aukščiau minėtų skaičiavimo taisyklių praktinės išvados bus aptariamoms atitinkamai neizoliuotiems ir izoliuotiems plieniniams profiliuotiesiems.

3.2 Neizoliuotasis plieninis strypynas

Skaičiavimo taisyklės, skirtos temperatūros sklaidai plikame (t.y. neapsaugotame) plieniniame strypyne, apibrėžtos EC3-1.2 ENV variante yra pagrįstos abiejų, spinduliuotinės ir konvekcinės šilumos perdavos, koeficientų sutartinėmis reikšmėmis [8]. Šios reikšmės yra parinktos tokios, kad būtų gautas priimtinas atitikimas bandymų rezultatams, vedantis tačiau prie prielaidų, kurios nėra – iš fizikinio požiūrio taško – labai įtikimos. Tai ypač liečia radiacinės šilumos perdavą: atstojamojo išskiriamumo reikšmė mažesnė nei 0.5 ($= \epsilon_f \cdot \epsilon_m$)⁴ būtina tam, kad pasiekti priimtina atitikimą bandymų rezultatams. Ši problema tapo dar aiškesnė, kai buvo įdiegiamas taip vadinamas plokštinis termometras (vietoj įprastų termoporų), kaip matuoklis kontroliuoti aplinkos temperatūrą atliekant standartinio gaisro atspario bandymus [1], [9].

Su mintimi pasiekti daug tikresnes ir nuoseklesnes temperatūros sklaidos plikame plieniniame profiliuotyje skaičiavimo taisyklės, o taip pat atitikti ir būsimą standartinio gaisro atspario bandymo praktika, EC3-1.2 [1] EN variante daug tikroviškesnės paviršiaus išskiriamumo koeficientų reikšmės nustatytos: plieno paviršiaus išskiriamumo (ϵ_a): 0.7 (esanti žema, bet tikroviška, reikšmė) ir gaisro aplinkai (ϵ_f): 1.0 (kaip tiesioginis plokštinių termometrų vartojimo krosnies kontrolei padarinys [9]).

Šių apskaičiuotosios temperatūros pakeitimų požiūriu “sutvirtinantis poveikis” yra – apskritai paėmus – išlygintas imant domėn taip vadinamą “šešėlio poveikį”, į kurį tiksliai neatsižvelgta ENV taisyklėse. Imant visiškai panardintus profiliuotiesiems (kaip paprastųjų skaičiavimo modelių atveju), šešėlio poveikis yra sukliamas spinduliuotės vietinės uždangos priklausomai nuo plieninio profiliuoties pavidalo. Tai svarbu profiliuotiesiems, turintiems įgaubtą pavidalą, tokį kaip dvitėjai; profiliuotiesiems, turintiems išgaubtą pavidalą, tokį kaip vamzdžiai, tai neegzistuoja (nėra vietinės uždangos).

Neapsaugoto plieninio profiliuoties temperatūros prieaugis $\Delta\theta_{a,t}$ per laiko tarpą Δt gali būti tada nustatytas iš:

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

čia:

² Jei plieninis elementas yra veikiamas vietinio gaisro, vartojamas $\Phi < 1$.

³ Natūralaus gaisro sąlygoms, vartojamas $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$.

⁴ Gaisro aplinkos išskiriamumas yra pažymėtas kaip: ϵ_f .

- k_{sh} – pataisos koeficientas dėl šešėlio poveikio;
 $\dot{h}_{net,d}$ – plikam plienui apskaičiuota grynojo šilumos srauto į vienetinį plotą skaičiuotinė reikšmė, t.y. kai $\epsilon_a = 0.7$ ir $\epsilon_{fi} = 1.0$ [W/m²].

Naujas išraiškoje – palyginus su EC3-1.2 ENV variantu – yra pataisos koeficientas k_{sh} dėl šešėlio poveikio⁵. Gali būti parodyta, kad vardinio gaisro veikiamų dvitėjų profiliuotųjų šešėlio poveikis pakankamai gerai aprašomas imant [9]:

$$k_{sh} = 0.9 [A_m/V]_{box} / [A_m/V] \quad \dots (4^a)$$

čia:

$[A_m/V]_{box}$ – profiliuotųjų koeficiento⁶ dežinė reikšmė.

Visais kitais atvejais k_{sh} reikšmė turi būti imama kaip:

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

Tai seka iš ankstesnių k_{sh} apibrėžimų, kad vamzdiniams profiliuotiesiems šešėlio poveikis nenaudojamas, nes $[A_m/V] = [A_m/V]_{box}$

Žr. į 8 pav., kuriame yra pagrindinių lygčių, skirtų temperatūros kilimui plikuose plieniniuose elementuose nustatyti, suvestinė.

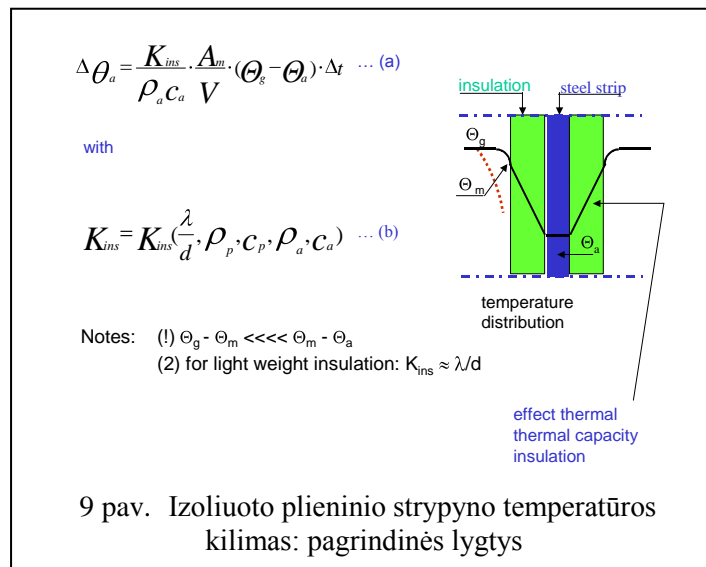
$\frac{d\Theta_a}{dt} = k_{sh} \frac{A_m/V}{\rho_a c_a} \cdot \dot{h}_{net, tot} \quad \dots (1)$	<p>Legend: $\Delta\Theta_a$: increase steel temp. Δt: time step A_m/V section factor K_{bare}: heat transfer coef. k_{sh}: corr. coef. shadow effect</p>
$\Delta\Theta_a = k_{sh} \frac{K_{bare}}{\rho_a c_a} \cdot \frac{A_m}{V} \cdot (\Theta_g - \Theta_a) \cdot \Delta t \quad \dots (2)$	
with	
$K_{bare} = \alpha_c + \frac{\epsilon_m \sigma [(\Theta_g + 273)^4 - (\Theta_a + 273)^4]}{\Theta_g - \Theta_a} \quad \dots (3)$	
<p>8 pav. Neizoliuoto plieninio profiliuotųjų temperatūros kilimas</p>	

⁵ Pataisos koeficientas nedaro jokie skirtumo tarp spinduliuotinės ir konvekcinės šilumos srauto. Aišku, kad konvekcinės šilumos perdavą mažiau veikia šešėlio poveikis nei spinduliuotinės šilumos perdavą; šio poveikio yra nepaisoma, nes konvekcija gaisro sąlygomis vaidina menką vaidmenį.

⁶ Plieninio profiliuotųjų skerspjūvio koeficiento dežinė reikšmė yra nustatoma kaip santykis tarp atviro poveikiui įsivaizduojamos ribinės dėžės paviršiaus ploto ir plieno tūrio.

3.3 Izoliuotasis plieninis strypynas

Temperatūros sklaidai izoliuotame plieniniame strypyne apskaičiuoti lygtys yra panašios į (3) lygtį. Tačiau šiuo atveju izoliavimo poveikį turi būti atsižvelgiama, kai skaičiuojamas grynas šilumos srautas. Praktikoje temperatūros kritimas per izoliaciją yra santykinai didelis. Todėl izoliacijos paviršiaus temperatūra yra artima aplinkos temperatūrai. Taigi spinduliuotinės šilumos perdavos poveikis yra mažas ir paprastai į jį galima neatsižvelgti. Tai reiškia, kad šešėlio poveikis nėra svarbus; vadinasi nebūtina įvesti pataisos koeficientą k_{sh} kaip plikiems plieniniams profiliuochiams. Taip pat žr. [1]. Tai yra vizualizuota 9 pav. Šiame pav. taip pat yra pateiktos pagrindinės lygtys izoliuotiems plieniniams profiliuochiams. Kaip ir plikam plienui, bendrasis šilumos perdavos koeficientas gali būti nustatytas (žymuo: K_{ins}). Akivaizdžiai K_{ins} yra izoliacijos storio (d_p) ir abiejų plieno (ρ_a, c_a) ir izoliacinės medžiagos (λ_p, ρ_p, c_p), šiluminių savybių funkcija. Taip pat žr. [1], kur yra pateiktos lygtys, kuriomis atsižvelgiama į aukščiau minėtus poveikius. Jei izoliacijos šiluminė geba yra maža palyginus su plieno šilumine geba, K_{ins} gali būti aproksimuojamas taip: $K_{ins} \approx \lambda_p/d_p$, nes esant tokioms aplinkybėms tiesinė temperatūros plėtra per izoliaciją gali būti imama. Tai taip pat yra parodyta 9 pav. Izoliuotų plieninių elementų skerspjūvio koeficientas yra pažymėtas kaip A_p/V . Žr. toliau 3.4.



