



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

**Irmantas Karlinskas**

**ĮTEMPIŲ BŪVIO TYRIMAS SUVIRINTAME VAMZDYJE SU  
PLOKŠČIA SIŪLE, KAI VEIKIA VIDINIS SLĖGIS IR AŠINĖ  
APKROVA**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Doc. dr. Dainius Vaičiulis

**PANEVĖŽYS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

**ĮTEMPIŲ BŪVIO TYRIMAS SUVIRINTAME VAMZDYJE SU  
PLOKŠČIA SIŪLE, KAI VEIKIA VIDINIS SLĖGIS IR AŠINĖ  
APKROVA**

Baigiamasis magistro projektas  
Mechanikos inžinerija (621H30001)

**Vadovas**

Doc. dr. Dainius Vaičiulis

**Recenzentas**

**Projektą atliko**

Irmantas Karlinskas

PANEVĖŽYS, 2017



## KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

Irmantas Karlinskas

(Studento vardas, pavardė)

Mechanikos inžinerija 621H30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Įtempimų būvio tyrimas suvirintame vamzdyje su plokščia siūle, kai veikia vidinis slėgis ir ašinė apkrova“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2017 m. gegužės 30 d.  
Panevėžys

Patvirtinu, kad mano, Irmanto Karlinsko, baigiamasis projektas tema „Įtempimų būvio tyrimas suvirintame vamzdyje su plokščia siūle, kai veikia vidinis slėgis ir ašinė apkrova“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

## BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: Irmantui Karlinskui Grupė: PMM – 5

### 1. Darbo tema patvirtinta 2017 m. kovo mėn. 30 d. dekanų potvarkiu Nr. V25-13-8:

Lietuvių kalba: Įtempimų būvio tyrimas suvirintame vamzdyje su plokščia siūle, kai veikia vidinis slėgis ir ašinė apkrova

Anglų kalba: Research on the Stress State in Welded Pipe with a Flat Weld under Internal Pressure and Axial Load

### 2. Darbo tikslas:

Ištirti kaip įtempimų būvio dedamosios pasiskirsto suvirinto vamzdžio siūlės srityje.

### 3. Reikalavimai ir sąlygos:

Tyrimą atlikti laikant, kad siūlė yra plokščia. Nustatyti kokia apkrova (vidinis slėgis ar ašinė apkrova) turi didesnę įtaką sujungimo stiprumui. Rasti pavojingąsias (labiausiai apkrautas) suvirintojo sujungimo vietas. Nustatyti kaip įtempimų būvio dedamosios suvirintame vamzdyje priklauso nuo sujungimo geometrijos ir medžiagų.

### 4. Projekto struktūra. Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BP pobūdį.

Literatūros apžvalga, Tiriamoji dalis, Išvados ir Literatūros sąrašas.

### 5. Ši užduotis yra neatskiriama magistro baigiamojo projekto dalis.

### 6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas

2017-05-29

(data)

Užduotį gavau:

Irmantas Karlinskas

(studento vardas, pavardė, parašas)

2017-02-01

(data)

Vadovas:

doc. Dainius Vaičiulis

(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

2017-02-01

(data)

# Turinys

SANTRAUKA .....	6
SUMMARY .....	7
Įvadas.....	8
1. Literatūros analizė .....	9
2. Tiriamoji dalis .....	12
2.1. Tyrime naudotas modelis.....	12
2.2. Apkrovos įtaka.....	14
2.3. Vamzdžio ir siūlės geometrinių parametų įtaka .....	33
2.4. Medžiagų mechaninių charakteristikų įtaka .....	36
Išvados.....	43
Literatūra .....	44
Priedas .....	46

Karlinskas, Irmantas. Įtempių būvio tyrimas suvirintame vamzdyje su plokščia siūle, kai veikia vidinis slėgis ir ašinė apkrova. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Dainius Vaičiulis; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: Technologijos mokslai, Mechanikos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: suvirintas vamzdis, įtempių būvis, vidinis slėgis, ašinė apkrova.

Panevėžys, 2017. 50 p.

## **SANTRAUKA**

Magistro baigiamajame projekte buvo tirti suvirinto vamzdžio su plokščia siūle įtempių būvio dedamųjų priklausomybė nuo veikiančių apkrovų, vamzdžio ir siūlės geometrinių parametrų (vamzdžio vidinio skersmens, vamzdžio sienelės storio ir suvirinimo siūlės aukščio), vamzdžio bei siūlės medžiagų mechaninių charakteristikų (tamprumo modulių ir Puasono koeficientų). Pradžioje buvo atlikta panašios tematikos mokslinės literatūros analizė. Atlikus tyrimą nustatyta, kad pavojingoji zona yra kontakto plokštumoje ties vamzdžio vidiniu spinduliu. Pavojingesnė apkrova yra vidinis slėgis (jo įtaka suvirintam vamzdžiui yra didesnė negu ašinės apkrovos). Įtempių būviui didžiausią įtaką iš geometrinių parametrų turi vamzdžio vidinis skersmuo ir vamzdžio sienelės storis. Gauta, kad įtempių būviui didesnę įtaką turi medžiagų tamprumo moduliai negu medžiagų Puasono koeficientai.

Karlinskas, Irmantas. Research on the Stress State in Welded Pipe with a Flat Weld under Internal Pressure and Axial Load: Master's thesis in final project / supervisor assoc. prof. Dainius Vaičiulis. The Faculty of Panevėžys technology and business, Kaunas University of Technology.

Research area and field: Technological sciences, Mechanical engineering.

Key words: welded pipe, stress state, internal pressure, axial load.

Panevėžys, 2017. 50 p.

## **SUMMARY**

The stress state components of a welded pipe with a flat weld in dependence on the active load, on the geometrical parameters of the pipe and the weld (the internal diameter of the pipe, the thickness of the wall of the pipe and the height of the welded weld). On the mechanical characteristics of the materials of the pipe and the weld (the modulus of elasticity and Poisson's ratio) were examined in the Master's final project. Firstly, the analysis on the similar scientific literature was performed. After the investigation it was found that the most loaded zone is in the plane of a contact at the internal radius of the pipe. The more dangerous load is the internal pressure (its influence on the welded pipe is bigger than the influence of the axial load). The internal diameter of the pipe and the thickness of the wall of the pipe are the most influential geometrical parameters. It was found, that the modules of elasticity have bigger influent on the stress state than the Poisson's ratios

## Įvadas

Suvirinimas – tai neišardomų detalių sujungimo technologinis procesas, kuris kartais būna vienintelis būdas detalėms sujungti. Vienas iš suvirinimo panaudojimo būdų yra dujų, kuro ar vandens vamzdynų montavimas. Šiuose sujungimuose vamzdynai yra suvirinami, o juos dažniausiai veikia vidinio slėgio apkrova. Kitas galimas suvirintų vamzdžių panaudojimo būdas yra apvalių vamzdžių naudojimas statybose įvairioms konstrukcijoms, kurios dirba kaip atramos. Tokiose konstrukcijose paprastai veikia tik ašinė apkrova. Bendruoju atveju vamzdį gali veikti abiejų tipų apkrovos (vidinis slėgis ir ašinė apkrova), tačiau šio baigiamojo projekto autoriui nepavyko rasti darbų, kuriuose būtų nagrinėjamas toks apkrovimo atvejis. Todėl nuspręsta patyrinėti, kaip suvirintame vamzdyje su plokščia siūle įtempių būvis priklauso, nuo vamzdį veikiančių minėtų apkrovų.

### **Darbo tikslai:**

- nustatyti, kuri iš veikiančių apkrovų (vidinis slėgis ar ašinė jėga) turi didesnę įtaką vamzdyje atsirandantiems įtempiams;
- išsiaiškinti, kokią įtaką įtempių būviui turi vamzdžio geometriniai parametrai (vamzdžio vidinis skersmuo, vamzdžio sienelės storis ir suvirimo siūlės aukštis);
- nustatyti, kokią įtaką įtempių būvio dedamosioms turi vamzdžio ir siūlės medžiagų charakteristikos (tamprumo moduliai ir Puasono koeficientai).

### **Darbo metodai:**

- literatūros analizė;
- baigtinių elementų metodas;
- lyginamoji analizė;

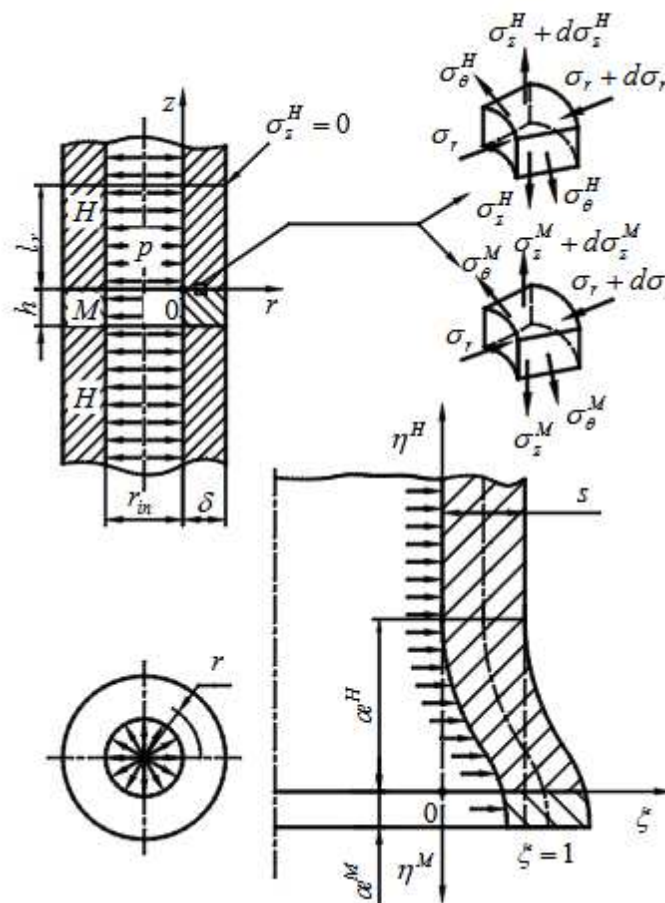
**Darbo aprobavimas ir publikacijos.** Dalyvauta studentų mokslinėje konferencijoje „Technologijų ir verslo aktualijos – 2017“, vykusioje Panevėžyje 2017 m. balandžio 28 d. Skaitytas pranešimas tema „Suvirintojo vamzdžio su plokščia siūle, veikiamo vidinio slėgio ir ašinės apkrovos, įtempimų intensyvumo tyrimas”.

**Darbo apimtis ir struktūra.** Baigiamąjį magistro projektą sudaro akademinio sąžiningumo deklaracija, baigiamojo projekto užduotis, santrauka lietuvių ir anglų kalbomis, įvadas, du skyriai, išvados ir literatūros sąrašas. Darbo apimtis 50 p.



# 1. Literatūros analizė

Suvirinimas labai dažnai naudojamas tiesiant magistralinius vamzdžius. Dažniausiai tokiuose vamzdžiuose veikia tik vidinis slėgis. Darbe [1] nagrinėjamas vienalyčio vamzdžio, veikiamo vidinio slėgio, įtempiai ir deformacijos esant plokščiajam deformacijų būviui ir tampria plastiniam deformavimui. Šiame darbe autoriai pateikė įtempių ir deformacijų skaičiavimo metodiką. Tai pat naudojant BEM (baigtinių elementų metodą) įrodė, kad analitinės metodikos tikslumas yra priimtinas skaičiavimams atlikti. Darbe [2] autoriai pateikė vamzdžio įtempio ir deformacijų būvio dedamųjų priklausomybę nuo slėgio, santykinio sienelės storio ir medžiagų mechaninių savybių nevienalytiškumo (žr. 1.1 pav.). Autoriai nustatė, kad labiausiai apkrautos zonos yra vamzdžio vidiniame paviršiuje: kietame metalė – kontakto plokštumoje, minkštame – siūlės centre. Analitiškai apskaičiuoti įtempiai ir deformacijos suvirinto vamzdžio atskirose zonose gerai sutampa su jų vertėmis, apskaičiuotomis BEM.

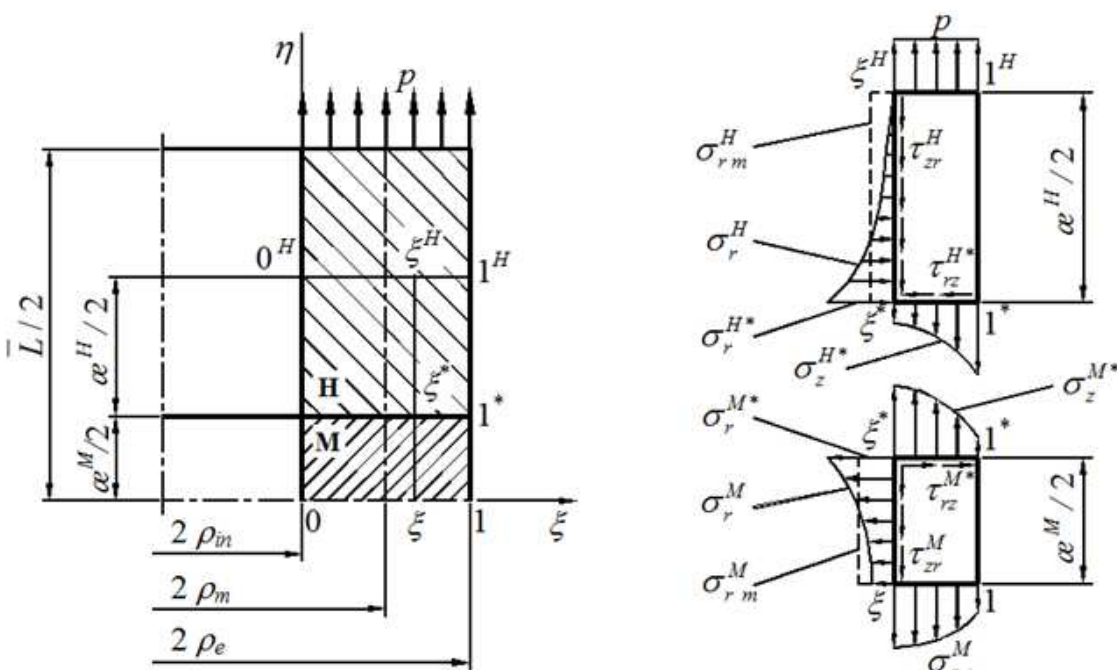


1.1 pav. Vamzdžio veikiamo vidinio slėgio skaičiuojamoji schema [2]

Tyrimė [3] buvo tirta plonasienių vamzdžių stiprumas kai jį veikia vidinis slėgis. Tyrimas parodė, kad tarp suvirintųjų ir nesuvirintųjų vamzdžių stiprumas lenkiant ar tempiant bandinius skiriasi iki 1 %.

Straipsnyje [4] nagrinėtas 304L tipo vamzdis veikiamas vidinio slėgio ir įvairių išorinių apkrovų. Tyrimas parodė, kad šių tipų vamzdžiai gali būti naudojami, kai vamzdį veikia didelės apkrovos.

Vamzdynų trasose neišvengiamos alkūnės. Ties jomis atsiranda papildomos apkrovos vamzdžio ašies kryptimi. Straipsnyje [5] aprašyta įtempių ir deformacijų būvio komponentių nustatymo metodika sandūrinėje suvirintoje jungtyje su minkštu plokščiu tarp sluoksniu (siūle) esant tampriai plastiniam tempimui (žr. 1.2 pav.). Darbe pateiktas įtempių ir deformacijų būvio dedamųjų atskirose jungties zonose apskaičiavimo algoritmas. Analitiškai apskaičiuotas sandūrinės suvirintos jungties su minkštu tarp sluoksniu stiprumas ir išilginių deformacijų pasiskirstymas patikrinti eksperimentiniais tyrimais.