3.4 Temperatūros sklaidos skaičiuotiniai rodikliai

3.4.1 Bendrybės

Temperatūros sklaida plieniniame elemente priklauso – esant duotoms gaisro sąlygoms – nuo dviejų skaičiuotinių rodiklių:

- skerspjūvio koeficiento A_m/V , A_p/V (plikam ir izoliuotam (apsaugotam) profiliuochiams atitinkamai);
- izoliacijos rodiklių d_p , λ_p , ρ_p , c_p (tik izoliuotiems profiliuochiams).

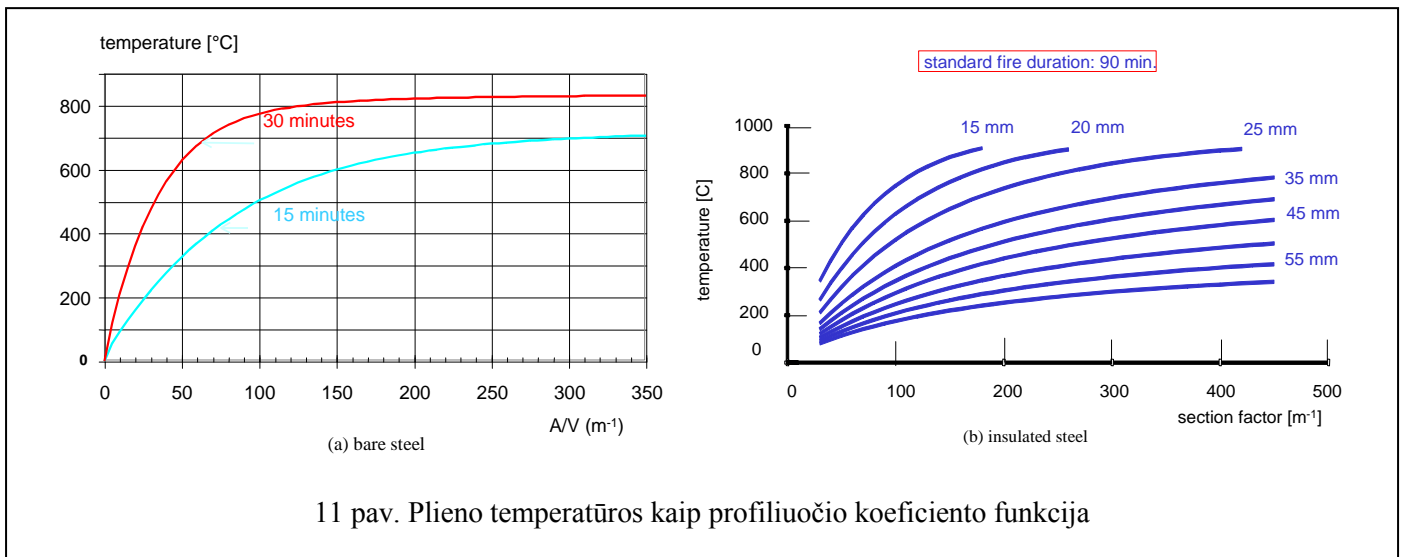
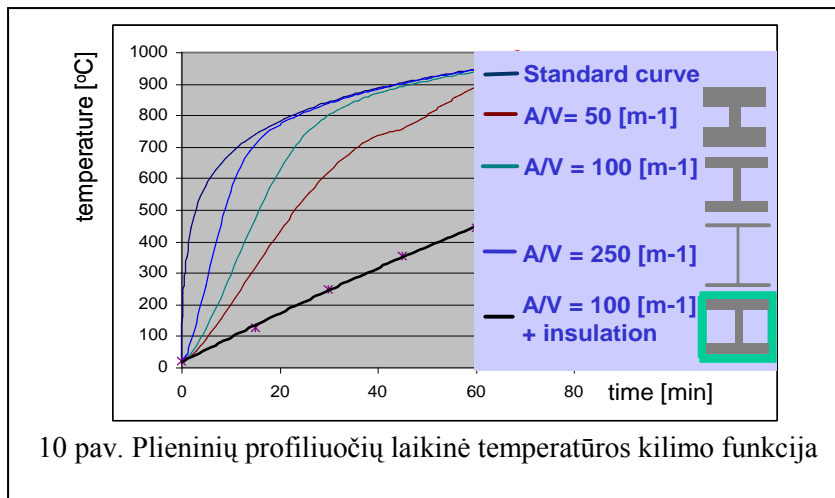
Tolesniuose skirsniuose kiekvienas iš šių rodiklių bus trumpai aptartas. Pabrėžiamos standartinio gaisro sąlygos, nes praktikoje tokios sąlygos yra plačiausiai naudojamos. Aptarimas bus papildytas komentarais apie galimą taikomąjį natūralaus gaisro saugos koncepcijos vartojimą plikiems ir izoliuotiems plieniniams profiliuochiams. Žr. 3.4.4 paragrafą.

3.4.2 Skerspjūvio koeficiento poveikis ir nustatymas

10 pav. skerspjūvio koeficiento poveikis į temperatūros plėtotę plikame plieniniame profiliuotėje, veikiamame standartinio gaisro sąlygų, yra parodytas. Praktiškos skerspjūvio koeficiento ribos yra pasirinktos, t.y. tarp 50 m^{-1} ir 400 m^{-1} . 100 m^{-1} skerspjūvio koeficientui taip pat ir galimas šiluminės izoliacijos poveikis yra pateiktas.

Panaši informacija, tačiau labiau apibendrintu būdu, yra pateikta 11^{a,b} pav. 11^a pav. nurodo plikus plieninius profiliuočius; kiekviena kreivė galioja tam tikram standartinio gaisro trukmės laikui. 11^b pav. nurodo plieninius profiliuočius aprūpintus su (praktiška) izoliacijos sistema ir veikiamus standartinio gaisro sąlygų per 90 minučių; kiekviena kreivė galioja tam tikram izoliacijos storiui.

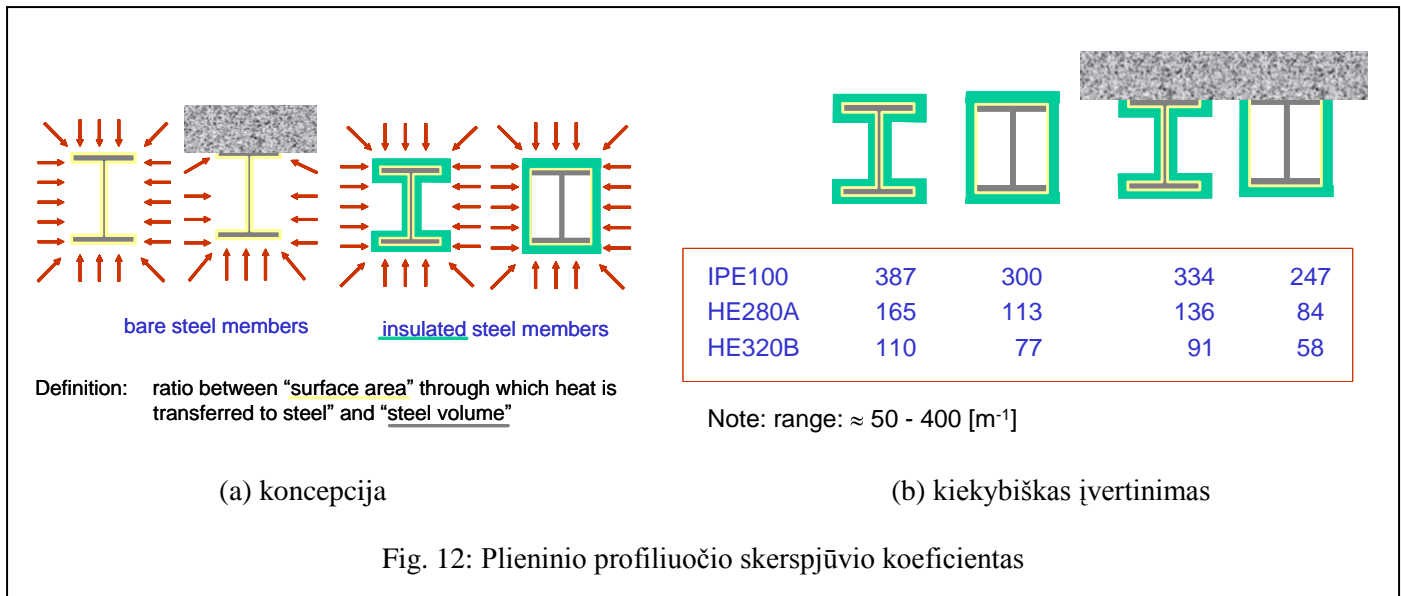
Iš šių paveikslų galima padaryti išvadą, kad skerspjūvio koeficientas turi reikšmingą poveikį plieno temperatūros plėtočiai, ypač jei skerspjūvio koeficientas yra mažas, o ir izoliacijos storio reikšmės mažos.



Kaip minėta anksčiau, skerspjūvio koeficientas yra nustatomas kaip santykis tarp “paviršiaus ploto, per kurį šiluma perduodama plienui” ir “plieno tūrio”. Papildomai tokios (sutartinės) taisyklės taikomos:

- dėžinei apsaugai plieno perimetras yra imamas lygus ribojančiai dėžei su plieniniu profiliuočiu;
- esant plieniniams profiliuočiams po betonine plokšte, į šilumos kaitą tarp plieno ir betono neatsižvelgiama.

Koncepcija yra parodyta 12 pav. Šiame paveiksle keletas skaitinių pavyzdžių taip pat yra pateikta. Norint išsamesnės apžvalgos, žr. į [1].



3.4.3 Gaisrinės izoliacijos ant konstrukcinio plieninio strypyno rodikliai

3.4.1 skirsnyje tokie gaisrinės izoliacijos rodikliai turi būti paminėti:

- šilumos laidumas (λ_p);
- savitoji šiluma (c_p);
- tankis (ρ_p);
- storis (d_p).

Pirmieji trys rodikliai yra fizikinės savybės. Tačiau būtina suprasti, kad jų tikrosios reikšmės priklauso nuo pokyčių, kurie įvyksta izoliacijoje, kai veikia ugnis, tokie kaip įtrūkiai, išsisluoksniavimas, drėgmės kilnojimas ir t.t. Tai ypač liečia šilumos laidumą. Be to, medžiagų, paprastai naudojamų kaip gaisrinė izoliacija, šilumos laidumas reikšmingai išauga kaip temperatūros funkcija. Todėl λ_p reikšmės, duotos žinynuose kambario temperatūrai neturėtų būti naudojamos skaičiuojant elgseną ugnyje. Norint nustatyti λ_p , specialus pusiau empirinis būdas buvo sukurtas [10]. Šiam būdui du skirtingi bandymų tipai yra numatyti:

- (a) bandymai su apkrautomis ir neapkrautomis sijomis;
- (b) bandymai su neapkrautomis trumpomis kolonomis.

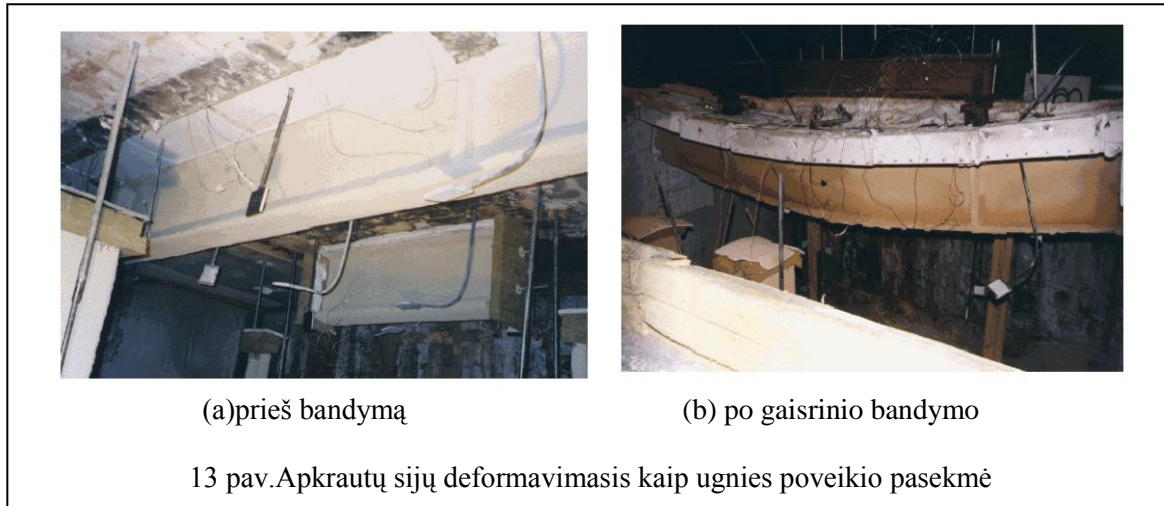
Papildomai a: Šių bandymų tikslas yra įvertinti, ar izoliacijos sistema "išlieka susieta ir sankabi su jų atramomis visą laiką, kol atitinkamas gaisras veikia"⁷ kaip reikalaujama 3.4 [1]. Tuo tikslu dvi sijų, turinčių tą patį skerspjūvį, poros yra veikiamos standartinio gaisro sąlygų krosnyje. Vienos poros sijos aptaisytos didžiausio storio nagrinėjamos izoliacijos sistema; kitos poros sijos – mažiausio storio. Reagavimo į kaitrą skirtumai tarp apkrautos ir neapkrautos vienos poros sijų priimami kaip priklausantys nuo apkrautos sijos įtempio sukeltos deformacijos. Kai reikia, pataisos koeficientai panaudojami, kad atsižvelgti į tokius poveikius.

Papildomai b: Šių bandymų (paprastai minimų kaip "žvalgomieji bandymai") tikslas yra rasti λ_p reikšmės, kurios yra būdingos veikiant gaisro sąlygoms. Tuo tikslu, a serijos 10 neapkrautų trumpų kolonų (tipinis aukštis: 1 m) yra veikiamos standartinio gaisro sąlygų. Izoliacijos storis o taip pat skerspjūvio koeficientas yra sistemingai keičiami. Išmatuotos plieno temperatūros yra, kai būtina, koreguojamos

⁷ Tai paprastai minima kaip "prilipdomumas".

remiantis sijų bandymais. Rezultatai yra įvertinimo dalykas, kuris sąlygoja projektines kreives tokias, kokios yra parodytos 11^bpav., nors taip pat ir kitokios naudojamos. Esama kompiuterių programų, kuriomis toks skaičiavimas gali būti atliktas, o taip pat programų kurios gali panaudoti gautą informaciją elgsenos gaisro metu skaičiavimo tikslais.

13^{a,b} pav. fotografijose rodoma apkrauta sija prieš ir po gaisrinio bandymo. Atkreiptinas dėmesys į šmingas deformacijas, kurios gali atvesti prie “prilipdomumo” problemų.



Bandymo ir įvertinimo metodas, minėtas aukščiau, naudojamas izoliacijos sistemoms, aptaisančioms plieninį elementą. Rinkoje jos esti įvairių pavidalų:

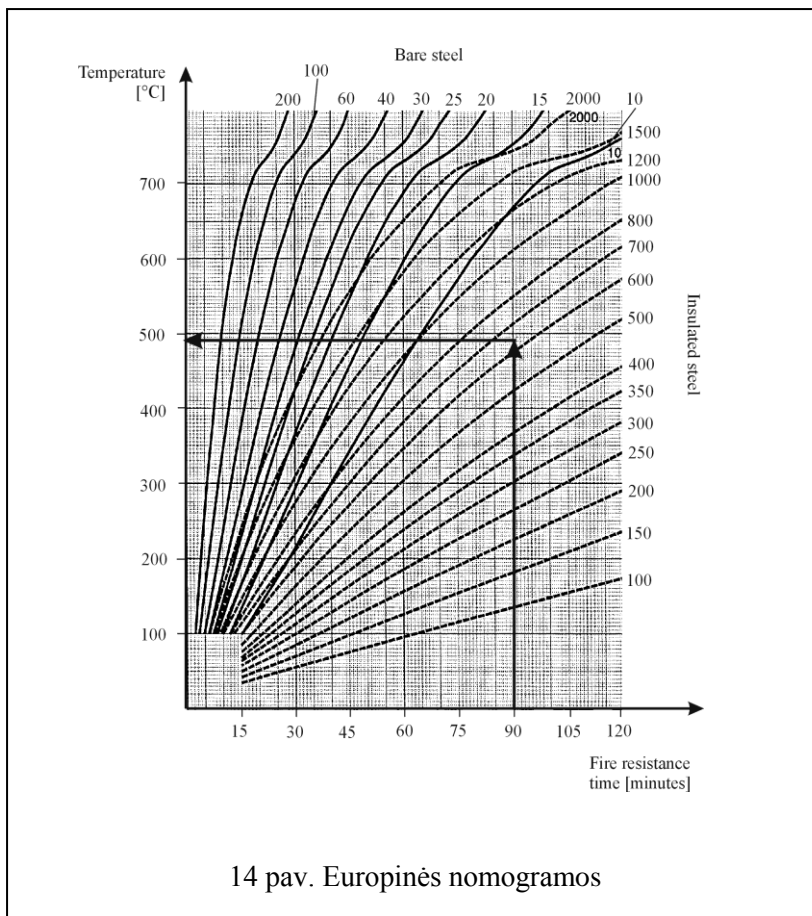
- purškalai;
- plokštės;
- burkiosios medžiagos.

Kitos apsaugos nuo ugnies priemonių rūšys yra ekranai. Jie gali būti vartojami stačioje padėtyje (apsaugoti nuo ugnies plieninius statramsčius pertvarose) arba gulsčioje padėtyje (kaip lubų membranos apsaugoti plienines sijas perdangų ir stogo konstrukcijose). Esama Europos standartų, pagrįstų panašiais, kaip aptarta aukščiau, principais įvertinti tokių apsauginių sistemų indėlį į statybinio plieninio strypyno atsparį ugniai [11], [12]. Šių standartų aptarimas neįeina į šio konspekto apimtį.

Bus aišku iš ankstesnio aptarimo, kad rekomenduojama naudoti izoliaciją tokių rodiklių, kurie gauti tokioms sąlygoms, kurios atitiktų tai, kas gali įvykti gaisro metu. Esant tam tikroms aplinkybėms gali būti naudinga turėti galimybę „greitai ir paprastai“ aproksimuoti temperatūros kilimą gaisro veikiamame plieniniame strypyne. Turėdama tokią mintį, Europos Statybinio Plieninio Strypyno Konvencija (the European Convention for Constructional Steelwork – ECCS) sukūrė taip vadinamas “Europos nomogramas” [13]. Šių nomogramų pavyzdys yra pateiktas 14 pav. Duotajai standartinio gaisro poveikio trukmei pliko plieninio profilio temperatūra gali būti rasta kaip skerspjūvio koeficiento A_m/V funkcija. Izoliuotam profiliočiui toks koeficientas, kaip įvesties duomuo, yra naudojamas (taip pat žr. 9 pav.):

$$(\lambda_p/d_p) \cdot (A_p/V).$$

Pažymėtina, kad Europos nomogramos yra apibrėžtos remiantis EC3-1.2 ENV variantu. Taip pat dėl šios priežasties jos turi būti naudojamos šiek tiek prieštarinčiai.