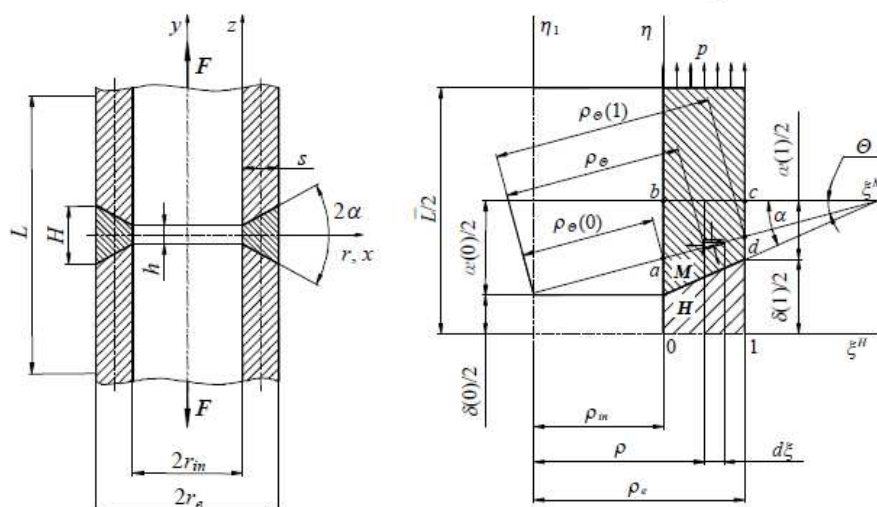


1.2 pav. Vamzdžio veikiamo ašinės apkrovos skaičiuojamoji schema [5]

Darbe [6] pateiktos formulės mechaniškai nevienalyčių žiedinio skerspjūvio suvirintųjų sujungimų su V formos kieta siūle įtempiams ir deformacijoms apskaičiuoti esant statiniam tampriai plastiniam apkrovimui.(žr. 1.3 pav) Gautas sprendinys įvertina minkštos ir kietos medžiagų tarpusavio sąveiką ir leidžia apskaičiuoti įtempius ir deformacijas, bet kuriame suvirintojo sujungimo taške.

Visus vamzdynus veikia ciklinės apkrovos todėl yra tikrinama vamzdžio atsparumas nuovargiui. [7] darbe autoriai tyrinėjo vamzdžių su išilgine siūle nuovargį. Tyrimė gauta, kad

specialūs (Hifa ® pipe) vamzdžiai lyginant su paprastais standartiniais vamzdžiais atlaiko apkrovas geriau negu specialūs vamzdžiai, kurie pagaminti pagal DIN 2413 rekomendacijas.



**1.2 pav.** Vamzdžio suvirinto V formos siūle veikiamo ašinės apkrovos skaičiuojamoji schema [6]

Tiesiant naujas vamzdynų trasas, vamzdžiai dažniausiai sujungiami naudojant suvirinimą, to pasėkoje atsirandą liekamieji įtempiai. Autoriai darbe [8] nagrinėjo kaip liekamieji įtempimai slėginiuose induose ir (ar) vamzdynuose priklauso nuo tokių veiksnių kaip: suvirinimo parametrai, indų ar vamzdžių geometrija, medžiagų sudėtis, mikrostruktūra ir šiluminės bei mechaninės savybės pagrindinėje ir siūlės medžiagose. Tam buvo sukurtas dirbtinis neuroninio tinklo modelis, kuris apibūdina liekamųjų įtempių pasiskirstymą suvirintame nerūdijančio plieno vamzdžių konstrukcijose. Modelis buvo patikrintas palyginus rezultatus su trijų konstrukcijų realių bandymų rezultatais. Nustatyta, kad modelis turi potencialą būti išplėtotas į liekamųjų įtempių apibūdinimo priemonę skirtingų suvirino klasių konstrukcijoms.

Straipsnyje [9] tirti liekamieji įtempiai suvirinus du panašius API X46 plieninius vamzdžius apskritiminio suvirinimo būdu, priklausomai nuo temperatūros, vamzdžio spindulio ir sienelės storio ( $R/t$ ) santykio. Tyrimui naudotas baigtinių elementų metodas. 3D modeliavimas buvo atliktas SYSWED programine įranga. Gauti rezultatai buvo palyginti su eksperimentiniais duomenimis ir gautos tokios išvados: pavojingoji zona yra ties vidine suvirinamojo vamzdžio siūle ties suvirinimo linija; šioje zonoje žiediniai įtempiai kyla didesni nei ašiniai. Tai pat nustatyta, kad šiluma turi pastebimą poveikį liekamiesiems įtempiams (kuo didesnė įvesties šiluma tuo didesni liekamieji įtempiai). Tai pat buvo nustatyta, kad didinant  $R/t$  santykio vertę liekamieji įtempiai tai pat didėja, tačiau pasiekus neapibrėžtai didelę šio santykio vertę šis santykis liekamiesiems įtempiams nebeturi įtakos. Liekamųjų ašinių ir žiedinių įtempių priklausomybę nuo temperatūros nerūdijančio plieno vamzdžiuose tai pat nagrinėta [10] darbe.

## 2. Tiriamoji dalis

### 2.1. Tyrime naudotas modelis

Tyrime naudoto modelio skaičiuojamoji schema pateikta 1 pav. Pagrindiniai modelio rodikliai yra:

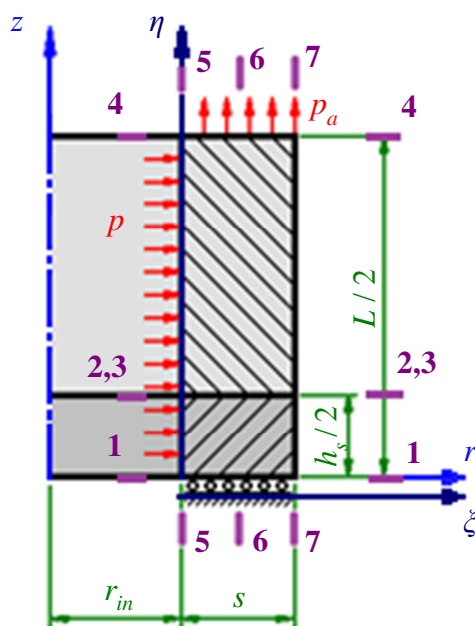
1. Vamzdžio ilgis  $L$  (kadangi nagrinėjame tik pusę vamzdžio tai naudojamas parametras bus  $L/2$ )  $L/2 = 60$  mm;

2. Naudojamas standartinis vamzdis  $\text{Ø}108 \times 10$  EN 10219 [11]: išorinis vamzdžio spindulys  $r_i = 54$  mm; vamzdžio sienelės storis  $s = 10$  mm;

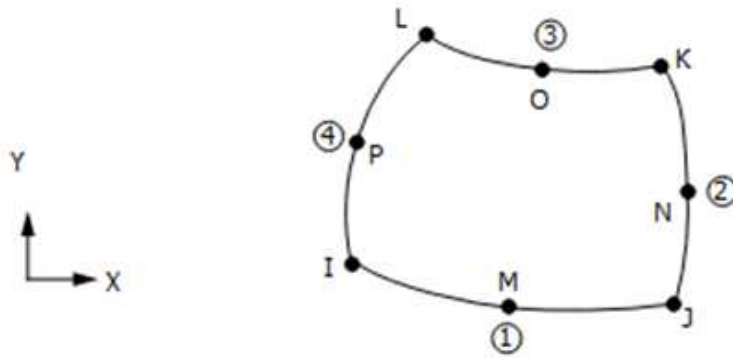
3. Suvirinimo siūlės aukštis  $h_s$  (kadangi nagrinėjame tik pusę vamzdžio tai naudojamas parametras bus  $h_s/2$ )  $h_s/2 = 6$  mm;

4. Naudotos tokios menamosios medžiagų charakteristikos: siūlės tamprumo modulis  $E_{\text{siūlės}} = 200$  GPa; vamzdžio medžiagos tamprumo modulis:  $E_{\text{vamzdžio}} = 400$  GPa; siūlės ir vamzdžio medžiagų Puasono koeficientai  $\nu = 0,28$  (tokie medžiagų mechaniniai rodikliai naudoti dėl to, kad tyrimo tikslas buvo išsiaiškinti kokią įtaką įtempių intensyvumui suvirintame vamzdyje turi išorinės apkrovos ir vamzdžio geometrija neatsižvelgiant į medžiagas).

5. Išorės poveikis: vidinis slėgis  $p$  ir ašinė apkrova  $p_a$ . Nagrinėsime tokius apkrovų atvejus:  $p = 1$  MPa ir  $p_a = 0$  MPa;  $p = 0$  MPa ir  $p_a = 1$  MPa;  $p = 1$  MPa ir  $p_a = 1$  MPa.



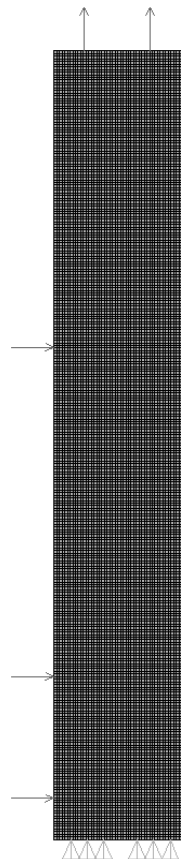
**2.1 pav.** Vamzdžio veikiamo vidinio slėgio ir ašinės apkrovos skaičiuojamoji schema. Čia 1, 2, 3, 4, 5, 6 ir 7 charakteringieji pjūviai, kuriuose tirtas įtempių būvis



**2.2 pav.** Vamzdžio modeliavimui naudotų baigtinių elementų (ANSYS: PLANE82) eskizas [12]

Suvirinto vamzdžio įtempių būvio tyrimas atliktas naudojant baigtinių elementų metodą (naudotas ANSYS programinis paketas; tyrimams naudotas ANSYS script'as pateiktas priede). Kadangi tiriamasis objektas (suvirintas vamzdis su plokščia siūle) bei apkrovos (ašinė apkrova ir vidinis slėgis) yra simetriniai, tai tiriamojo objekto modelis bus plokščias, o jį sudarys tik 1/4 vamzdžio (žr. 1 pav.). Buvo sprendžiamas plokščias, ašiai simetrinis tamprusis uždavinys. Naudoti keturkampiai 8 mazgų plokšti izoparametriniai elementai PLANE82 (žr. 2.2 pav.) [12].

Suvirinto vamzdžio modelis buvo suskaidytas į baigtinius elementus, kurių dydis buvo parinktas taip, kad per vamzdžio sienelės storį tilptų apie 50 elementų. Modelis, suskaidytas baigtiniais elementais, pateiktas 2.3 pav.



**2.3 pav.** Vamzdžio modelis suskaidytas į baigtinius elementus

Įtempių būvis tirtas septyniuose charakteringuose pjūviuose, kurie pavaizduoti 2.1 pav.:

- 1-1 pjūvis lygiagretus r ašiai ir eina per siūlės vidurį;
- 2-2 ir 3-3 pjūviai eina per kontakto plokštumą. 2-2 pjūvyje įtempių būvio dedamosios nustatomos siūlės medžiagoje, o pjūvyje 3-3 – vamzdžio medžiagoje.
- 4-4 pjūvis lygiagretus r ašiai ir nuo kontakto plokštumos yra nutolęs atstumu, kuriame nebėra siūlės ir vamzdžio medžiagų tarpusavio sąveikos.
- 5-5 pjūvis lygiagretus z ašiai ir eina išilgai vidinės vamzdžio sienelės
- 6-6 pjūvis lygiagretus z ašiai, ir eina išilgai vamzdžio sienelės viduriui;
- 7-7 pjūvis lygiagretus z ašiai, ir eina išilgai išorinės vamzdžio sienelės.

Rezultatus pateiksime santykinėse koordinatėse (žr. 2.1 pav.):

$$\xi = \frac{r - r_{in}}{s}; \quad \eta = \frac{z}{L};$$

čia  $s$  – suvirintojo vamzdžio sienelės storis;  $r_i$  – suvirintojo vamzdžio išorinis spindulys;  $r_{in}$  – suvirintojo vamzdžio vidinis spindulys;  $z$  – koordinatė išilgai nagrinėjamojo vamzdžio;  $L$  – nagrinėjamojo suvirintojo vamzdžio ilgis.

Skaičiavimų rezultatai pateikti santykiniais vienetais:

$$\sigma_r' = \frac{\sigma_r}{p}; \quad \sigma_t' = \frac{\sigma_t}{p}; \quad \sigma_a' = \frac{\sigma_a}{p}; \quad \tau_{rt}' = \frac{\tau_{rt}}{p}; \quad \sigma_i' = \frac{\sigma_i}{p};$$

$$\sigma_r'' = \frac{\sigma_r}{p_a}; \quad \sigma_t'' = \frac{\sigma_t}{p_a}; \quad \sigma_a'' = \frac{\sigma_a}{p_a}; \quad \tau_{rt}'' = \frac{\tau_{rt}}{p_a}; \quad \sigma_i'' = \frac{\sigma_i}{p_a};$$

čia  $\sigma_r$  – radialiniai įtempiai;  $\sigma_t$  – žiediniai įtempiai;  $\sigma_a$  – ašiniai įtempiai;  $\tau_{rt}$  – tangentiniai įtempiai;  $\sigma_i$  – įtempių intensyvumas;  $p$  – suvirintąjį vamzdį veikiantis vidinis slėgis;  $p_a$  – suvirintąjį vamzdį veikianti ašinė apkrova.

## 2.2. Apkrovos įtaka

Pradžioje buvo tirta kaip įtempių būvis (įtempių būvio dedamosios  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$ ,  $\sigma_a$ ,  $\tau_{rt}$ ,  $\sigma_i$ ) priklauso nuo veikiančių apkrovų tipo (vidinio slėgio ir ašinės apkrovos) ir dydžių pjūvyje 1 – 1 (siūlės viduryje). 2.4 pav. pateiktos vamzdžio veikiamo pastovios ašinės apkrovos ir keičiamo vidinio slėgio įtempių būvio dedamųjų priklausomybė 1 – 1 pjūvyje. Iš 2.4a pav. matyti, kad didžiausi radialiniai įtempiai  $\sigma_r$  kyla vidinėje vamzdžio sienelėje ties suvirintojo vamzdžio siūlės viduriu, o ties išoriniu skersmeniu  $\sigma_r$  lygūs 0. Didinant vidinį slėgį, didžiausi radialiniai įtempiai proporcingai didėja. Žiediniai įtempiai  $\sigma_t$  išilgai sienelės yra pasiskirstę beveik tolygiai ( $\sigma_t$  nežymiai didėja tolstant nuo vamzdžio sienelės vidurio), o didinant vidinį slėgį – didėja. Ašiniai įtempiai  $\sigma_a$  išilgai vamzdžio

sienelės pasiskirstę maždaug pagal trikampio dėsnį: ties vidiniu vamzdžio spinduliu  $\sigma_a$  yra mažesni už veikiančią ašinę apkrovą  $p_a$ , o ties išoriniu spinduliu – didesni už  $p_a$ . Ties sienelės viduriu  $\sigma_a$  vertė sutampa su ašinės apkrovos  $p_a$  verte, nepriklausomai nuo veikiančio vidinio slėgio dydžio. Pjūvyje 1 - 1 tangentiniai įtempiai nekyla, o didžiausias įtempių intensyvumas susidaro ties vamzdžio vidiniu skersmeniu ir mažėja einant link išorinio vamzdžio skersmens. Šiame pjūvyje pavojingoji vieta yra ties vidiniu suvirintojo vamzdžio spinduliu (čia įtempių intensyvumas yra didžiausias).

Kaip įtempių būvio dedamosios priklauso nuo ašinės apkrovos dydžio pateikta 2.5 pav. Santykiniai radialiniai įtempiai  $\sigma'_r$  išilgai skerspjuvio didėja nuo  $-1$  iki  $0$  ir nuo ašinės apkrovos dydžio praktiškai nepriklauso. 2.5c pav. pavaizduota kaip žiediniai įtempiai  $\sigma_t$  kinta išilgai vamzdžio sienelės. Įtempiai  $\sigma_t$  mažėja mažėjant ašinei apkrovai (didžiausi įtempiai kyla ties vidiniu skerspjuviu), o jų dydis priklauso nuo ašinės apkrovos dydžio (kuo didesnė apkrova, tuo didesni kylantys įtempiai). Iš 2.5d pav. matome, kad ašiniai įtempiai išilgai skerspjuvio 1 - 1 didėja, didėjant ašinei apkrovai. Šiame pjūvyje tangentiniai įtempiai nekyla, o didžiausi įtempių intensyvumai kyla ties vamzdžio vidiniu spinduliu ir einant išilgai sienelės – mažėja. Iš 2.5f pav. matyti, kad pjūvyje 1 - 1, kai suvirintąjį vamzdį veikia pastovus vidinis slėgis ir didžiausia nagrinėjama ašinė apkrova, pavojingoji zona yra ties vidiniu vamzdžio skersmeniu.