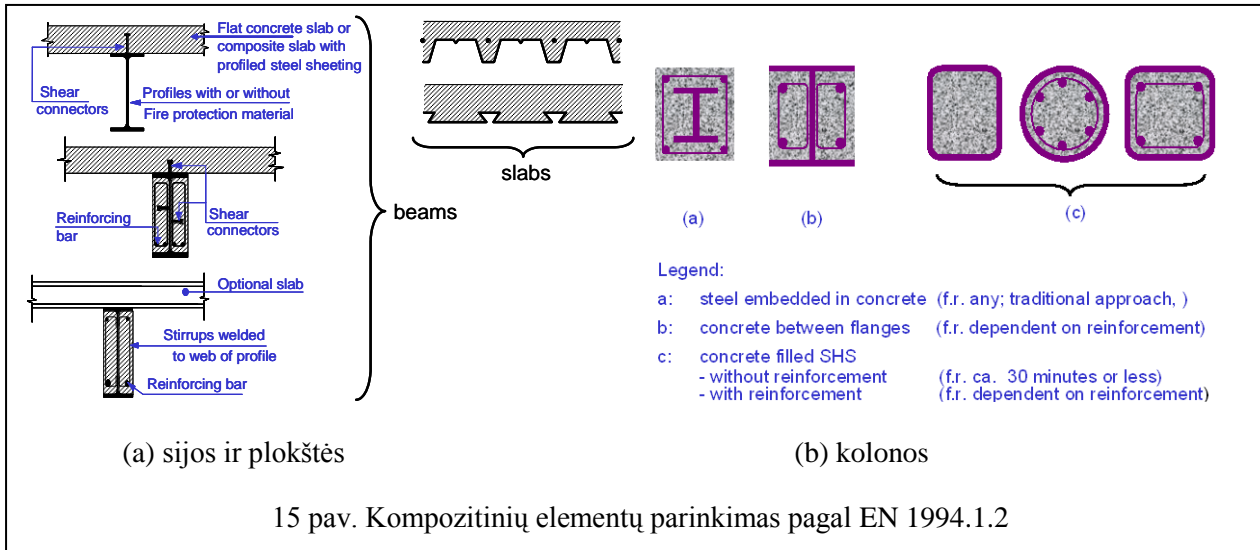
3.4.4 Nestandartinio gaisro sąlygų naudojimas

1 dalyje buvo pabrėžiamas būdas, pagrįstas natūralaus gaisro saugos koncepcija. Toks būdas gali būti tiesiogiai naudojamas plikam plienui, kadangi plieno šiluminės (ir mechaninės) savybės taip pat galioja ir esant nestandartinio gaisro sąlygoms. Tai nėra paprasta izoliacijos sistemų, naudojamų apsaugoti plieną, atitinkamiems šiluminiams rodikliams. Kaip buvo paaiškinta ankstesniuose skyriuose, tokie rodikliai yra nustatomi esant standartinio gaisro sąlygoms. Tiesiai sakant, jie pagrįsti šiomis sąlygomis ir jokios susistemintos informacijos nėra, kaip jų reikšmės veikia, jei gaisro sąlygos yra gana skirtingos nuo standartinio gaisro sąlygų. Todėl naudoti natūralaus gaisro saugos koncepciją projektuojant apsaugotas plienines konstrukcijas reikia atsargiai. Iš kitos pusės, būtina aiškiai suvokti, kad šiuo metu šiluminiai rodikliai yra priimti be jokio rūpesčio, kad tikrovėje gaisro sąlygos gali būti toli nuo standartinių. Dėl šios priežasties galima įrodinėti, kad rodikliai gali būti taip pat naudojami ir natūralaus gaisro saugos traktuotės atveju.

4. KOMPOZITINIŲ ELEMENTŲ SKAIČIAVIMO TAISYKLĖS

4.1 Esmė

EN 1994.1.2 apima kompozitinių elementų įvairovę. Apžvalgai žr. 15 pav.



Priklausomai nuo jų rūšies, kompozitiniai plieniniai-betoniniai elementai gali atlikti apkrovą laikantią ir atitvarinę funkciją. Vadinasi, gali būti svarbūs visi 3 atsparumo ugniai kriterijai:

- apkrovos laikomoji galia;
- izoliacija;
- vientisumas⁸.

Betonas yra sudėtinė bet kokio kompozitinio elemento skerspjūvio dalis. Kompozitiniams elementams neatitinka tikrovės tolygios temperatūros sklaidos per skerspjūvį (kaip yra plieninių elementų paprastųjų modelių atveju) prielaida. Tai labai komplikuoja kompozitinių elementų skaičiavimo tvarką. Todėl pagal EN 1994.1.2 galima ne tik pasirinkti paprastesius ir sudėtingesnius skaičiavimo modelius (kaip plienui), bet ir tabuliuotus duomenis [2].

Reagavimo į kaitrą analizės kompozitiniams elementams tabuliuotuose duomenyse vaidmuo nebus aptariamas šiame konspekte. Taip yra, nes apkrovos laikomosios galios tabuliuotuose duomenyse nėra duota jokia nuoroda apie prielaidas, susijusias su reagavimu į kaitrą, nepaisant, kad duomenys, kurie yra duoti, remiasi patirtimi, sukaupta iš standartinio gaisro bandymų. Iš dalies izoliacijos tabuliuoti duomenys yra siejami: sijoms su lygiomis betoninėms plokštėms virš jų yra nuoroda į bendrai priimtas taisykles, skirtas lygioms betoninėms plokštėms; betoninėms plokštėms su plieniniais lakštiniais profiliuočiais jokių tabuliuotų duomenų nėra duota.

Paprastesiems skaičiavimo modeliams reagavimas į kaitrą dažnai – bet ne visada – yra pagrįstas sudėtingesniu šilumos perdavos modeliu, paaiškintu 2 skyriuje. Pagrindinai čia galima rinktis iš 3 atvejų:

- paprastas skaičiavimo modelis yra pagrįstas pusiau empirinėmis taisyklėmis, besiremiančiomis sutartinėmis prielaidomis; šio būdo, pavyzdžiui, laikomasi kompozitinėms kolonomis su betonu tarp juostų (žr. 15^b pav.);
- sistemingų skaičiavimų, besiremiančių sudėtingesniu modeliu, rezultatai yra naudojami rodiklių tyrime tam, kad gauti paprastas skaičiavimo taisykles; šio būdo laikomasi skaičiuojant kompozitines plokštes (žr. 15^a pav.);

⁸ Vientisumo kriterijui patikrinti jokio skaičiavimo modelio iki šiol nėra ir todėl šis kriterijus lieka šalia šio kurso apimties. Apie kai kuriuos galimus sprendimus, liečiančius vientisumo kriterijų, žr. [2].

- Sudėtingasis modelis kaip toks naudojamas paprastajame modelyje (kuris iš tiesų jau nėra tas paprastas modelis) ir supaprastinimai liečia mechaninį atoveikį; šis būdas panaudotas betonšerdėms plieninėms vamzdinėms kolonoms (žr.15^b pav.).

Įvairių pasirinkimų, esamų EN 1994.1.2, apžvalgą, atsižvelgiant į tabuliuotus duomenis ir reagavimo į kaitrą paprastuosius modelius, žr. C priede.

Sudėtingesniųjų reagavimo į kaitrą modelių pagrindas yra (ir turėtų būti!) šilumos perdavos lygtis, kaip aptarta 2 skyriuje. Kai kurių pavyzdžių žr.3, 4, 5 pav. Kompozitinių elementų atveju šiai lygčiai išspręsti būtina tvarka yra panaši į tą, kuri reikalinga betono ir plieno atvejais, kai naudojami sudėtingesnieji reagavimo į kaitrą modeliai.

Kituose skyriuose aukščiau minėtų principų taikymas bus aptariamas:

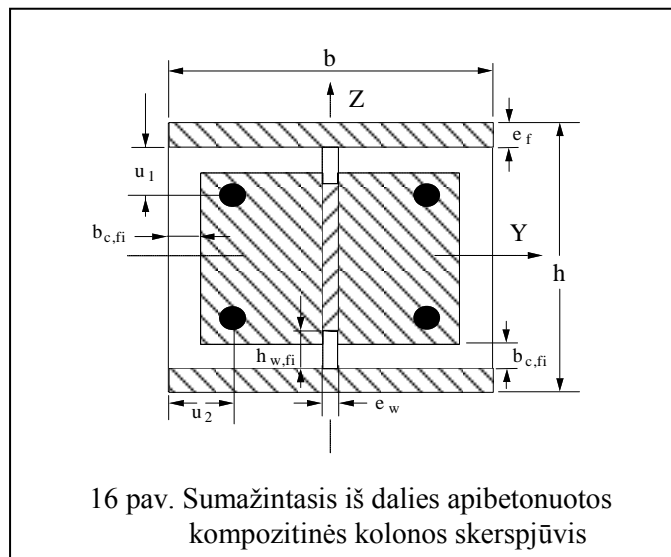
- iš dalies apibetonuotų kompozitinių kolonų (t.y. plieninių kolonų su betonu tarp jų juostų) reagavimo į kaitrą skaičiavimo taisyklės;
- betoninių plokščių su lakštiniu plieniniu profiliuočiu šiluminės izoliacijos kriterijui tikrinti paprastosios skaičiavimo taisyklės;
- betoninių plokščių su lakštiniu plieniniu profiliuočiu tempiamosios armatūros (neigiamojo lenkiamojo momento) temperatūrai vertinti paprastosios skaičiavimo taisyklės;
- betonšerdžių plieninių vamzdinių kolonų atspariumi ugniai skaičiuoti naudojimas sudėtingesniojo reagavimo į kaitrą modelio „paprastajame“ modelyje.

4.2 Iš dalies apibetonuotų plieninių profiliuotųjų kompozitinių kolonų reagavimo į kaitrą paprastosios taisyklės

Kad atsižvelgti į iš dalies apibetonuotų plieninių profiliuotųjų kompozitinių kolonų reagavimą į kaitrą, skerspjūvis yra padalinamas į keturias sudedamąsias dalis:

- plieninio profiliuoties juostos;
- plieninio profiliuoties sienelė;
- betonas patalpintas į plieninį profiliuotį;
- armatūros strypai.

Kiekviena sudedamoji dalis įvertinama sumažinto stiprio ir standžio (priklausomai nuo vidutinės temperatūros) pagrindu. Betonui ir plieninio profiliuoties sienieliui taip pat sumažintasis skerspjūvis imamas domėn. Žr.16 pav.



Paprastosios skaičiavimo taisyklės taikomos tik standartinio gaisro sąlygoms ir keturpusiam poveikiui.

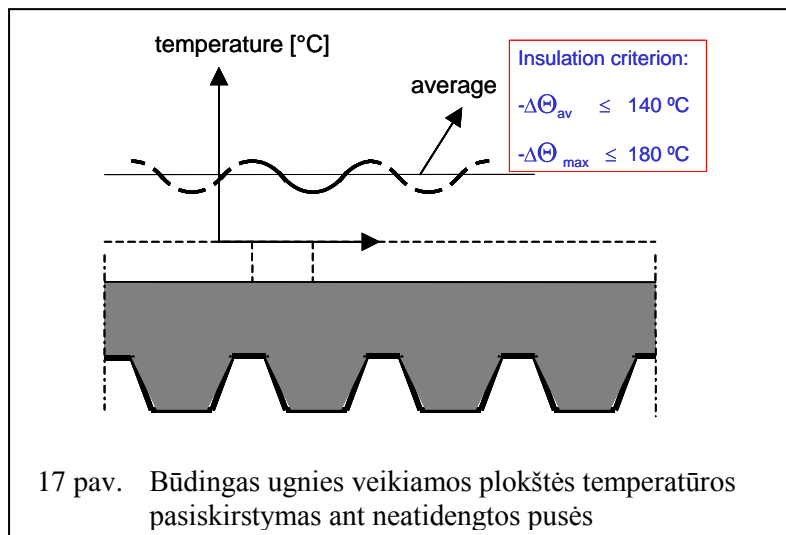
Vidutinė temperatūra ir betono skerspjūvio sumažinimas priklauso nuo standartinio gaisro poveikio trukmės (t.y. 30, 60, 90 ir 120 minučių) ir nuo skerspjūvio matmenų. Pastaruosius rodo skerspjūvio koeficientas, kuris įgauna (šiuo atveju) tokį pavidalą (žr. taip pat 16 pav.):

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

Būtinieji sąryšiai turi pusiau empirinį pobūdį ir yra išvesti iš standartinio gaisro bandymų. Platesnę apžvalgą žr. [2]. Kai kurios prielaidos pateiktos [20].

4.3 Skaičiavimo taisyklės kompozitinių betoninių plokščių su lakštiniu plieniniu profiliuočiu šiluminės izoliacijos kriterijui tikrinti

Paprastuosiuose skaičiavimo modeliuose šiluminės izoliacijos kriterijus atitinka kriterijų, taikomą standartinio gaisro bandymuose, t.y.: temperatūros prieaugis ant netiesiogiai veikiamos pusės neturi būti didesnis kaip 140 °C vidutiniškai arba 180 °C bet kuriame taške [14], kuris yra lemiamas. Kompozitinių betoninių plokščių su lakštiniu plieniniu profiliuočiu atveju temperatūra ant netiesiogiai veikiamo paviršiaus kinta kaip matuojamo taško padėties funkcija priklausomai nuo skerspjūvio profilio pavidalo. Žr.17 pav.



Paprastajame skaičiavimo modelyje izoliacijos kriterijui įvertinti į šį poveikį atsižvelgiama. Tuo tikslu sistemingi reagavimo į kaitrą skaičiavimai buvo atlikti su plieniniais lakštiniais profiliuočiais šiuo metu esamais Europoje, įskaitant abu trapecinius ir atvirkščiai trapecinius profiliuočius. Apžvalgą žr.1 lent.

1 lent. Šiluminiai skaičiavimai su šiuo metu esamais lakštiniais profiliuočiais

Lakštinio profiliuočio tipas	Betono storis H_B [mm]	Betono tipas
atvirkščiai trapecinis (6x)	50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120	Normalusis (NCW) ir lengvasis (LWC) Eurokodas 4, 1994
trapecinis (49x)		

Skaičiavimai grindžiami (1) lygtimi ir yra atliekami abiem normaliam ir lengvajam betonui. Tokie dalykai yra priimti:

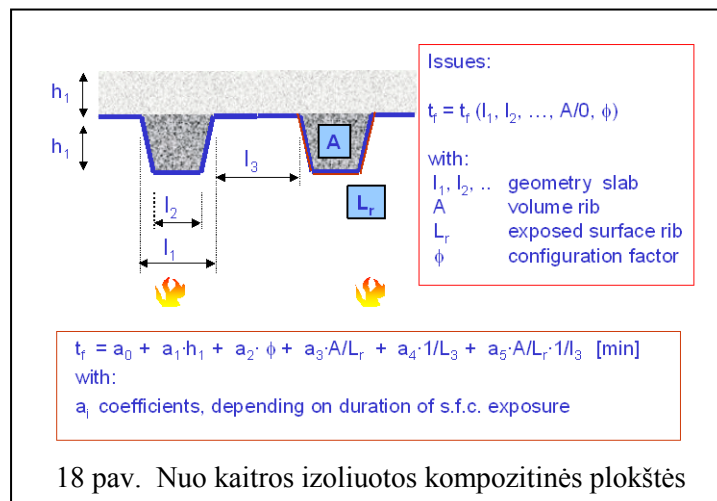
- standartinio gaisro sąlygos taikomos ant tiesiogiai veikiamos pusės (t.y. apačios);

- šilumos perdavos sąlygos veikiamoje pusėje (t.y. konvekcija ir spinduliavimas) atsižvelgia į plokštės profilio pavidalą ir cinko sluoksnio poveikį; detaliau žr. [15];
- betono šilumos laidumas (λ_c) ir šilumos talpa ($\rho_c c_c$) yra imami remiantis Eurokodo prielaidomis;
- 4% vidutinis drėgmės kiekis normaliam betonui ir 5% – lengvam betonui (pagal sausą svorį).

Kiekvienam iš nagrinėtų atvejų (žr.1 lent.), laikas, kai patenkinamas aukščiau minėtas izoliacijos kriterijus ($= t_{f,i}$), yra apskaičiuojamas. Rezultatai yra analizuojami tiesinės regresijos priemonėmis, naudojant tokius rodiklius:

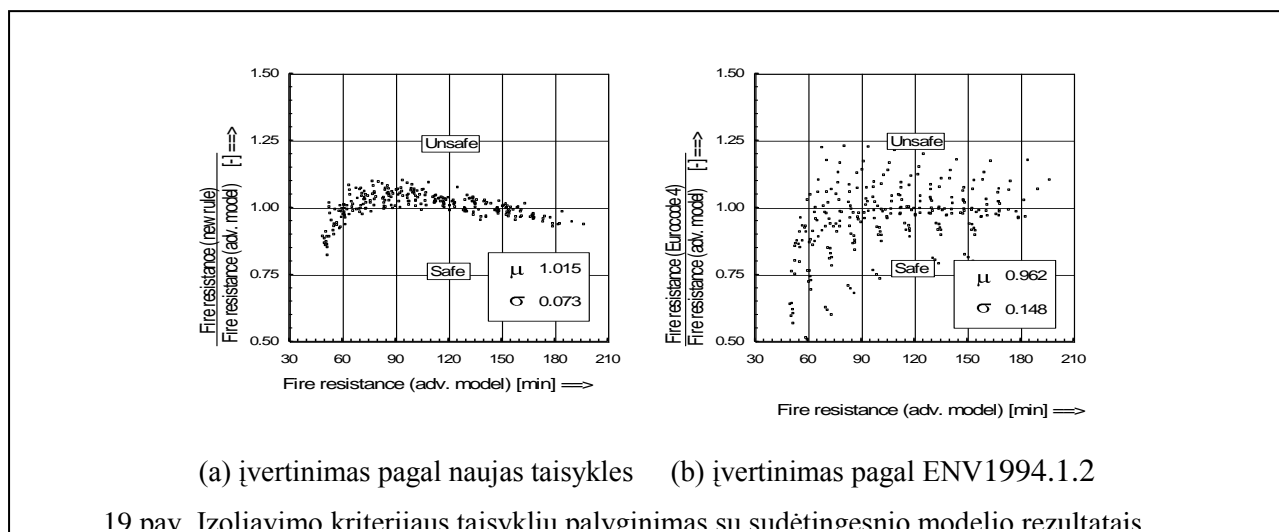
- briaunos geometrinis koeficientas (A/L_r)
- viršutinės juostos akiračio koeficientas (Φ)
- betoninės plokštės storis (h_1)
- viršutinės juostos plotis (l_3).

Regresijos konstantos buvo nustatytos paprasta tiesinės regresijos technika, esama standartinėse kompiuterių programose. Tvarka aptarta 18 pav. Smulkiau žr. D priedą, paimtą iš [2]. Pilnos prielaidos pateiktos [15].



j

Lygtis apskaičiuoti atspari ugniai atsižvelgiant į izoliacijos kriterijų yra apibrėžta EN 1994-1.2 ir ji pakeičia atitinkamą lygtį, duotą ENV variante. 19^a pav. palyginti paprastojo ir sudėtingesniojo modelių rezultatai. Supažindinimui panašus palyginimas, tačiau pagrįstas taisyklėmis, duotomis kompozitinių konstrukcijų gaisro dalies Eurokodo ENV variante, yra pateiktas 19^b pav. Išvada yra tokia, kad, taikant naujas taisykles, daug tiksliau įvertinamas atsparis ugniai atsižvelgiant į izoliaciją.