2.6 pav. matyti, kaip įtempių būvio dedamosios pasiskirstę išilgai pjūvio esančio kontakto plokštumoje suvirinimo siūlės medžiagoje, kai suvirintąjį vamzdį su plokščia suvirinimo siūle, veikia pastovi ašinė apkrova ir yra keičiamas vidinis slėgis. Šiame pjūvyje radialiniai, žiediniai ir ašiniai įtempiai, bei įtempių intensyvumas pasiskirstę, kaip ir 1 - 1 pjūvyje, kai vamzdį veikia analogiškos apkrovos. Tik šiame pjūvyje žiedinių įtempių mažėjimas yra aiškiau matomas, kai veikia didžiausias (pasirinktas) vidinis slėgis. Kylančių ašinių įtempių ir įtempių intensyvumo vertės yra mažesnės, nei prieš tai nagrinėtame pjūvyje. 2.6e pav. matome, kaip pjūvyje 2 - 2 pasiskirsto tangentiniai įtempiai. Didžiausios jų vertės gaunamos ties suvirintojo vamzdžio sienelės viduriu Tangentiniai įtempiai gaunami neigiami, ir jie pasiskirstę maždaug pagal parabolės dėsnį. Įtempių  $\tau_{rt}$  dydis priklauso nuo vamzdį veikiančios vidinio slėgio dydžio. Pjūvyje 2 - 2 pavojingoji vieta yra ties vidiniu suvirintojo vamzdžio spinduliu.

Kaip įtempių būvio dedamosios kontakto plokštumoje, siūlės medžiagoje priklauso nuo ašinės apkrovos dydžio pateikta 2.7 pav. Šiame pjūvyje nagrinėjamos įtempių būvio dedamosios išskyrus tangentinis įtempis pasiskirstę pagal tokius pačius dėsnius, kaip ir 1 - 1 pjūvyje. Tangentiniai įtempiai gaunami neigiami, ir jie pasiskirstę maždaug pagal parabolės dėsnį. Tangentinių įtempių  $\tau_{rt}$  dydis priklauso nuo vamzdį veikiančios keičiamos ašinės apkrovos dydžio. Pjūvyje 2 - 2 pavojingasis taškas yra ties vidiniu suvirintojo vamzdžio spinduliu (žr. 2.6f ir 2.7f pav.).

Toliau nagrinėjama kaip įtempių būvis pasiskirsto kontakto plokštumoje, vamzdžio (pagrindinėje) medžiagoje. Nagrinėjamame pjūvyje 3 - 3 radialiniai, žiediniai ir tangentiniai įtempiai, bei įtempių intensyvumas pasiskirstę pagal tokius pačius dėsnius kaip ir 2 - 2 pjūvyje. Tik

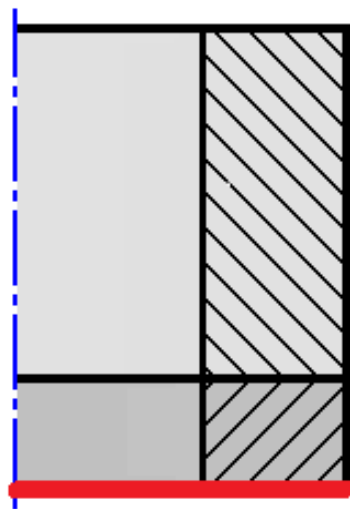
šiam pjūvyje žiedinių įtempių  $\sigma_r$  ir įtempio intensyvumo  $\sigma_i$  skaitinės vertės staiga padidėja. Pjūvyje 3 – 3 ašiniai įtempiai  $\sigma_a$  pasiskirstę netiesiškai ir įtempiai ties vidiniu ir išoriniu vamzdžio spinduliais pasiekia didžiausias vertes.

Tame pačiame pjūvyje 3 – 3, tik vamzdį veikiant pastoviam vidiniam slėgiui  $p = 1$  ir pasirinktoms ašinėms apkrovoms gaunamos sekančios įtempių būvio dedamosios (žr. 2.9 pav.)  $\sigma_r, \sigma_t, \sigma_a, \tau_{rt}, \sigma_i$ . Šiame pjūvyje visos įtempių būvio dedamosios pasiskirstę pagal tokius pat dėsnius, kaip ir 2 – 2 pjūvyje. Palyginus šiuos 2.8 ir 2.9 paveikslus galima pastebėti, kad pjūvyje 3 – 3 žiediniai ir ašiniai įtempiai ties vidiniu ir išoriniu vamzdžio spinduliais ne sumažėja, kaip 2 – 2 pjūvyje, bet padidėja. Išanalizavus 2.8f ir 2.9f pav. matyti, kad pavojingoji 3 – 3 pjūvio (kontakto plokštumos, pagrindinio (vamzdžio) medžiagoje) vieta yra ties suvirintojo vamzdžio vidiniu spinduliu.

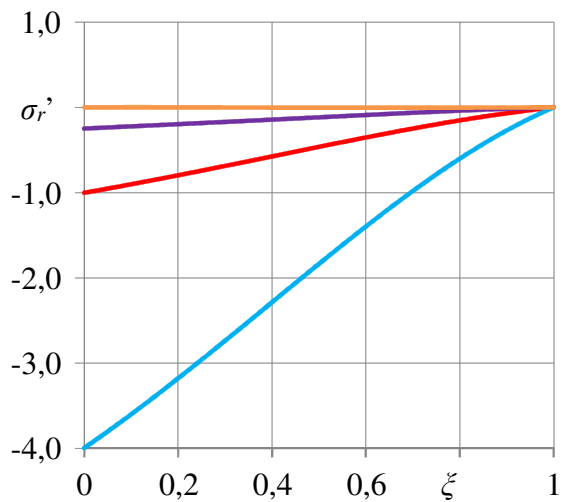
Kaip įtempiai pasiskirstę 4 – 4 pjūvyje, kai veikia keičiamas vidinis slėgis ir pastovi vidinė apkrova, pavaizduota 2.10 pav. Šiame pjūvyje radialiniai ir žiediniai įtempiai, ir įtempių intensyvumas pasiskirstę pagal tokius pačius dėsnius, kaip ir 3 – 3 pjūvyje. Tik radialinių įtempių ir įtempių intensyvumo skaitinės vertės mažesnės. Šiame pjūvyje ašiniai įtempiai pasiskirstę pagal tiesės dėsnį ir yra lygus veikiančios ašinės apkrovos dydžiui ( $\sigma_a' = 1$ ), o tangentiniai įtempiai šiame pjūvyje nekyla.

Kaip įtempių būvio dedamosios 4 – 4 pjūvyje priklauso nuo ašinės apkrovos dydžio pateikta 2.11 pav. Šiame pjūvyje radialiniai įtempiai pasiskirstę, kaip 1 – 1 pjūvyje. Žiediniai įtempiai šiame pjūvyje išilgai sienelės staiga mažėja nepriklausomai nuo veikiančios ašinės apkrovos dydžio. Ašiniai įtempiai 4 – 4 pjūvyje tiesiogiai priklauso nuo veikiančios ašinės apkrovos dydžio ir išilgai sienelės pasiskirstę pagal tiesės dėsnį. Tangentiniai įtempiai šiame pjūvyje nekyla, o įtempių intensyvumas, kaip ir žiediniai įtempiai šiame pjūvyje išilgai sienelės staiga mažėja. Atsižvelgiant į 2.10f ir 2.11f pav. matyti, kad pavojingoji vieta 4 – 4 pjūvyje nepriklausomai, kuri iš apkrovų kinta (vidinis slėgis ar ašinė apkrova) yra ties vidiniu vamzdžio spinduliu.