Atitinkamų regresijos koeficientų apžvalgą žr.2 lent.

2 lent. Koeficientai atspariui ugniai nustatyti atsižvelgiant į šilumos izoliaciją

	a_0 [min]	a_1 [min/mm]	a_2 [min]	a_3 [min/mm]	a_4 [mm min]	a_5 [min]
Normalusis betonas (NWC)	-28,8	1,55	-12,6	0,33	-735	48,0
Lengvasis betonas (LWC)	-79,2	2,18	-2,44	0,56	-542	52,3

4.4 Kompozitinių plokščių su lakštinio plieniniu profiliuočiu tempiamosios armatūros (neigiamo lenkiamojo momento)

Informacija apie temperatūros sklaidą kompozitinės plokštės skerspjūvyje yra reikalinga tam, kad apskaičiuoti plastinę lenkiamąją galią. Skirtumas yra daromas tarp neigiamos lenkiamosios galios (dažnai tarpatramio viduryje) ir teigiamos lenkiamosios galios (atramose, jei tai prasminga). Šiame pjūvyje dėmesio centre yra papildomos armatūros, panaudotos norint paveikti neigiamą lenkiamąją galią, temperatūra.

Papildomos armatūros (jei tokia yra), įprastai sudėtos briaunų ašyje, temperatūra yra itin svarbi neigiamai lenkiamajai galiai⁹. Tokių armatūros strypų temperatūrą labai veikia gaisras.

Tokiu pat būdu, kaip parodyta 4.3 izoliacijos kriterijui, buvo išvestos regresijos formulės, leidžiančios rasti papildomos armatūros temperatūrą (Θ_r), kaip funkciją tokių pagrindinių rodiklių:

- atstumo iki apatinės juostos (u_3);
- briaunos armatūros strypų padėties (z), pagal E priedą;
- sienelės polinkio kampo (α).

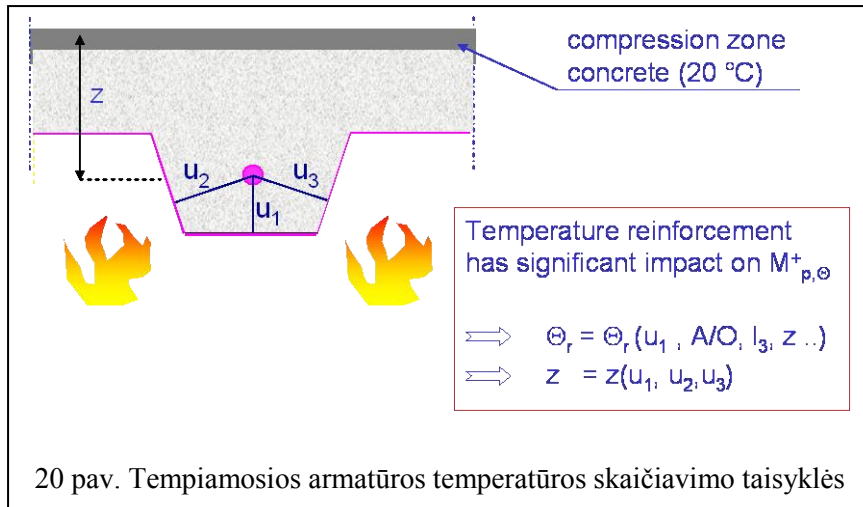
Pagrįsta sistemingais skaičiavimais tokia lygtis rasta:

$$\theta_s = c_0 + \left(c_1 \cdot \frac{u_3}{h_2} \right) + c_2 \cdot z + \left(c_3 \cdot \frac{A}{L_r} \right) + c_4 \cdot \alpha + \left(c_5 \cdot \frac{1}{\ell_3} \right) \quad \dots (6)$$

Ši tvarka aptarta 20 pav. Norint smulkesnio apibūdinimo, žr.E priedą. Pilnas aprašymas pateiktas [15].

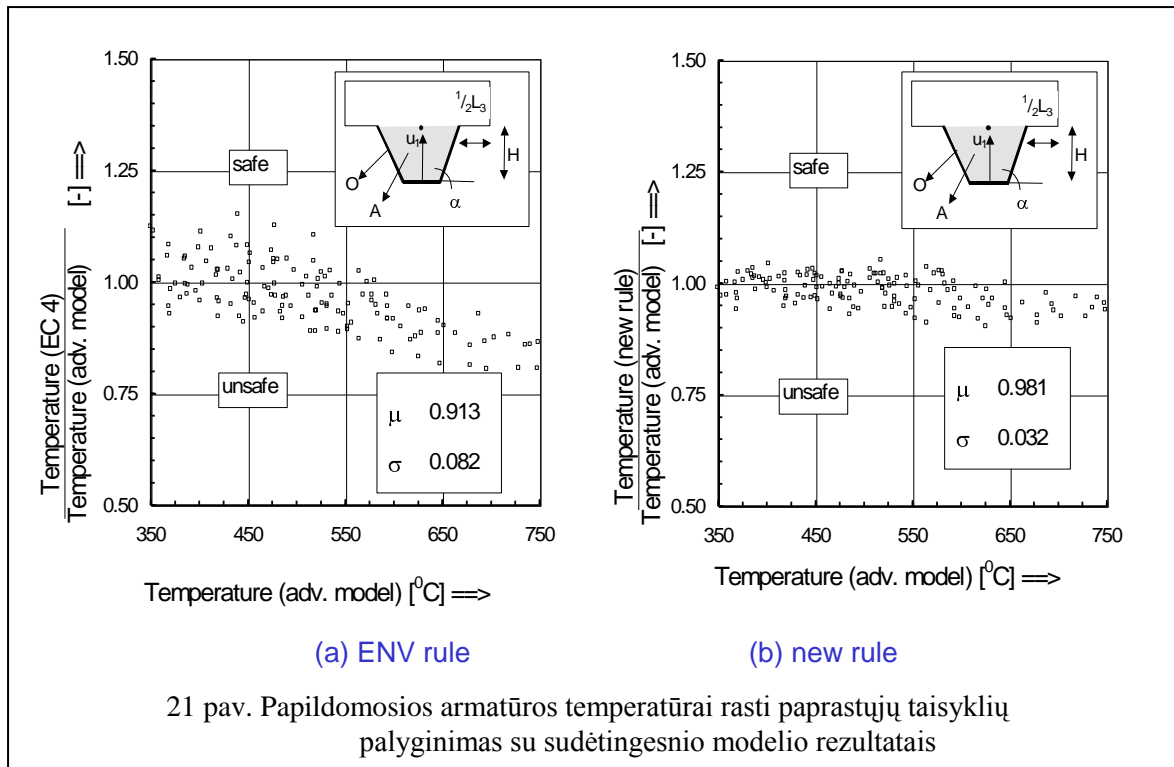
Regresijos konstantos priklauso nuo standartinio gaisro poveikio trukmės ir yra – ir normaliajam ir lengvajam betonui – duotos 3 lent. 21^a pav. palyginti paprastojo ir sudėtingesniojo modelių rezultatai. Supažindinimui panašus palyginimas, tačiau pagrįstas taisyklėmis, duotomis kompozitinių konstrukcijų gaisro dalies Eurokodo ENV variante [16] , yra pateiktas 21^b pav. Išvada yra tokia, kad, taikant naujas taisykles, daug tiksliau įvertinama papildomos armatūros temperatūra.

⁹ Viršutinės skerspjūvio dalies (gniuždomosios zonos!) temperatūros yra žemos. Taip yra todėl, kad skaičiuojant neigiamą lenkiamąją galią, kambario temperatūros reikšmės sąlygoja betono stiprį.



3 lent. Koeficientai briaunos armatūros strypų temperatūroms nustatyti

Betonas	Atsparis ugniai [min]	c_0 [°C]	c_1 [°C]	c_2 [°C/mm ^{0.5}]	c_3 [°C/mm]	c_4 [°C/°]	c_5 [°Cmm]
Normalusis (NWC)	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
Lengvasis (LWC)	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



Aukščiau paminėtas būdas naudojamas EN 1994.1.2. Atsižvelgiant į tai pastebėtina, kad ir plieninis lakštinis profiliuotis gali turėti didelį indėlį į neigiamą lenkiamąją galią. Taip yra todėl, kad EN 1994-1.2 taip pat paprastas temperatūros sklaidos įvairiose plieninio lakšto vietose skaičiavimo taisyklės pateikia. Šių taisyklių esmė yra panaši į tų, kurios aprašytos čia papildomosios armatūros temperatūrai rasti.

4.5 Reagavimo į kaitrą modelis, naudojamas betonšerdžių plieninių vamzdinių kolonų atspariui ugniai skaičiuoti

Betonšerdėms plieninėms vamzdinėms kolonomis skirtos paprastosios taisyklės yra – tiek, kiek reagavimas į kaitrą yra liečiamas – remiasi sudėtingesniu skaičiavimo modeliu pagal (1) lygtį, tuo tarpu supaprastinimai liečia mechaninio atoveikio modelį. Be to, reagavimas į kaitrą remiasi standartinio gaisro sąlygomis, derinamomis su šilumos perdavos sąlygomis, apibrėžtomis [7]. Pagrindiniai rodikliai yra tokie¹⁰:

- (standartinio) gaisro poveikio trukmė;
- plieninės vamzdinės kolonos skerspjūvio matmenys.