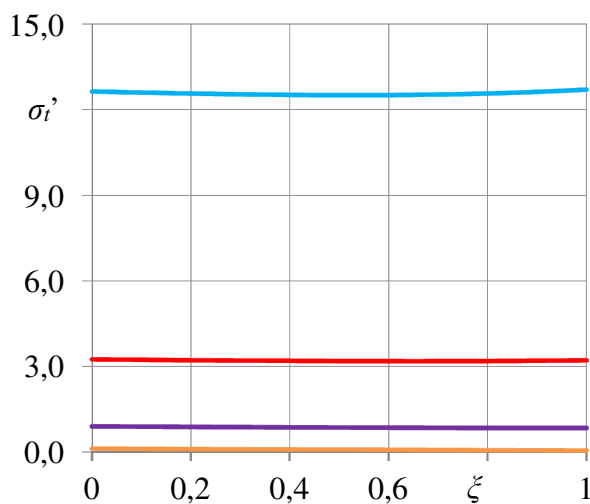




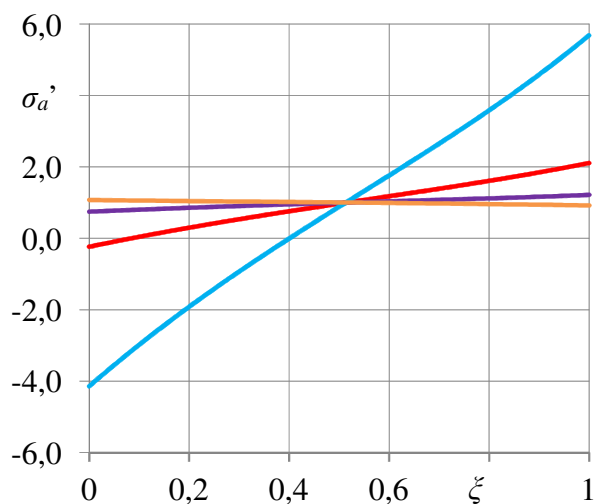
a



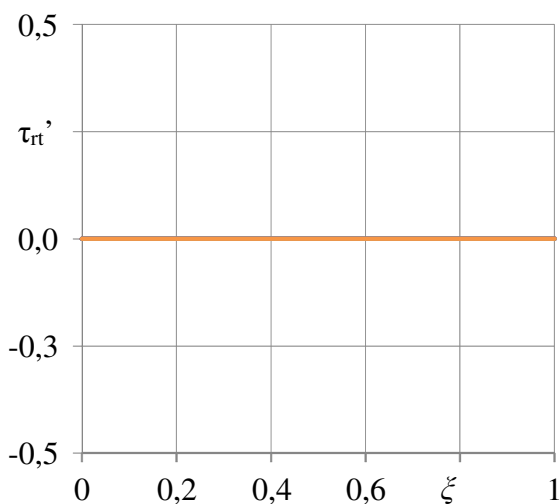
b



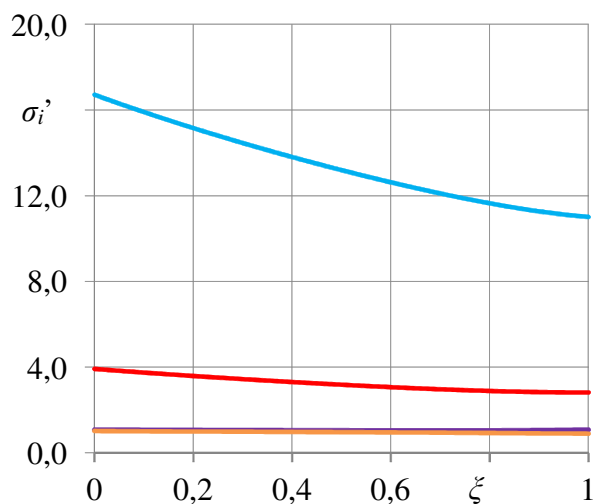
c



d

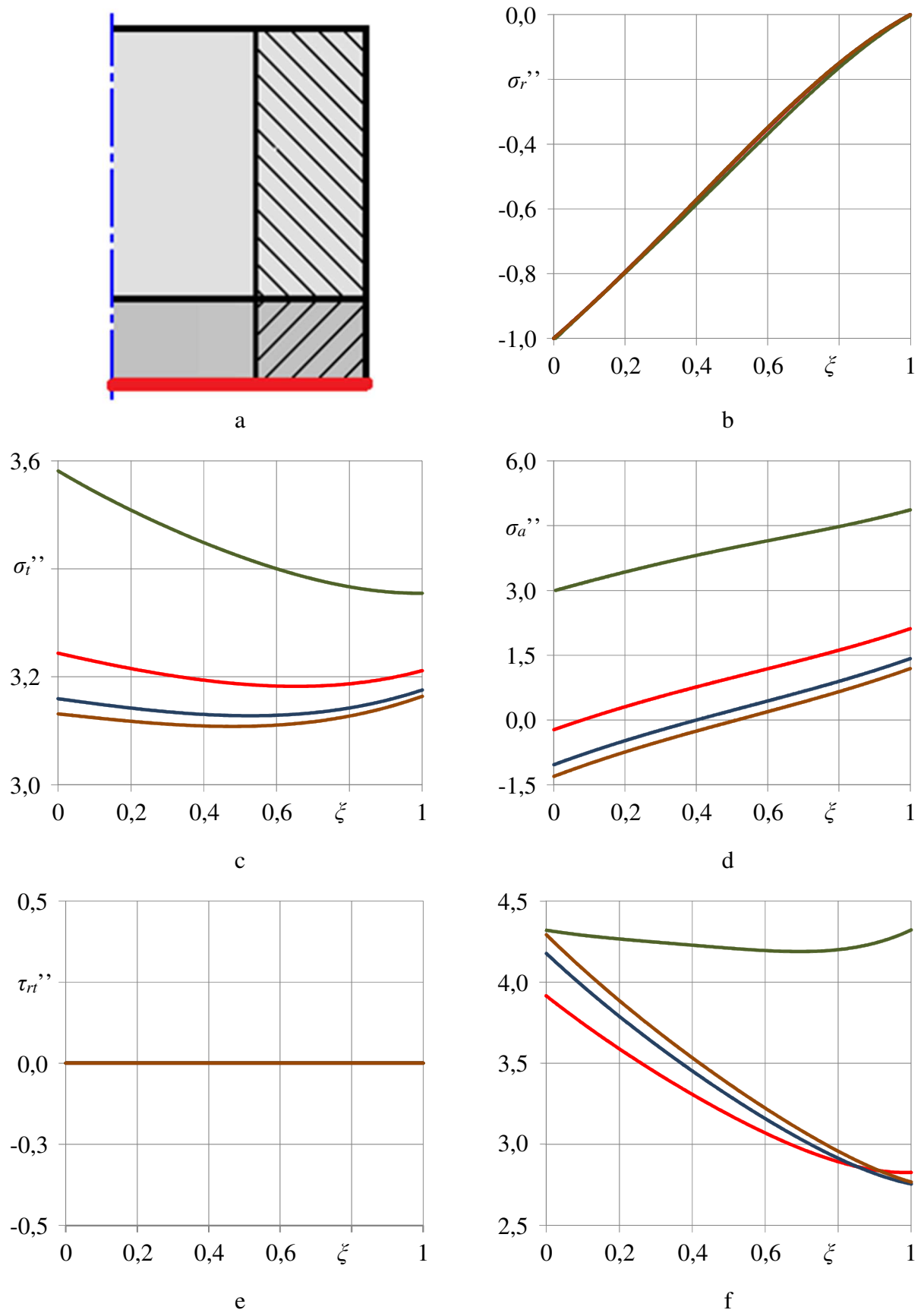


e

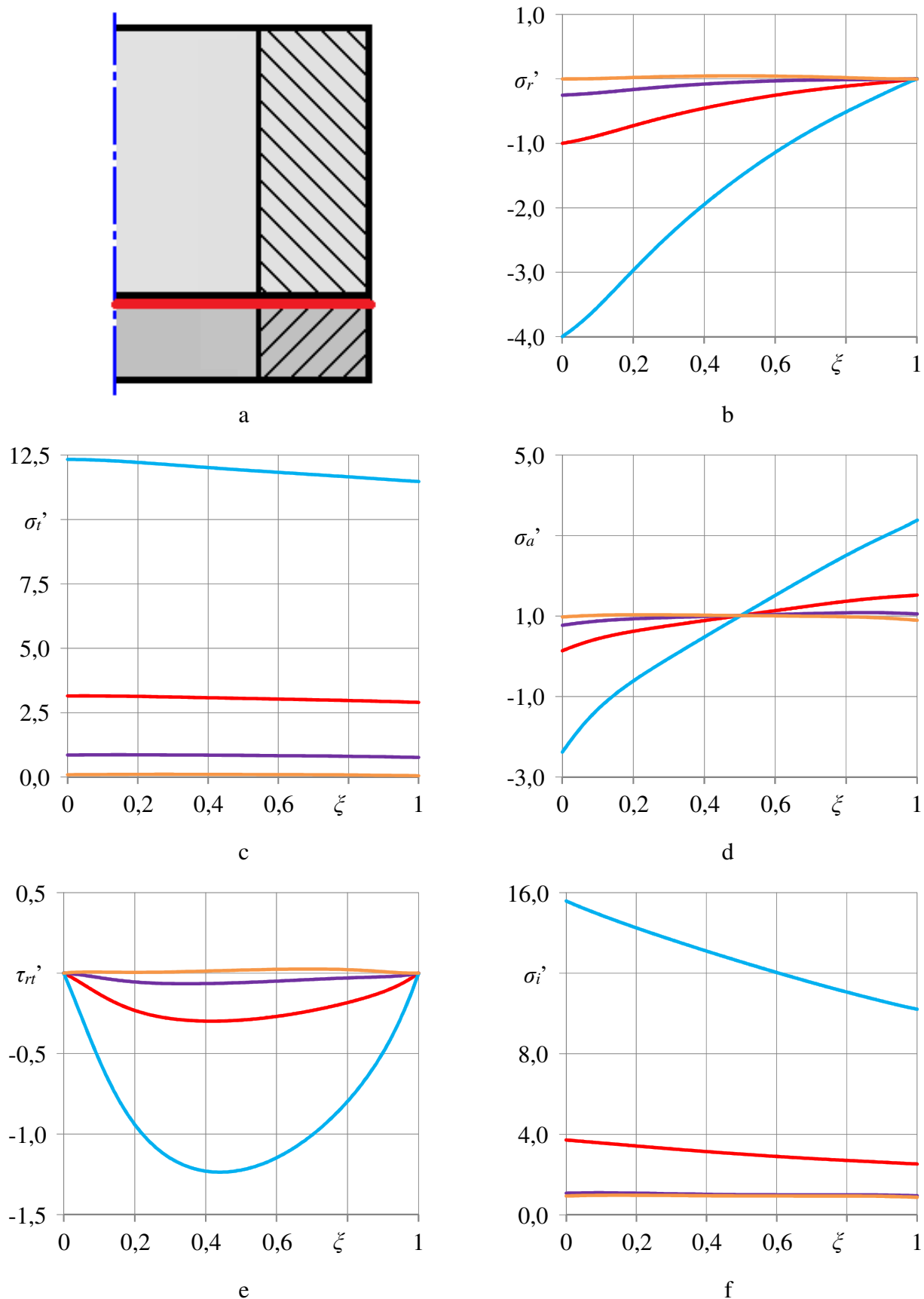


f

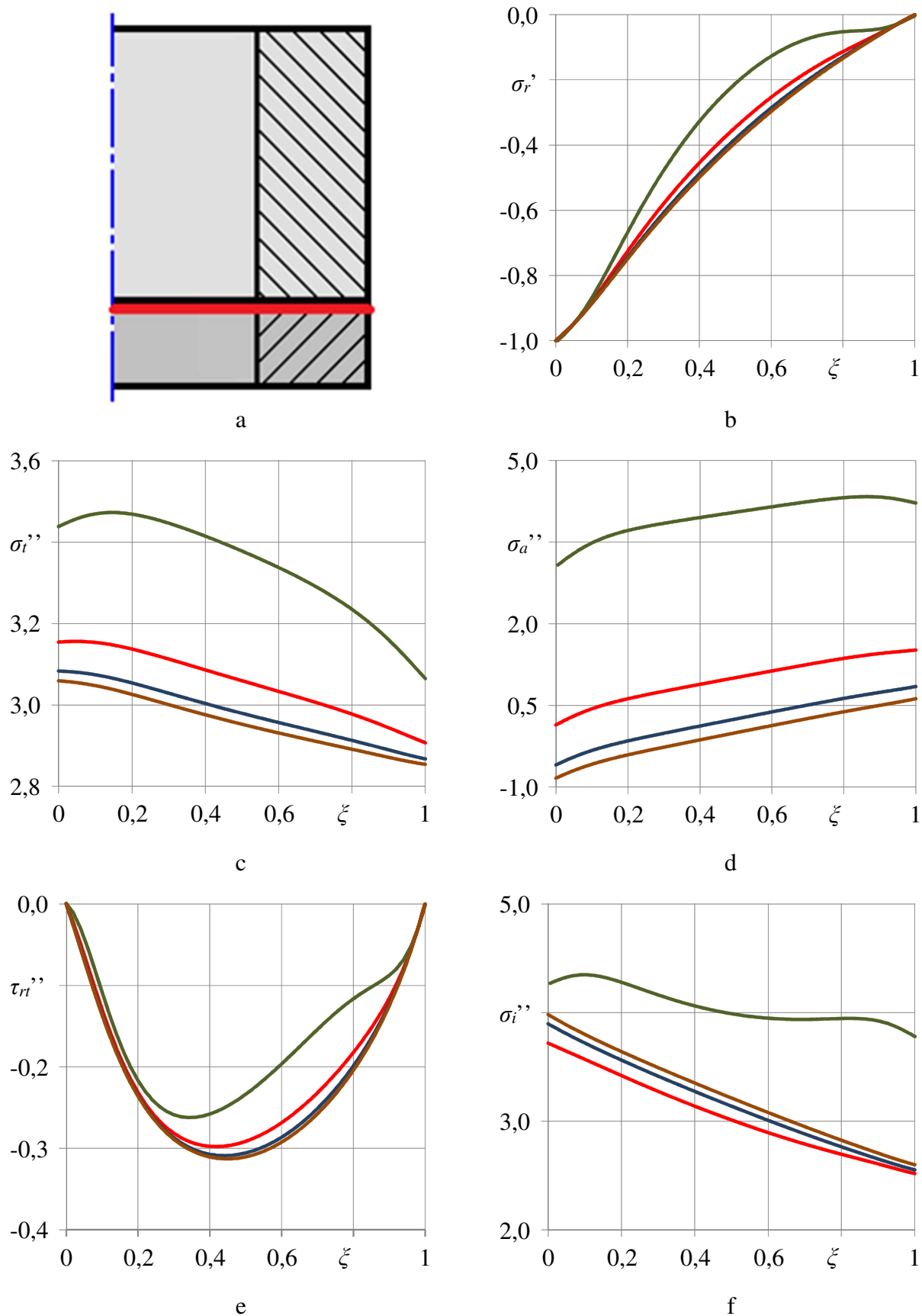
**2.4 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas išilgai 1-1 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant vidinį slėgį  $p$ , kai ašinė apkrova yra pastovi ( $p_a = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempių intensyvumas; ( — ) –  $p = 4$  MPa; ( — ) –  $p = 1$  MPa; ( — ) –  $p = 0,5$  MPa; ( — ) –  $p = 0$  MPa



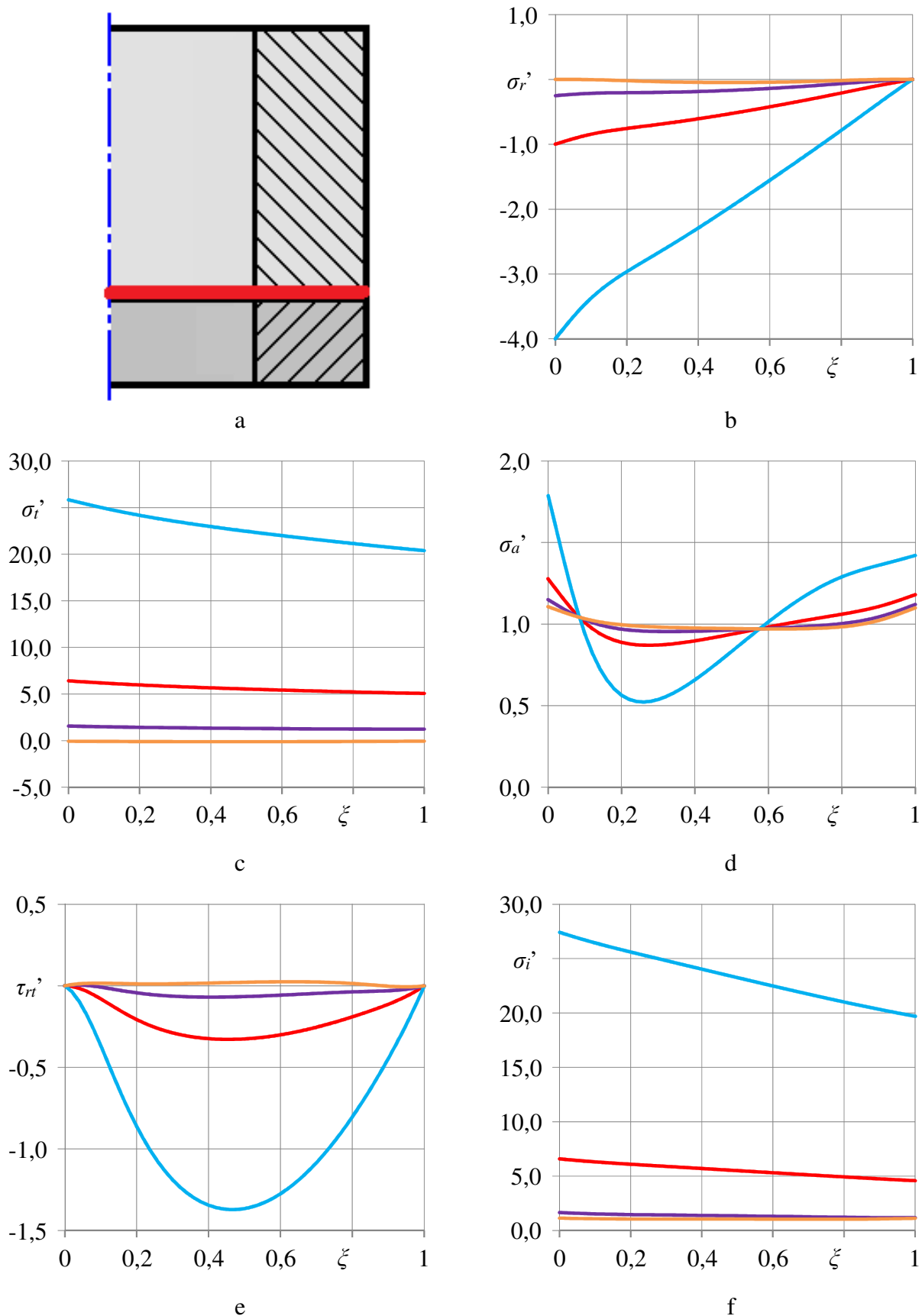
**2.5 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas išilgai 1-1 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant ašinę apkrovą  $p_a$ , kai vidinis slėgis yra pastovus ( $p = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempių intensyvumas; ( — ) –  $p_a = 4$  MPa; ( — ) –  $p_a = 1$  MPa; ( — ) –  $p_a = 0,5$  MPa; ( — ) –  $p_a = 0$  MPa



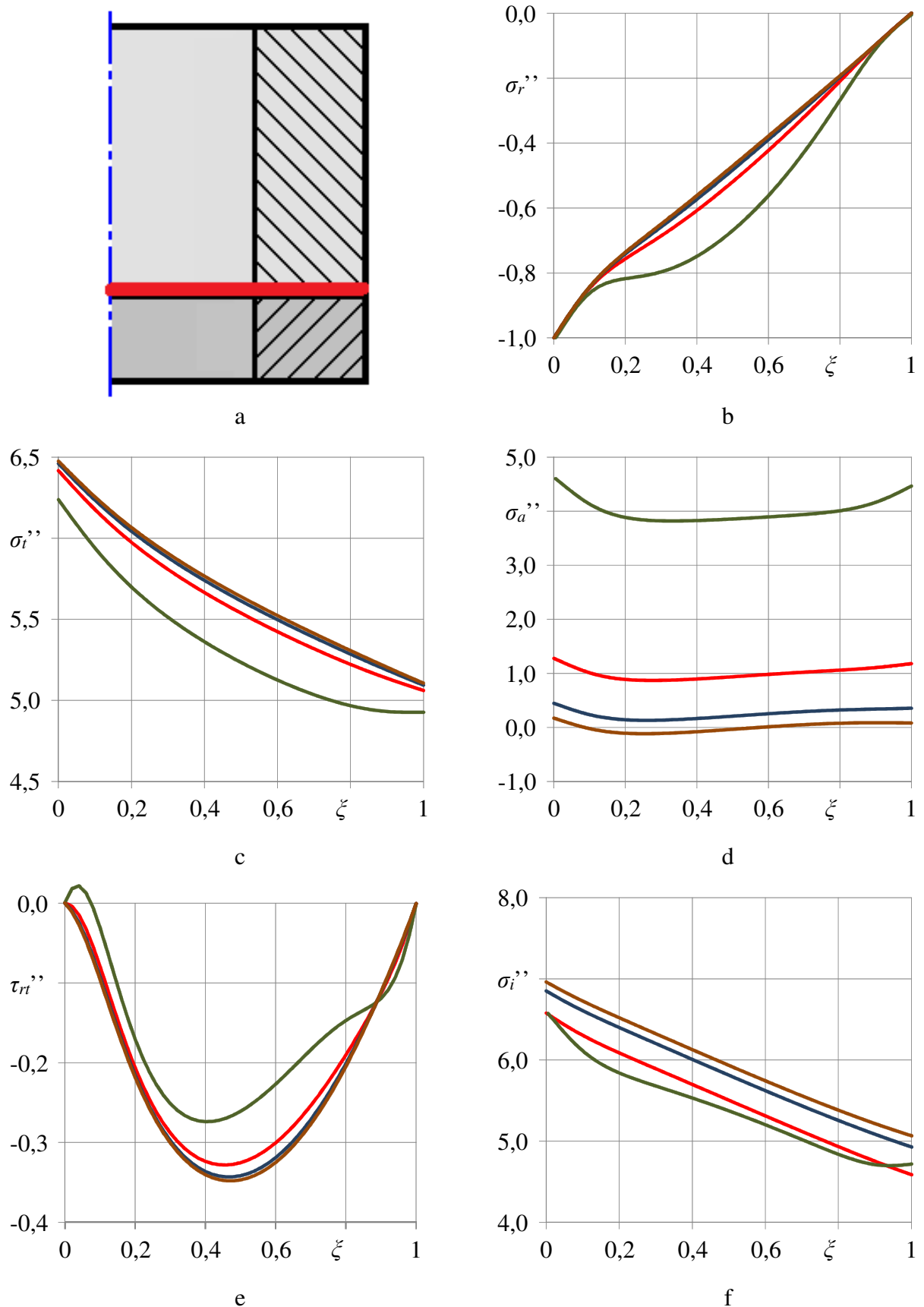
**2.6 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas išilgai 2-2 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant vidinį slėgį  $p$ , kai ašinė apkrova yra pastovi ( $p_a = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempių intensyvumas; ( — ) –  $p = 4$  MPa; ( — ) –  $p = 1$  MPa; ( — ) –  $p = 0,5$  MPa; ( — ) –  $p = 0$  MPa