Toks būdas reiškia, kad nėra jokių paprastų analitinių taisyklių betonšerdžių plieninių vamzdinių kolonų atspariui ugniai apskaičiuoti. Vadinasi, vartotojui reikėtų pateikti didelį skaičių grafikų, turinčių nesudėtingą projektavimui skirtą informaciją. Žiūrėk, pavyzdžiui, “CIDECT projektavimo vadovą plieninėms vamzdinėms kolonomis, kurias veikia gaisras”, kuriame yra pateikta tokia projektavimui skirta informacija – besiremianti EN1994.1.2 ENV variantu – apimanti daugiau kaip 40 diagramų [17]. Pavyzdys pateiktas 22^a pav.

➤ Design charts available

➤ Unpractical

➤ Need for “user friendly” design tool

➤ ⇒ e.g. POTFIRE

no. concrete rebar	quantity	%
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) tradicinis būdas

input →

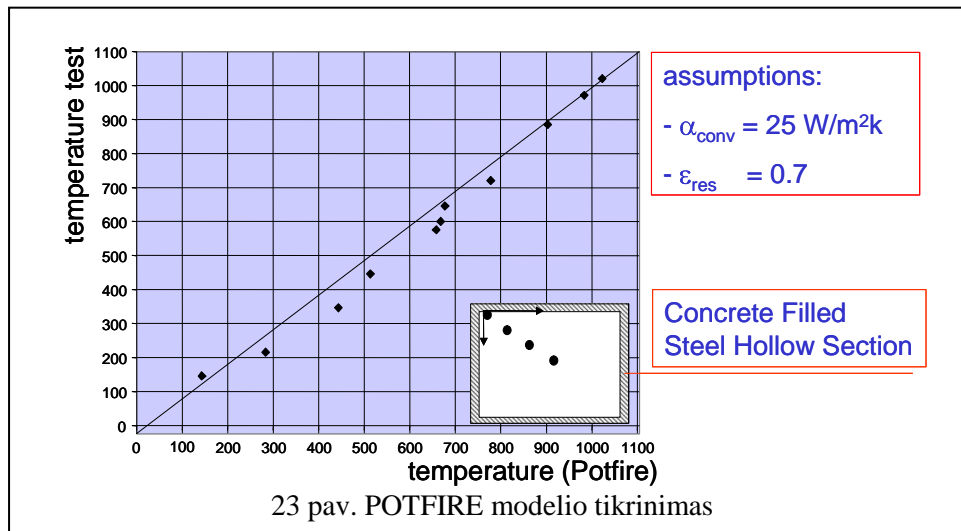
output →

(b) POTFIRE būdas

22 pav. Betonšerdžių plieninių vamzdinių kolonų elgsenos ugnyje skaičiavimas

Štai kodėl speciali tikslinė vartotojui palanki kompiuterių programa POTFIRE [18] buvo sukurta standartinio gaisro sąlygų veikiamų betonšerdžių plieninių vamzdinių kolonų atspariui ugniai nustatyti. Ši programa visiškai dera su Eurokodo prielaidomis. 22^b pav. Įvesties ir išvesties ekranai yra sutvarkyti. Programa plačiai patikrinta su (standartinio) gaisro bandymų rezultatais [19]. Dėl pavyzdžio žiūrėk 23 pav., kuriame standartinio gaisro sąlygų veikiamos betonšerdės plieninės vamzdinės kolonos skerspjūvio įvairių taškų temperatūros rodmenys yra palyginti su skaičiavimų su POTFIRE [19] rezultatais. Sutapimas yra patenkinamas.

¹⁰ Svarbūs mechaninio atoveikio rodikliai yra: plieno klasė, betono kokybė, armatūros %.



Pastaba: yra svarbu įsitikinti, kad netgi ne taip „paprasti“ modeliai, kaip POTFIRE yra susiję su taikymo sritimi. Žr.4 lent. Iš 23 pav. bus aišku, kad tai greičiau yra dėl mechaninio atoveikio modelio, o ne dėl reagavimo į kaitrą modelio neapibrėžtumų.

4 lentelė. Betonšerđzių plieninių vamzdinių kolonų elgsenos ugnyje skaičiavimo pagal EN1994.1.2 taikymo sritis

apatinė riba	padėtis	viršutinė riba
0	Klumpamasis ilgis	13.5 m
230 mm	Skerspjūvio aukštis	1100 mm
230 mm	Skerspjūvio plotis	500 mm
0 %	Plieninės armatūros procentas	6%
0 min	Atsparis standartiniam gaisrui	120 min

4.6 Įvertinimas

Kompozitinių plieninių-betoninių elementų reagavimo į kaitrą skaičiavimas yra – palyginus su plikų ir izoliuotų plieninių elementų reagavimo į kaitrą analize – sudėtingas. Taip yra dėl to, kad temperatūros sklaida tokiuose elementuose yra labai netolygi. Susidoroti su šiuo sudėtingumu EN 1994.1.2 siūlo tokiomis priemonėmis:

- tabuliuotaisiais duomenimis;
- paprastaisiais skaičiavimo modeliais.

Tabuliuotieji duomenys paremti patirtimi, įgyta iš standartinio gaisro bandymų rezultatų. Paprastųjų skaičiavimo modelių prielaidos labai kinta: kartais jos grindžiamos tiesioginiu standartinio gaisro bandymų rezultatų aiškinimu, priimant kai kurias pagrindines teorines sąvokas. Pavyzdžiu būtų kompozitinė kolona, užbetonuota tarp juostų. Kai kuriais panaudojimo atvejais paprastosios taisyklės išplaukia iš apibendrinimų sistemingų skaičiavimų, besiremiančių sudėtingesniųjų skaičiavimų baze. Pavyzdžiui, kompozitinės plokštės su lakštiniu plieniniu profiliuočiu. Kitais atvejais sudėtingesnis modelis taikomas (pvz., betonšerđės plieninės vamzdinės kolonos). Pagrindinis paprastųjų reagavimo į kaitrą analizės modelių bruožas yra toks, kad jų naudojimas praktiškai apribotas standartinio gaisro sąlygų.

Natūralaus gaisro saugos koncepcijos (NFSC) būdas galimas kompozitinių konstrukcijų reagavimui į kaitrą, bet reikalingas sudėtingesnis modeliavimas. Būtinų priemonių (t.y. kompiuterinių kodų) įvairovė egzistuoja šiuo metu. Žr.4 dalį.

LITERATŪRA

- [1] EN 1993.1.2: “Eurocode 3: Design of Steel Structures, part 1.2: General Rules - Structural fire design”. CEN TC 250, 2004 (to be published in 2004).
- [2] EN 1994.1.2: “Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, part 1.2: General Rules - Fire Design”. CEN TC 250, 2004 (to be published in 2004).
- [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] EN 1991.1.2: “Eurocode 1: Actions on Structures, part 1.2: General Actions – Actions on structures exposed to fire”. CEN TC 250, 2002.
- [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] ENV13381-4: “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] prENV13381-1: “Test method for determining the contribution to the fire resistance of structural members Part 1: Horizontal protective membranes”. CEN TC 127, (under preparation).
- [12] ENV13381-2: “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] ENV 1994.1.2: “Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, part 1.2: General Rules – Structural fire design”. CEN TC 250, 1995.
- [17] Twilt, L. et al: “Design Guide for Structural Hollow Section Columns Exposed to Fire”. CIDECT, Verlag TUV Rheinland, 1994.
- [18] POTFIRE Manual, version 1-1, CTICM, Paris, 2000.
- [19] Twilt, L., Both, C, Kruppa, J., Zoa, B.: “Fire Design of Unprotected Concrete Filled SHS Columns: The further development and extension of application of user friendly PC software”. Proceedings of the ISTS conference, Düsseldorf, April 2001.
- [20] REAFO/CAFIR: “Computer assisted analysis of the fire resistance of steel and composite concrete structures”. CEC Research 7210-SA/502, Final Report, Luxembourg, March 1986.

A PRIEDAS: FURJE DIFERENCIALINĖ LYGTIS

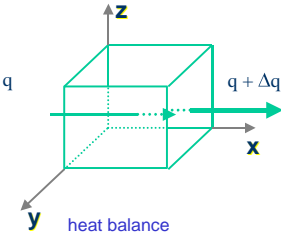
- Thermal conduction ($= \lambda$)
- Thermal capacity ($= \rho \cdot c_p$)

DV: (shown for 1 direction only)

$$\frac{\partial(\rho c_p \Theta)}{\partial t} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial x})}{\partial x} = 0$$

boundary condition: incoming/outgoing flux at surface: $h_{\text{net,tot}}$

initial condition: room temperature conditions



$\Delta q / \Delta x + \Delta(\rho c_p \Theta) / \Delta t = 0$

Fourier's law

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

A.1.pav. Reagavimas į kaitrą: pagrindiniai dalykai

Laikyti, kad šilumos srautas (q [W/m^2]) į tūrinį elementą, kurio ρ [kg/m^3], c_p [J/kg], λ [W/mK] ir matmenys Δx , Δy , Δz [m] x kryptimi. Θ yra temperatūra [$^{\circ}\text{C}$]; t yra laikas [s].

Šilumos balansas: (ne šiluma, sukelta tūriniame elemente!)

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

→ $\Delta q / \Delta x + \Delta(\rho \cdot c_p \cdot \Theta) / \Delta t = 0$

Furje dėsnis: (tik x ašies kryptimi)

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

Taigi:

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

Kai $\Delta \rightarrow 0$, aukščiau pateikta diferencialinė lygtis (žr. A.1 pav.), kuri gali būti paprastai išplėsta y ir z ašių kryptimis, galioja. Ši lygtis gali būti (skaitmeniniu būdu!) išspręsta žinomoms kraštinėms sąlygoms (→ šiluminiai poveikiai) ir pradinėms sąlygoms (→ kambario temperatūra).