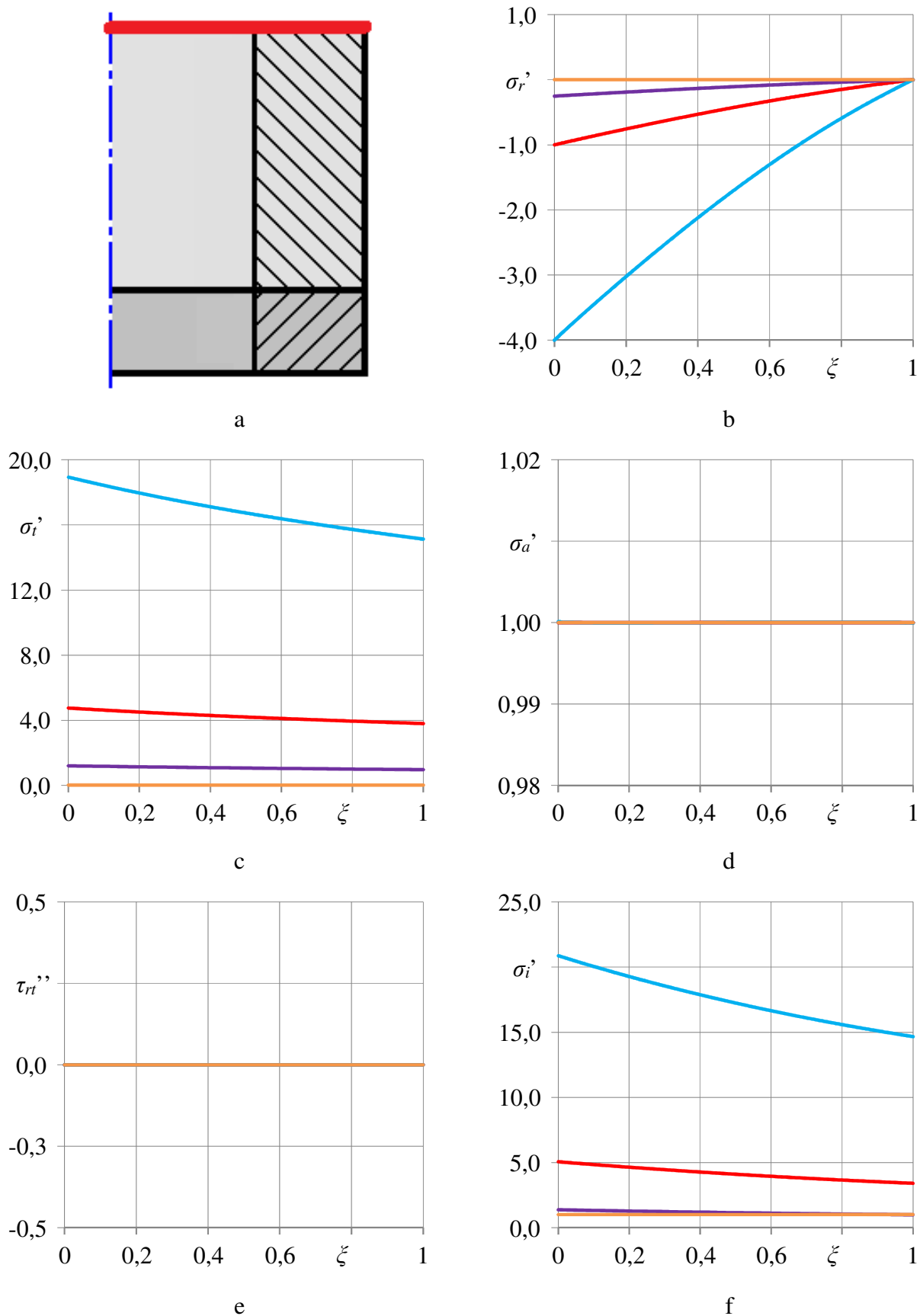
**2.7 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas išilgai 2-2 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant ašinę apkrovą  $p_a$ , kai vidinis slėgis yra pastovus ( $p = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempių intensyvumas; (—) –  $p_a = 4$  MPa; (—) –  $p_a = 1$  MPa; (—) –  $p_a = 0,5$  MPa; (—) –  $p_a = 0$  MPa



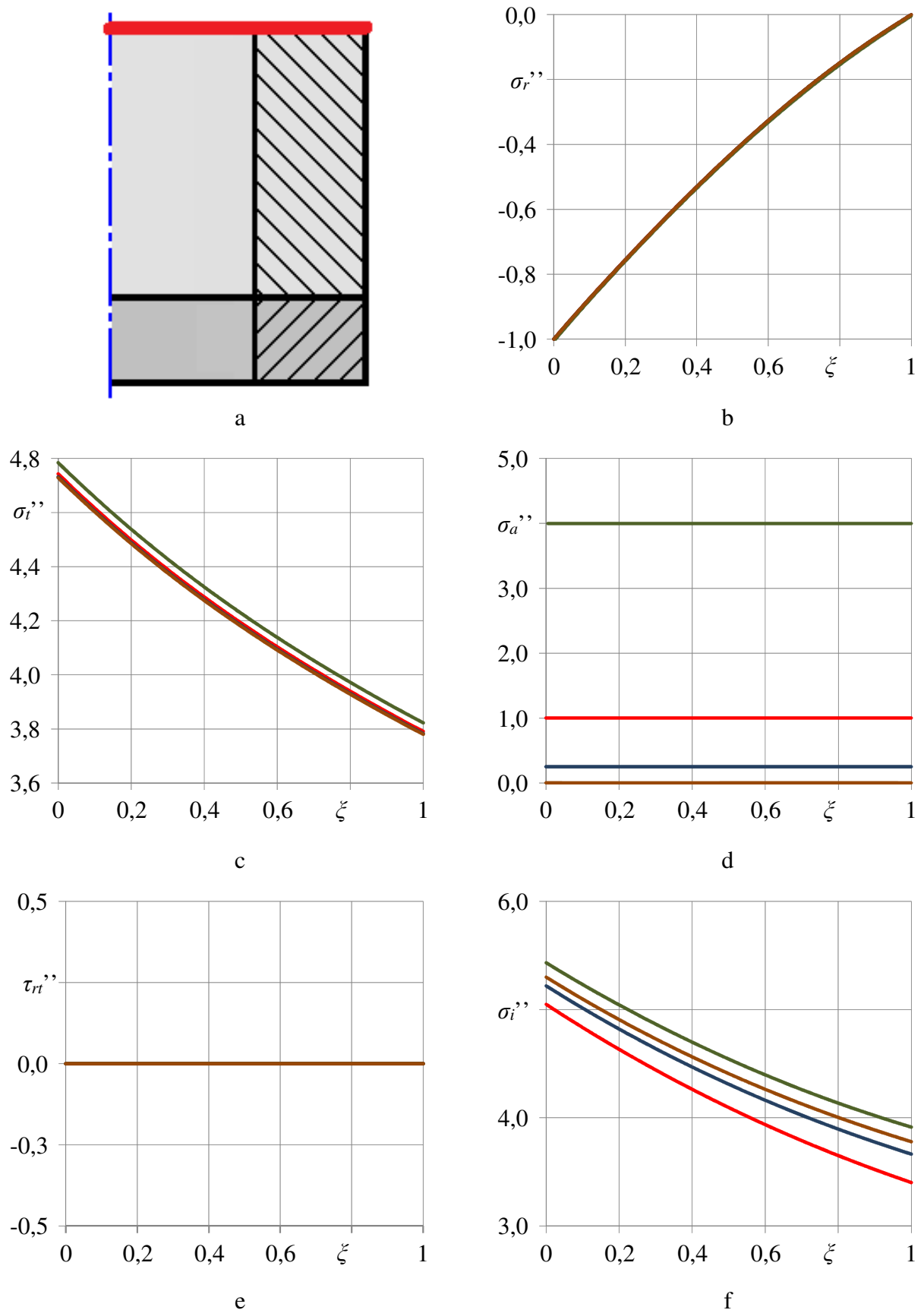
**2.8 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas išilgai 3-3 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant vidinį slėgį  $p$ , kai ašinė apkrova yra pastovi ( $p_a = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempių intensyvumas; ( — ) –  $p = 4$  MPa; ( — ) –  $p = 1$  MPa; ( — ) –  $p = 0,5$  MPa; ( — ) –  $p = 0$  MPa



**2.9 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas išilgai 3-3 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant ašinę apkrovą  $p_a$ , kai vidinis slėgis yra pastovus ( $p = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempių intensyvumas; (—) –  $p_a = 4$  MPa; (—) –  $p_a = 1$  MPa; (—) –  $p_a = 0,5$  MPa; (—) –  $p_a = 0$  MPa



**2.10 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas išilgai 4-4 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant vidinį slėgį  $p$ , kai ašinė apkrova yra pastovi ( $p_a = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempių intensyvumas; ( — ) –  $p = 4$  MPa; ( — ) –  $p = 1$  MPa; ( — ) –  $p = 0,5$  MPa; ( — ) –  $p = 0$  MPa



**2.11 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas išilgai 4-4 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant ašinę apkrovą  $p_a$ , kai vidinis slėgis yra pastovus ( $p = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempių intensyvumas; (—) –  $p_a = 4$  MPa; (—) –  $p_a = 1$  MPa; (—) –  $p_a = 0,5$  MPa; (—) –  $p_a = 0$  MPa



Antroje šio poskyrio dalyje nagrinėjami vertikalūs charakteringieji pjūviai. Pirmas nagrinėtas pjūvis yra 5 – 5, tai pjūvis einantis išilgai suvirintojo vamzdžio vidiniu spinduliu  $r_{in}$  (žr. 2.12a pav.). Radialiniai įtempiai  $\sigma_r$  šiame pjūvyje yra pasiskirstę pagal tiesės dėsnį ir tik ties kontakto plokštuma atsiranda „spyglys“, ten staiga padidėja įtempiai. Tai galima paaiškinti vamzdžio ir siūlės medžiagų nevienalytiškumu. Įtempiai  $\sigma_r$  tiesiogiai priklauso nuo vamzdį veikiančio vidinio slėgio dydžio, tik įtempiai kyla su neigiamu ženklu (priešingu veikiančiam vidinio slėgio ženklui). Žiediniai įtempiai  $\sigma_t$  ir įtempių intensyvumas  $\sigma_i$  5 – 5 pjūvyje kinta netiesiškai ir tiesiogiai priklauso nuo veikiančio vidinio slėgio dydžio. Didžiausi  $\sigma_t$  ir  $\sigma_i$  įtempiai, kyla ties kontakto plokštuma. Iš ankščiau nagrinėtų pjūvių 2 – 2 ir 3 – 3 galime padaryti išvadą, kad tai yra suvirintojo vamzdžio medžiagoje. Ašiniai įtempiai  $\sigma_a$  šiame pjūvyje kinta kaip tai pavaizduota 2.12d pav. Iš 2.12d pav. matome, kad didžiausi įtempiai  $\sigma_a$  kyla ties suvirinimo siūlės viduriu ir tolstant nuo siūlės jie palaipsniui nusistovi ir tampa lygūs veikiančios ašinės apkrovos dydžiui. Tangentiniai įtempiai išilgai vamzdžio vidinės sienelės kyla taip pat tik kontakto plokštumoje.

Pjūvyje 5-5 taip pat nagrinėta, kaip įtempių būvio dedamosios pasiskirsto, kai suvirintąjį vamzdį veikia pastovus vidinis slėgis  $p = const$ , o keičiama yra ašinė apkrova  $p_a$ . Paveiksle 2.13b matyti, kad santykiniai radialiniai įtempiai  $\sigma_r''$  tik ties kontakto vieta padidėja, o likusiose pjūvio vietose lygūs  $-1$ . Tangentiniai įtempiai, kaip ir prieš tai nagrinėtame atvejuje kyla tik susilydimo taške. Ašiniai įtempiai  $\sigma_a$  tiesiogiai priklauso nuo veikiančios ašinės apkrovos dydžio. Didžiausia  $\sigma_a$  vertės gaunamos kontakto taške. Žiediniai įtempiai  $\sigma_t$  ir įtempių intensyvumas  $\sigma_i$  pjūvyje 5 – 5 kinta netiesiškai ir pastebimas jų padidėjimas kontakto taške, kai siūlės medžiaga pereina į vamzdžio medžiagą. Šiame taške  $\sigma_t$  ir  $\sigma_i$  įtempiai padidėja beveik 2 kartus. Iš 2.12 ir 2.13 pav. matyti, kad pavojingoji vieta išilgai suvirintojo vamzdžio vidinės sienelės yra kontakto zonoje. Remiantis pirma šio skyriaus dalimi galime teigti, kad tai yra vamzdžio medžiagoje.

Kitas pjūvis, kuris yra nagrinėjamas tai vertikalus pjūvis 6-6, kuris eina per vamzdžio sienelės vidurį. Pirmiausia įtempių būvis nagrinėjamas, kai vamzdį veikia pastovi ašinė apkrova ir keičiamas yra vidinis slėgis. 2.14b pav. matome, kad radialiniai įtempiai  $\sigma_r$  pasiskirstę pagal tiesės dėsnį ir jų vertė pakinta tik ties kontakto zona. Įtempiai  $\sigma_r$  tiesiogiai priklauso nuo veikiančio vidinio slėgio dydžio. Ašiniai ir tangentiniai įtempiai išilgai vamzdžio sienelės vidurio pasiskirstę netiesiškai, o didžiausios jų vertės gaunamos kontakto taške. Žiediniai įtempių ir įtempių intensyvumo pasiskirstymai analogiškai įtempiams kylantiems ties vidiniu vamzdžio spinduliu, tik jų vertės yra mažesnės.

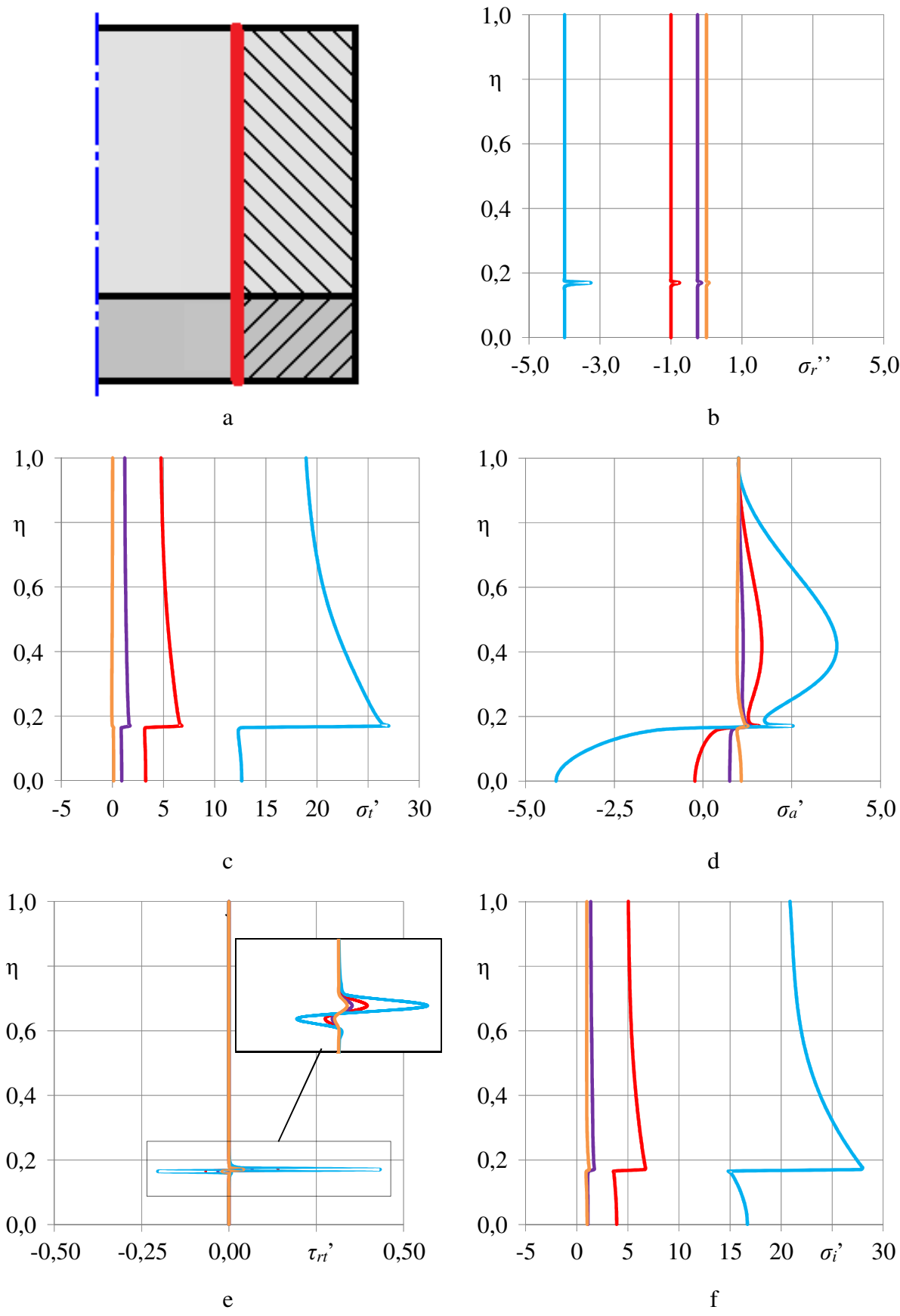
2.15 pav., matome įtempių būvio dedamųjų pasiskirstymą išilgai vamzdžio, ties sienelės viduriu, kai vamzdį veikia pastovus vidinis slėgis ir keičiama ašinė apkrova. 2.15b pav. dalyje matome radialinių įtempių  $\sigma_r$  pasiskirstymą. Įtempiai  $\sigma_r$  pasiskirstę beveik pagal tiesės dėsnį kurios vertė apie  $-0,4$  tik ties kontakto plokštuma įvyksta jų svyravimas (siūlės medžiagoje staiga sumažėja,

o pagrindinėje medžiagoje staiga padidėja jų vertės). Ašiniai įtempiai  $\sigma_a$  pjūvyje 5 – 5 pjūvyje pasiskirstę beveik pagal tiesės dėsnį, tik ties kontakto zona jie sumažėja. Ašinių įtempių vertė atvirkščiai proporcinga veikiančios ašinės apkrovos vertei (ašiniai įtempiai kyla tokio pat dydžio, kaip ir veikianti ašinė apkrova, tik jų ženklas gaunamas priešingas, nes ašinė apkrova nagrinėjamu atveju tempia vamzdį). Tangentiniai įtempiai pasiskirstę netiesiškai, o didžiausia jų vertė gaunama kontakto taške. Žiediniai įtempiai ir įtempių intensyvumas pasiskirstę, kaip 5 – 5 pjūvyje tik jų skaitinės vertės mažesnės. Kaip ir 5 – 5 taip ir 6 – 6 pjūvyje pavojingasis taškas išilgai vamzdžio sienelės vidurio yra kontakto zonoje, vamzdžio medžiagoje.

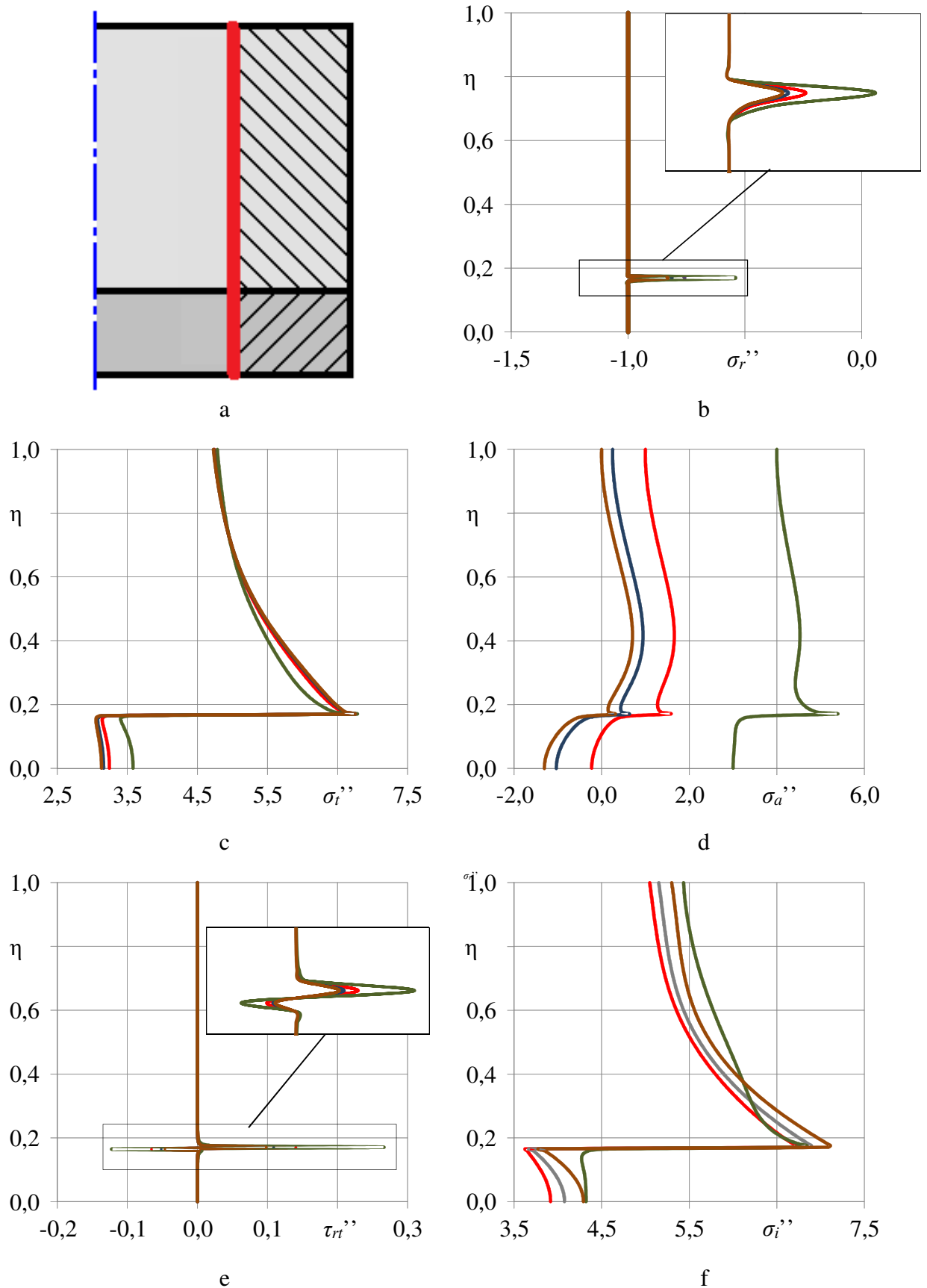
Paskutinis iš nagrinėtų pjūvių yra 7 – 7 (žr. 2.16 pav.). Šiame pjūvyje, kitaip nei prieš tai nagrinėtuose vertikaliuose pjūviuose radialiniai įtempiai  $\sigma_r$  nekyla. Išilgai išorinio vamzdžio spindulio įtempiai  $\sigma_r$  lygūs 0. Analogiškai žiediniams įtempiams pasiskirstę tangentiniai įtempiai. Ašiniai įtempiai, kai vamzdį veikia pastovi ašinė apkrova ir keičiamas vidinis slėgis pasiskirstęs, kaip ir 5 – 5 pjūvyje tik įtempių vertės gaunamos teigiamos ir didesnės negu ties vidiniu suvirintojo vamzdžio spinduliu. Žiediniai įtempiai ir įtempių intensyvumas 7 – 7 pjūvyje kinta netiesiškai ir tiesiogiai priklauso nuo veikiančio vidinio slėgio dydžio. Didžiausi  $\sigma_t$  ir  $\sigma_i$  įtempiai, kyla ties kontakto plokštuma.

Kaip įtempių būvio dedamosios priklauso nuo ašinės apkrovos dydžio ties išoriniu vamzdžio sienelės spinduliu pateikta 2.17 pav. Santykiniai radialiniai įtempiai  $\sigma_r'$  kyla tik ties kontakto plokštuma visur kitur yra lygūs 0. 2.18c pav. pavaizduota, kaip žiediniai įtempiai  $\sigma_t$  kinta išilgai vamzdžio išorinio spindulio. Įtempiai  $\sigma_t$  keičiant ašinę apkrovą beveik nesikeičia. Iš 2.19d pav. matome, kad ašiniai įtempiai išilgai skerspjūvio 7 - 7 kinta netiesiškai, o keičiant ašinę apkrovą įtempiai tai pat proporcingai kinta. Šiame pjūvyje tangentiniai įtempiai kyla tik kontakto plokštumoje, kaip ir tuo atveju kai vamzdį veikia keičiamas vidinis slėgis ir pastovi ašinė apkrova. Įtempių intensyvumas 7 – 7 pjūvyje pasiskirstęs netiesiškai ir didžiausia jų vertė gaunama ties kontakto plokštuma. Iš 2.18f pav. ir 2.19f pav. matyti, kad pjūvyje 7 – 7, nesvarbu kokios apkrovos veikia suvirintąjį vamzdį, pavojingoji zona yra ties susilydimo plokštuma.

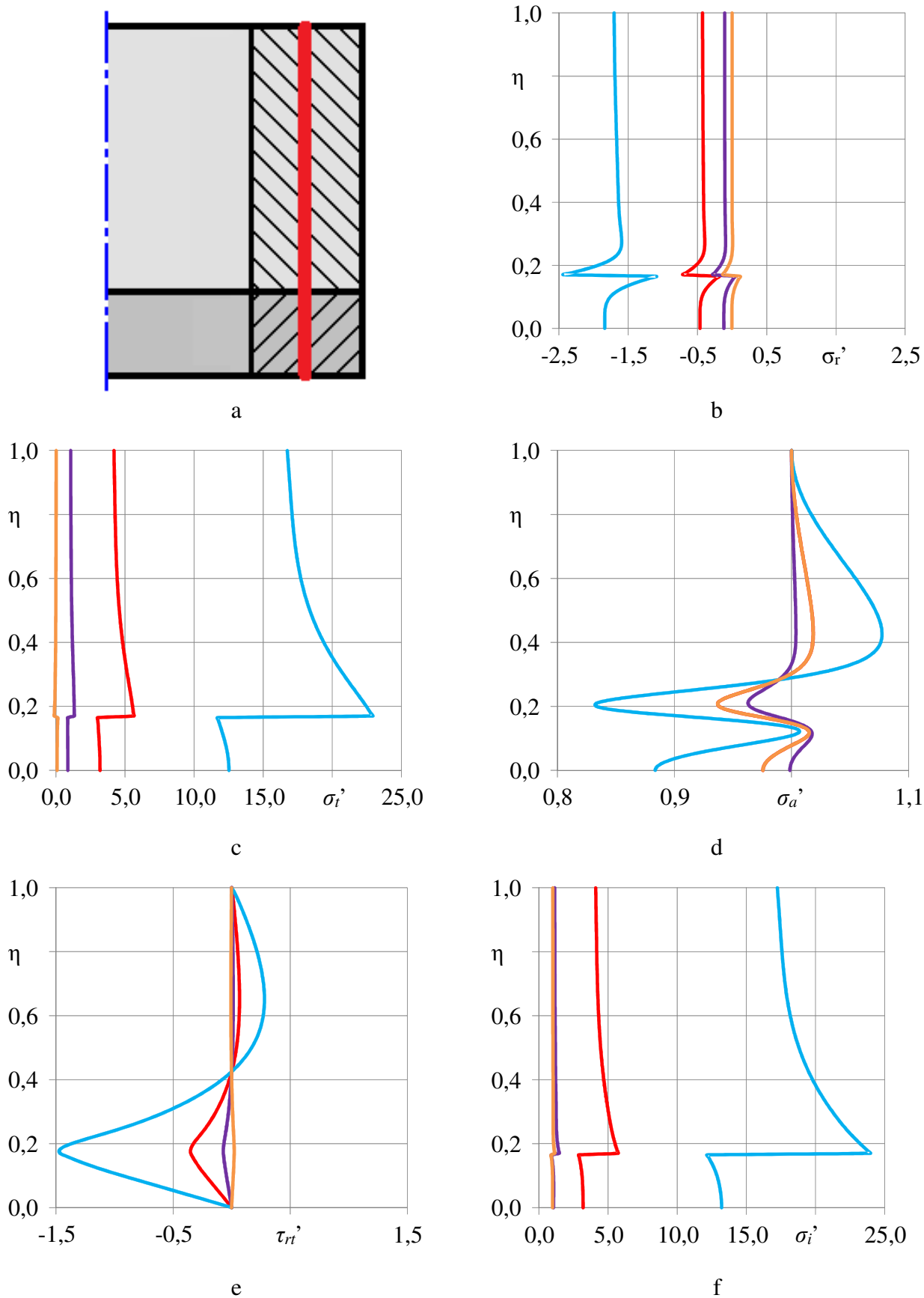
Atlikus tyrimą nustatyta, kad pavojingoji zona yra kontakto (susilydimo) plokštuma, kadangi šioje vietoje atsiranda įtempių šuolis nagrinėjant vertikalius pjūvius. Didžiausi įtempiai kyla ties vidiniu vamzdžio spinduliu 5 – 5pjūvyje Iš horizontalių pjūvių nustatyta, kad didžiausi įtempiai atsiranda vamzdžio medžiagoje (virš kontakto plokštumos) 3 – 3 pjūvyje. Tai pat nustatyta, kad pavojingasis apkrovos atvejis yra kai vamzdį veikia tik vidinis slėgis, o ašinė apkrova yra lygi 0. Tada kyla maksimalūs įtempiai.



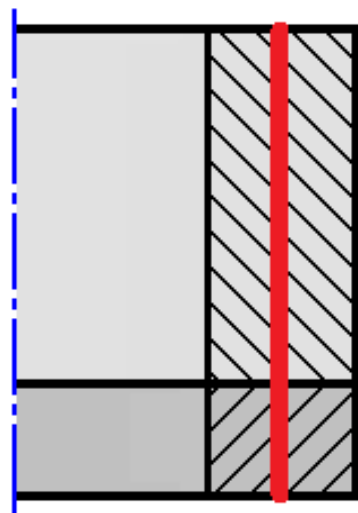
**2.12 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas išilgai 5-5 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant vidinį slėgį  $p$ , kai ašinė apkrova yra pastovi ( $p_a = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempių intensyvumas; ( — ) –  $p = 4$  MPa; ( — ) –  $p = 1$  MPa; ( — ) –  $p = 0,5$  MPa; ( — ) –  $p = 0$  MPa



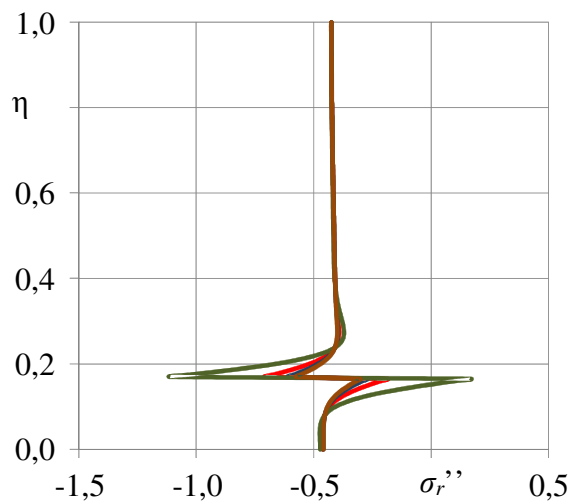
**2.13 pav.** Įtempčių būvio dedamųjų kitimas išilgai 5-5 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant ašinę apkrovą  $p_a$ , kai vidinis slėgis yra pastovus ( $p = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempčių intensyvumas; (—) –  $p_a = 4$  MPa; (—) –  $p_a = 1$  MPa; (—) –  $p_a = 0,5$  MPa; (—) –  $p_a = 0$  MPa



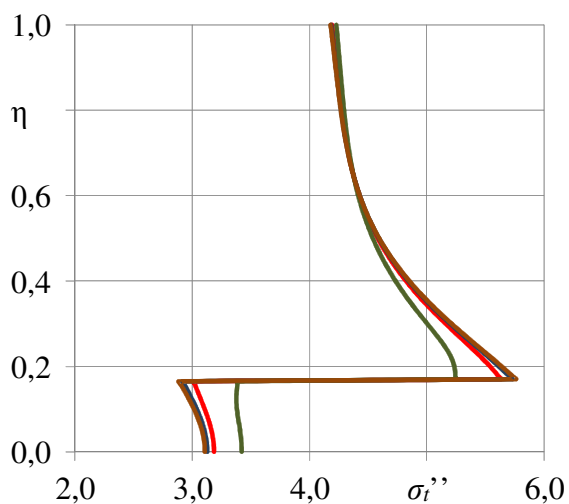
**2.14 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas išilgai 6-6 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant vidinį slėgį  $p$ , kai ašinė apkrova yra pastovi ( $p_a = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempių intensyvumas; ( — ) –  $p = 4$  MPa; ( — ) –  $p = 1$  MPa; ( — ) –  $p = 0,5$  MPa; ( — ) –  $p = 0$  MPa