B PRIEDAS: PLIENINIŲ ELEMENTŲ REAGAVIMAS Į KAITRĄ, PRIIMANT TOLYGLIAI PASISKIRSČIUSIĄ TEMPERATŪRĄ

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\rho c_a \Theta)}{\partial t} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial \Theta}{\partial x})}{\partial x} = 0 \\ \text{boundary \& initial} \\ \text{conditions} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{d\Theta_a}{dt} = \frac{\dot{h}_{tot} A_m}{\rho_a c_a V}$$

with
 A_m is exposed surface area member [m²/m]
 V is volume member [m³/m]

Note: key is uniform temperature distribution

B.1.pav. Plieninių profiliuočių reagavimas į kaitrą (tolygiai pasiskirsčiusi plieno temperatūra)

Priimti tolygų temperatūros pasiskirstymą skerspjūvyje ($\lambda \rightarrow \infty$). Taigi: $\partial \Theta / \partial x \rightarrow 0$, $\partial \Theta / \partial y \rightarrow 0$, $\partial \Theta / \partial z \rightarrow 0$.

Paimti plieninį bloką (tūris: V ; veikiamojo paviršiaus plotas: A_m), pilnai liepsnose. Grynas šilumos srautas, įeinantis į bloką per laiko intervalą dt seka iš:

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

Plieno tūrio šilumos talpos prieaugis per laiko intervalą dt seka iš (tolygus temperatūros pasiskirstymas!):

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

Šilumos balansas reikalauja, kad plieninio bloko šilumos talpos prieaugis prilygsta šilumos srautui į bloką. Iš (B.1) and (B.2) lygčių, atlikus kai kuriuos pertvarkymus, turime:

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

čia:

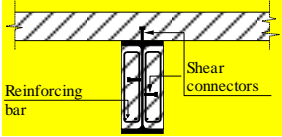
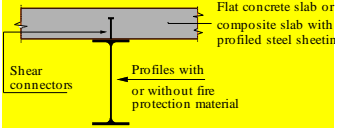
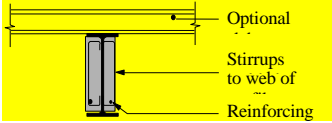

A_m / V yra plieninio profiliuočio masyvumo koeficientas [m⁻¹];

$c_a \rho_a$ yra plieno šilumos talpa [J/m³C]



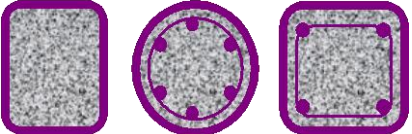
Ši paprasta diferencialinė lygtis gali būti išspręsta skaitmeniniu būdu duotoms pradinėms ir kraštinėms sąlygoms.

C PRIEDAS: TABULIUOTIEJI DUOMENYS IR PAPRASTIEJI MODELIAI PAGAL EN 1994.1.2

C1 lentelė. Tabuliuotųjų duomenų ir reagavimo į kaitrą analizės paprastuose modeliuose (gulstieji elementai) bendrasis supratimas

elemento tipas	turimi tabuliuotieji duomenys	reagavimo į kaitrą analizė, panaudota paprastame modelyje
 <p>Reinforcing bar</p> <p>Shear connectors</p>	taip	ne
 <p>Flat concrete slab or composite slab with profiled steel sheeting</p> <p>Shear connectors</p> <p>Profiles with or without fire protection material</p>	ne	pusiau empirinis būdas
 <p>Optional</p> <p>Stirrups to web of</p> <p>Reinforcing</p>	ne	pusiau empirinis būdas
	ne	sudėtingesniojo skaičiavimo modelio rezultatų apibendrinimas

C2 lentelė. Tabuliuotųjų duomenų ir reagavimo į kaitrą analizės paprastuose modeliuose (statieji elementai) bendrasis supratimas

elemento tipas	turimi tabuliuotieji duomenys	reagavimo į kaitrą analizė, panaudota paprastame modelyje t
	taip	ne paprastas modelis
	taip	pusiau empirinis būdas
	taip	Tiesioginis sudėtingesniojo šiluminio modelio panaudojimas

D PRIEDAS. EC TAISYKLĖS SKIRTOS ATSPARIUI UGNIAI NUSTATYTI ATSIŽVELGIANT Į KOMPOZITINIŲ PLOKŠČIŲ SU LAKŠTINIŲ PLIENINIŲ PROFILIUOČIŲ ŠILUMINĘ IZOLIACIJĄ

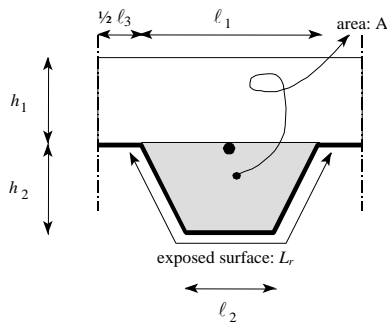
(1) Sprendžiamasis atsparis ugniai atsižvelgiant į abiejų, vidutinio temperatūros kilimo (=140°C) ir didžiausio temperatūros kilimo (=180°C), kriterijų “I”, seka iš tokios lygties:

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

čia:

t_i	atsparis ugniai atsižvelgiant į šiluminę izoliaciją	[min];
A	briaunos betono tūris į briaunos m ilgį	[mm ³ /m];
L_r	briaunos veikiamasis plotas į briaunos m ilgį	[mm ² /m];
A/L_r	briaunos geometrijos koeficientas	[mm];
Φ	viršutinės juostos akiračio koeficientas	[-];
ℓ_3	viršutinės juostos plotis (žr.D.1.1 pav.)	[mm].

a_i koeficientų, betono storio h_1 įvairias reikšmes, abiem – normaliajam ir lengvajam – betonams žr. pagrindinio teksto 1 lentelėje. Tarpinėms reikšmėms rasti tiesinė interpoliacija leidžiama.



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

D.1.pav. Briaunos matmenų koeficiento A/L_r nustatymas kompozitinės plokštės briaunoms

(2) Viršutinės juostos konfigūracijos arba akiračio koeficientas Φ gali būti nustatytas taip:

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

E PRIEDAS. EC TAISYKLĖS KOMPOZITINIŲ PLOKŠČIŲ SU LAKŠTINIU PLIENINIŲ PROFILIUOŠIU GNIUŽDOMAJAI ARMATŪRAI NUSTATYTI

(1) Nustatyti armatūros strypų, esančių briaunose, temperatūrą pagal E.2.1 pav. taip:

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

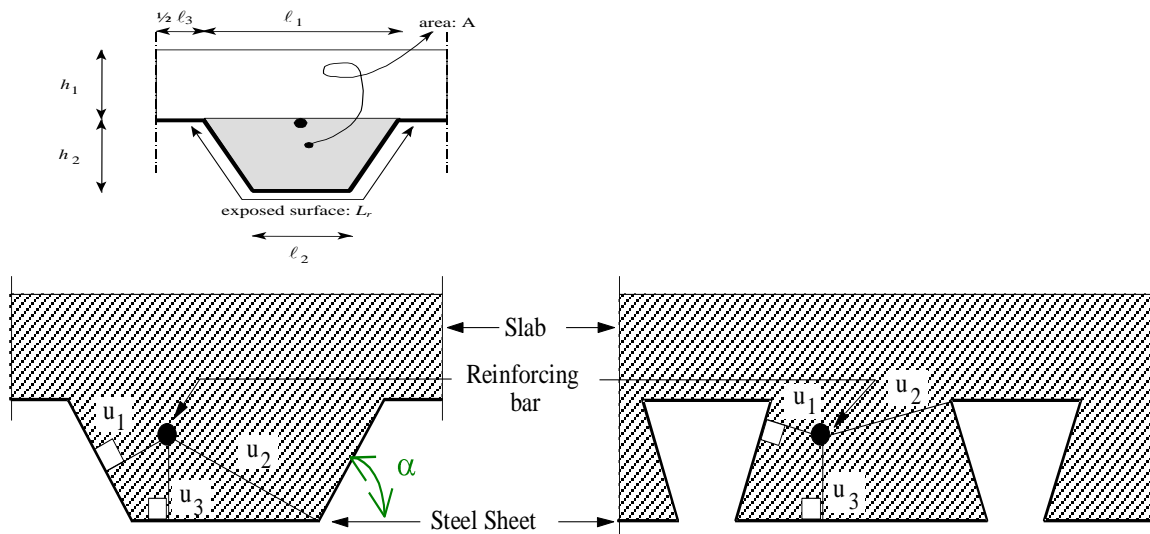
čia:

θ_R	briaunos papildomos armatūros temperatūra	[°C];
u_3	apatinės juostos atstumas	[mm];
z	armatūros padėties briaunoje rodmuo	[mm ^{-0.5}];
α	sienelės polinkio kampas	[laipsniai];

Koeficientai c_i įvairioms atspario ugniai reikšmėms ir abiem – normaliajam ir lengvajam – betonams duoti pagrindinio teksto 3 lentelėje. Tarpinėms reikšmėms rasti tiesinė interpoliacija leidžiama.

(2) Nustatyti z rodmenį, kuris rodo armatūros strypo padėtį:

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



E.1 pav. Armatūros padėtis

(3) Atstumai u_1 , u_2 ir u_3 yra išreikšti mm ir yra nustatomi taip:

- u_1, u_2 : armatūros strypo centro trumpiausias atstumas iki plieninio lakštinio profiliuotio sienelės bet kurio taško;
- u_3 : armatūros strypo centro atstumas iki plieninio lakštinio profiliuotio apatinės juostos.