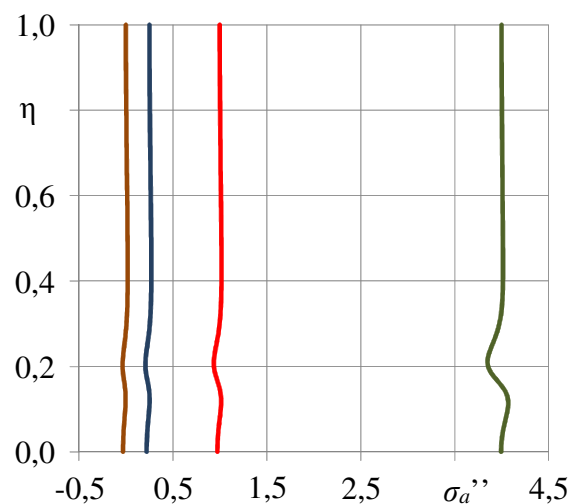
a



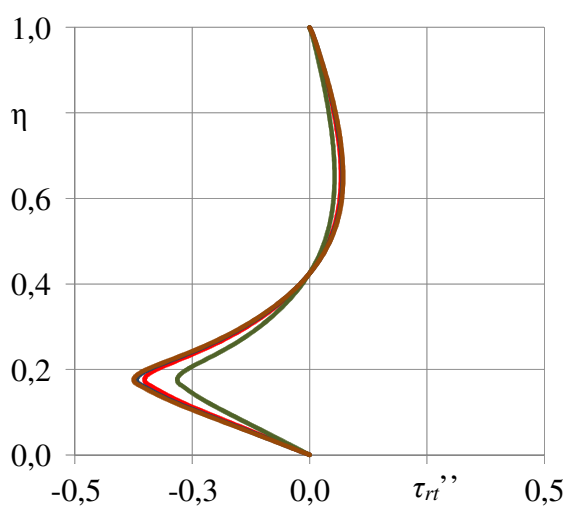
b



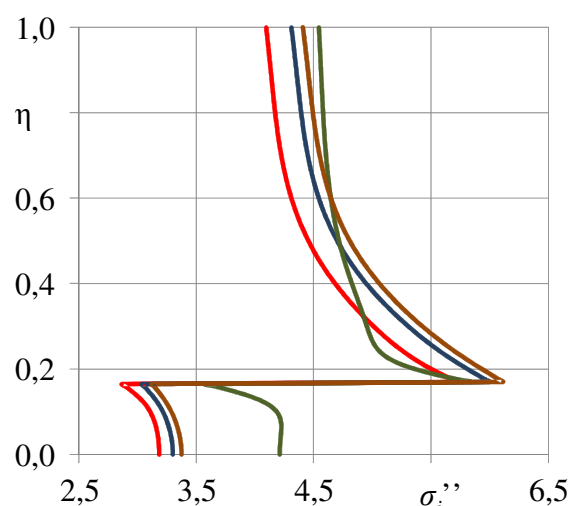
c



d

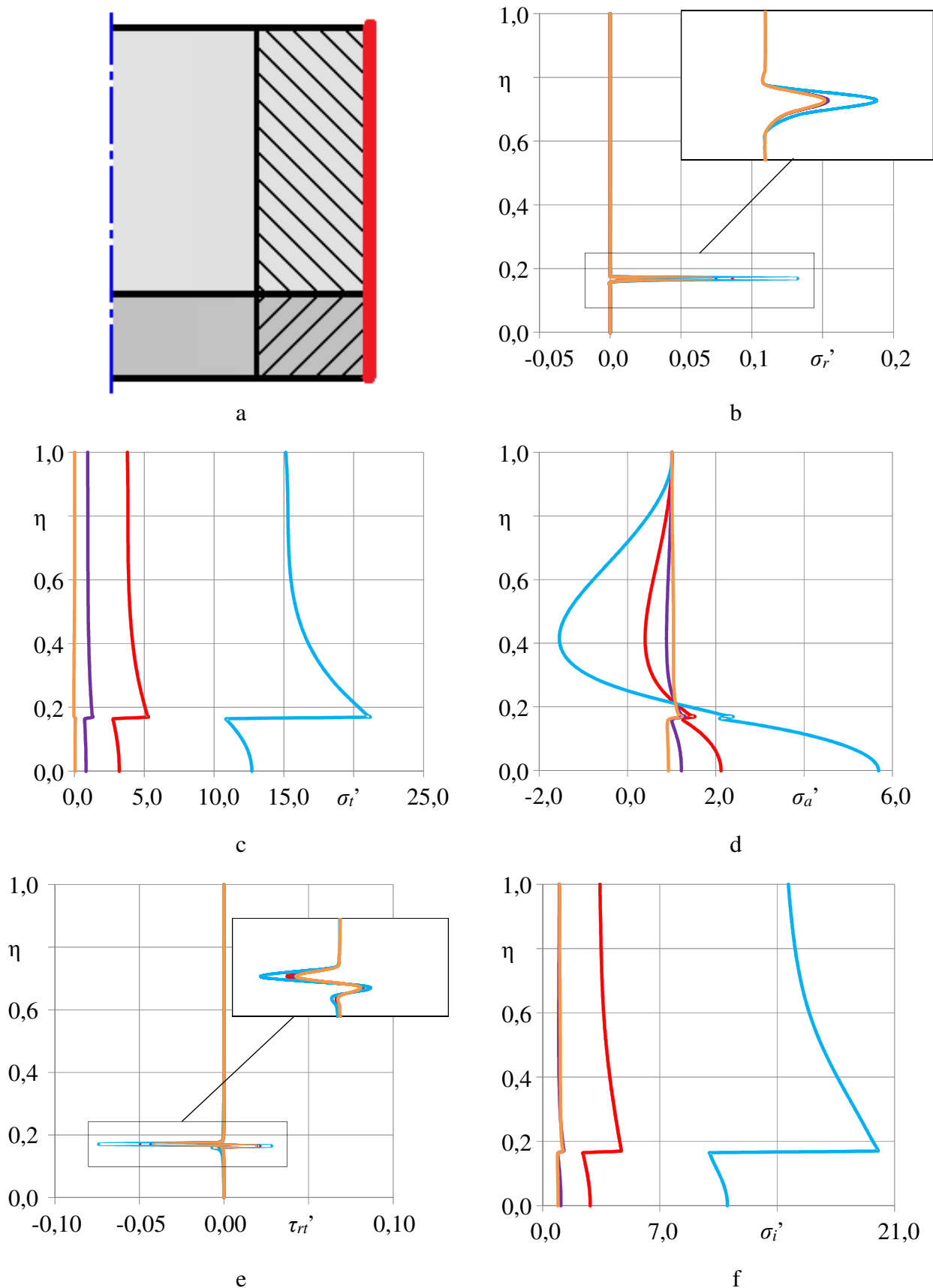


e

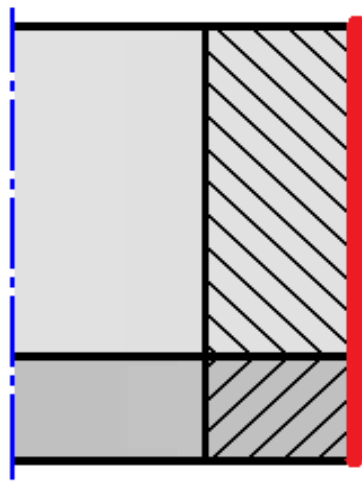


f

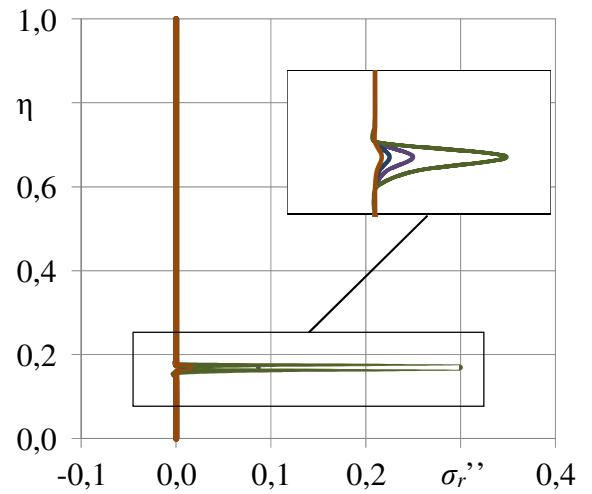
**2.15 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas išilgai 6-6 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant ašinę apkrovą  $p_a$ , kai vidinis slėgis yra pastovus ( $p = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempių intensyvumas; (—) –  $p_a = 4$  MPa; (—) –  $p_a = 1$  MPa; (—) –  $p_a = 0,5$  MPa; (—) –  $p_a = 0$  MPa



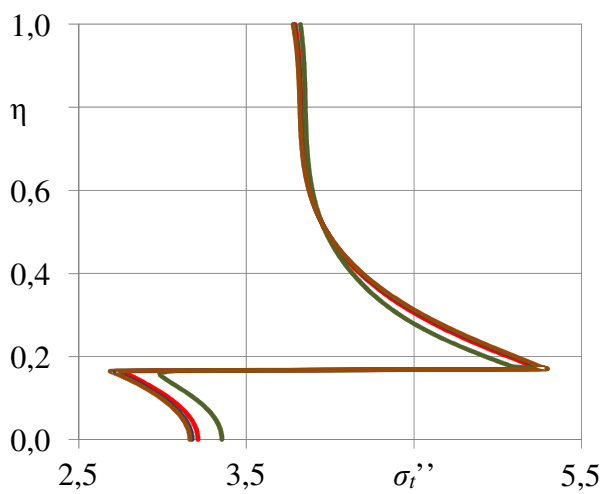
**2.16 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas išilgai 7-7 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant vidinį slėgį  $p$ , kai ašinė apkrova yra pastovi ( $p_a = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempių intensyvumas; ( — ) –  $p = 4$  MPa; ( — ) –  $p = 1$  MPa; ( — ) –  $p = 0,5$  MPa; ( — ) –  $p = 0$  MPa



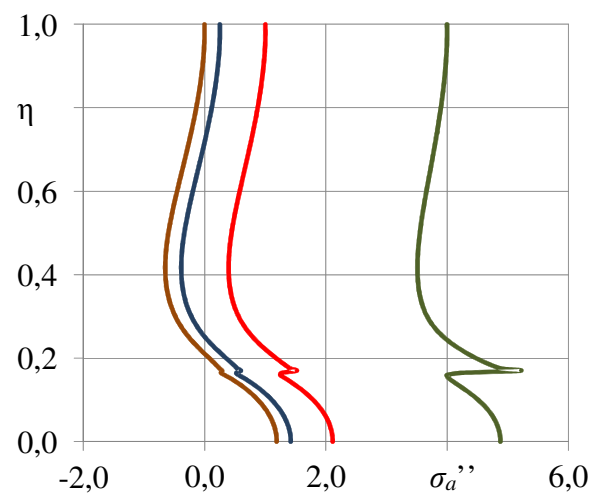
a



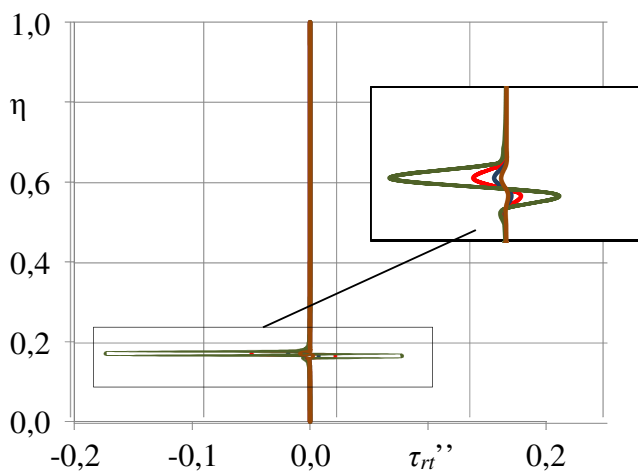
b



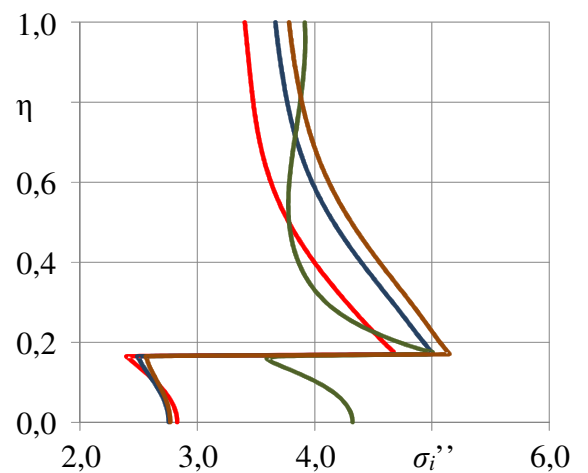
c



d



e



f

**2.17 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas išilgai 7-7 pjūvio (žr. šio pav. a dalį) keičiant ašinę apkrovą  $p_a$ , kai vidinis slėgis yra pastovus ( $p = 1$  MPa): b – radialiniai įtempiai; c – žiediniai įtempiai; d – ašiniai įtempiai; e – tangentiniai įtempiai; f – įtempių intensyvumas; (—) –  $p_a = 4$  MPa; (—) –  $p_a = 1$  MPa; (—) –  $p_a = 0,5$  MPa; (—) –  $p_a = 0$  MPa



### 2.3. Vamzdžio ir siūlės geometrinių parametru įtaka

Dar vienas labai svarbus veiksnys įtempių būviui yra vamzdžio geometriniai parametrai, kurie bus nagrinėjami šiame poskyryje. Kadangi prieš tai buvusiame poskyryje išsiaiškinome, kad pavojingoji vieta yra kontakto plokštumoje, tai įtempių būvio dedamųjų priklausomybę nuo vamzdžio ir suvirinimo siūlės geometrinių parametru nagrinėsime tik šioje vietoje. Bus nagrinėjami du taškai: ties suvirintojo vamzdžio vidiniu spinduliu siūlės ir vamzdžio medžiagoje (siūlės medžiaga grafikuose žymima punktyrine linija, o vamzdžio medžiagoje ištisine linija).

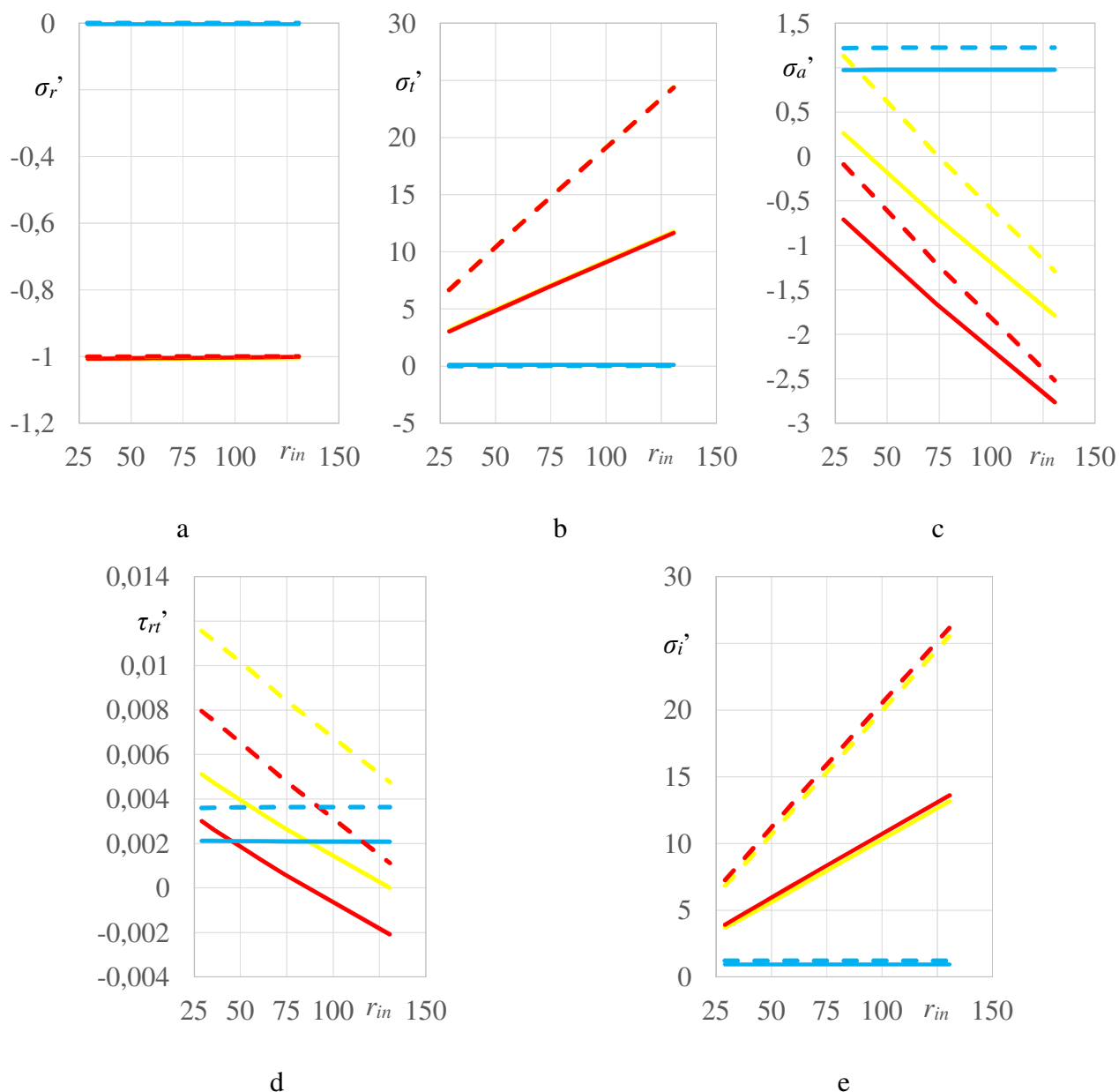
Šiame poskyryje rodiklių, kurie tyrimo metu nekito, vertės buvo priimtos:  $s = 6$  mm;  $r_{in} = 48$  mm;  $\gamma = 2 \left( \gamma = \frac{E_{vamzdžio}}{E_{siūlės}} \right)$ ;  $E_{siūlės} = 200$  GPa;  $\nu_{siūlės} = 0,28$  ;  $\nu_{vamzdžio} = 0,28$ ;  $h_s = 0,7 \cdot s$ ; Šiame poskyryje bus nagrinėti tokie apkrovimo atvejai:  $p = 1$  MPa ir  $p_a = 0$  MPa;  $p = 0$  MPa ir  $p_a = 1$  MPa;  $p = 1$  MPa ir  $p_a = 1$  MPa.

Pirmiausia panagrinėsime įtempių būvio dedamųjų priklausomybę nuo vamzdžio vidinio skersmens  $r_{in}$ . Nagrinėti standartiniai vamzdžiai kurių  $r_{in} = 29; 35,5; 48; 60,5; 73,7$  ir  $131$  mm [11]. 2.18a pav. matome, kaip radialiniai įtempiai  $\sigma_r$  kinta pavojingoje zonoje keičiant vidinį vamzdžio spindulį. Didinant vidinį suvirintojo vamzdžio spindulį  $\sigma_r$  nesikeičia. Radialiniai įtempiai lygūs vamzdį veikiančiam vidiniam slėgiui. 2.18b ir e, matome žiedinių įtempių ir įtempių intensyvumo pasiskirstymą. Iš grafikų matyti, kad didinant vidinį spindulį įtempiai didėja. Siūlės medžiagoje  $\sigma_t$  ir  $\sigma_i$  įtempiai kyla mažesni negu pagrindinėje medžiagoje ir didinant vidinį vamzdžio spindulį  $\sigma_t$  ir  $\sigma_i$  pagrindiniame metale padidėja labiau. Ašiniai ir tangentiniai įtempiai (žr. 2.18c ir d pav.) didinant vamzdžio vidinį spindulį mažėja, kai vamzdį veikia vidinis slėgis. Jeigu vamzdį veikia tik ašinė apkrova įtempiai nesikeičia. Skiriasi tik pagrindinėje (vamzdžio) medžiagoje ir siūlės medžiagoje. Kai vamzdį veikia tik vidinis slėgis arba vidinis slėgis ir ašinė apkrova,  $\sigma_a$  ir  $\tau_{rt}$  mažėja nepriklausomai ar pagrindinė ar siūlės medžiaga.

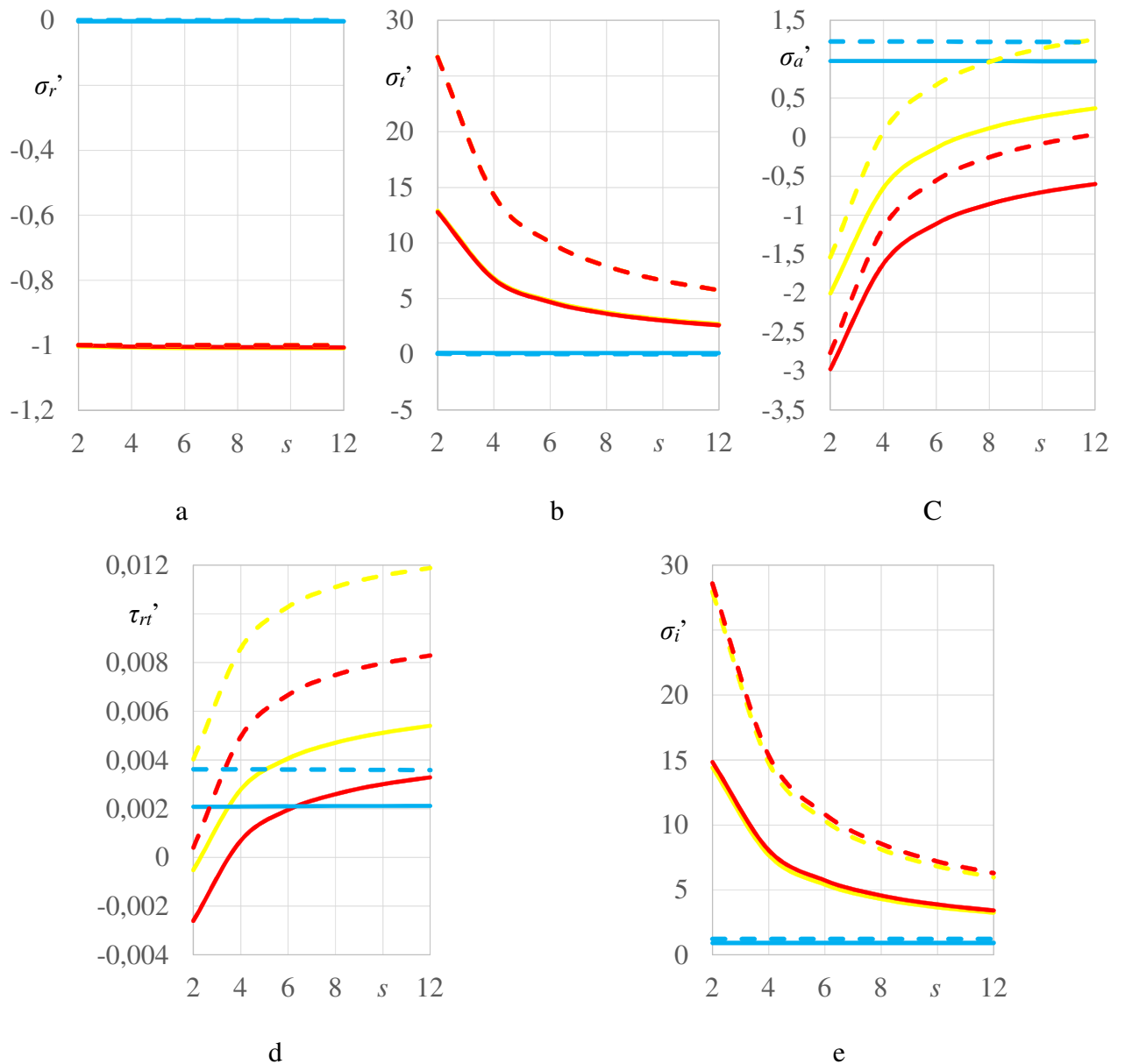
2.19 pav. pavaizduota, kaip įtempių būvio dedamosios priklauso nuo vamzdžio sienelės storio  $s$ . Nagrinėtas standartinis vamzdis, kurio skersmuo 48 mm, o sienelės storis kinta:  $s = 2, 4, \dots, 12$  [11]. 2.19a pav. matome kad radialiniai įtempiai  $\sigma_r$  nekinta ir yra lygūs vamzdį veikiančio vidinio slėgio dydžiui. Santykiniai ašiniai ir tangentiniai įtempiai 2.19c ir d pav. didinant sienelės storį didėja. Siūlės medžiagoje įtempiai kyla mažesni negu pagrindinėje medžiagoje. Įtempių intensyvumas ir žiediniai įtempiai didinant sienelės storį didėja ir pasiekus tam tikrą sienelės storį beveik nusistovi. Kai vamzdį veikia tik ašinė apkrova įtempiai nesikeičia. Tik  $\sigma_a$  ir  $\tau_{rt}$  įtempiai skiriasi siūlės ir vamzdžio medžiagose.

Paskutinėje šio poskyrio dalyje tirsime, kaip įtempių būvio dedamosios priklauso nuo suvirintojo vamzdžio suvirinimo siūlės aukščio  $h_s$ . Buvo nagrinėti tokie suvirinimo siūlės aukščiai:  $h_s = 0,7 \cdot s, 0,85 \cdot s, \dots, 1,3 \cdot s$ . 2.20a pav. matome, kad radialiniai įtempiai  $\sigma_r$  nekinta ir yra lygūs

vamzdį veikiančio vidinio slėgio dydžiui. Ašiniai įtempiai didinant suvirinimo siūlės aukštį nežymiai didėja, o jų vertės didesnės gaunasi vamzdžio medžiagoje (2.20c pav.). Tangentiniai  $\tau_{rt}$  įtempiai vamzdžio ir siūlės medžiagoje yra priešingi ir vamzdžio medžiagoje jie pirmiausia padidėja, kai siūlės aukštis yra lygus apie  $0,85 \cdot s$  ir vėliau pradeda mažėti (2.20d pav.). O siūlės medžiagoje atvirkščiai – ties  $0,85 \cdot s$  verte įtempiai sumažėja ir vėliau pradeda didėti. Didinant suvirinimo siūlės aukštį, žiediniai įtempiai  $\sigma_t$  ir įtempių intensyvumas  $\sigma_i$  nežymiai didėja ir didesni kyla vamzdžio medžiagoje. Kaip ir prieš tai nagrinėtuose atvejuose, kai vamzdį veikia tik ašinė apkrova įtempiai  $\sigma_r$ ,  $\sigma_t$  nesikeičia, o  $\sigma_a$  ir  $\sigma_i$  reikšmės skiriasi tik siūlės ir vamzdžio medžiagoje.

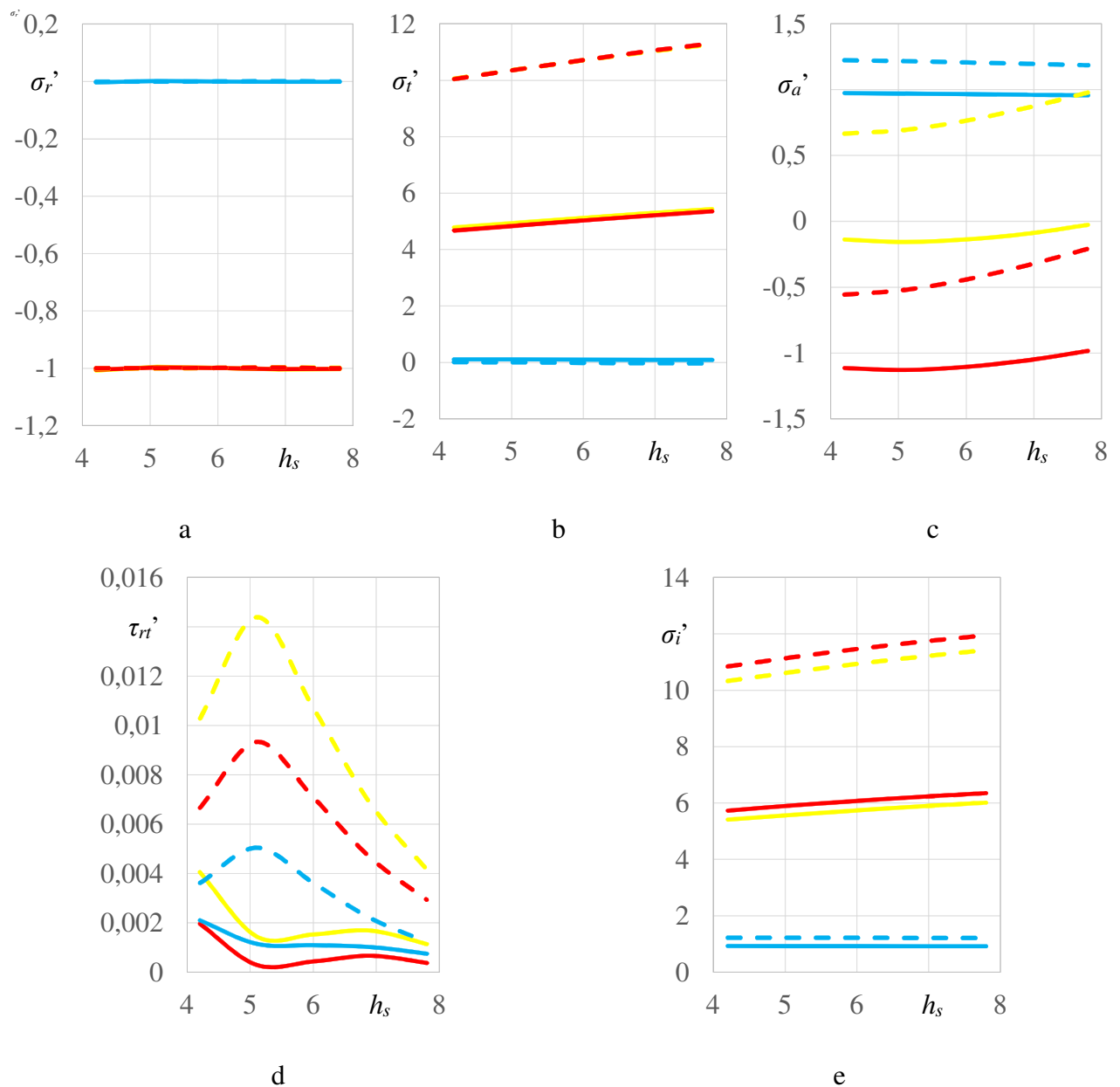


**2.18 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas pavojingajame taške vamzdžio (---) ir siūlės (—) medžiagoje, keičiant vidinį vamzdžio spindulį  $r_{in}$ : a – radialiniai įtempiai; b – žiediniai įtempiai; c – ašiniai įtempiai; d – tangentiniai įtempiai; e – įtempių intensyvumas; (—) –  $p = 1$   $p_a = 1$  MPa; (—) –  $p = 1$   $p_a = 0$  MPa; (—) –  $p = 0$   $p_a = 1$  MPa



**2.19 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas pavojingajame taške vamzdžio (---) ir siūlės (—) medžiagose, keičiant vamzdžio sienelės storį  $s$ : a – radialiniai įtempiai; b – žiediniai įtempiai; c – ašiniai įtempiai; d – tangentiniai įtempiai; e – įtempių intensyvumas; (—) –  $p = 1$   $p_a = 1$  MPa; (—) –  $p = 1$   $p_a = 0$  MPa; (—) –  $p = 0$   $p_a = 1$  MPa

Taigi atlikus įtempių būvio dedamųjų priklausomybės nuo pagrindinių geometrinių parametru tyrimą galima teigti, kad didžiausią įtaką įtempių būviui turi vamzdžio vidinis spindulys. Nes didinant vidinį spindulį įtempiai sparčiai didėja. Tačiau tai yra glaudžiai susiję su sienelės storium, kadangi didinant vidinį vamzdžio spindulį ir paliekant sienelės storį tokį pat iš storasienio vamzdžio gauname plonasienį vamzdį, kur įtempiai kyla žymiai didesni nei storasieniame vamzdyje.



**2.20 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas pavojingajame taške vamzdžio (---) ir siūlės (—) medžiagose, keičiant suvirinimo siūlės aukštį  $h_s$ : a – radialiniai įtempiai; b – žiediniai įtempiai; c – ašiniai įtempiai; d – tangentiniai įtempiai; e – įtempių intensyvumas; (—) –  $p = 1 \text{ MPa}$ ; (—) –  $p = 1 \text{ MPa}$ ; (—) –  $p = 0 \text{ MPa}$ ; (—) –  $p = 0 \text{ MPa}$

## 2.4. Medžiagų mechaninių charakteristikų įtaka

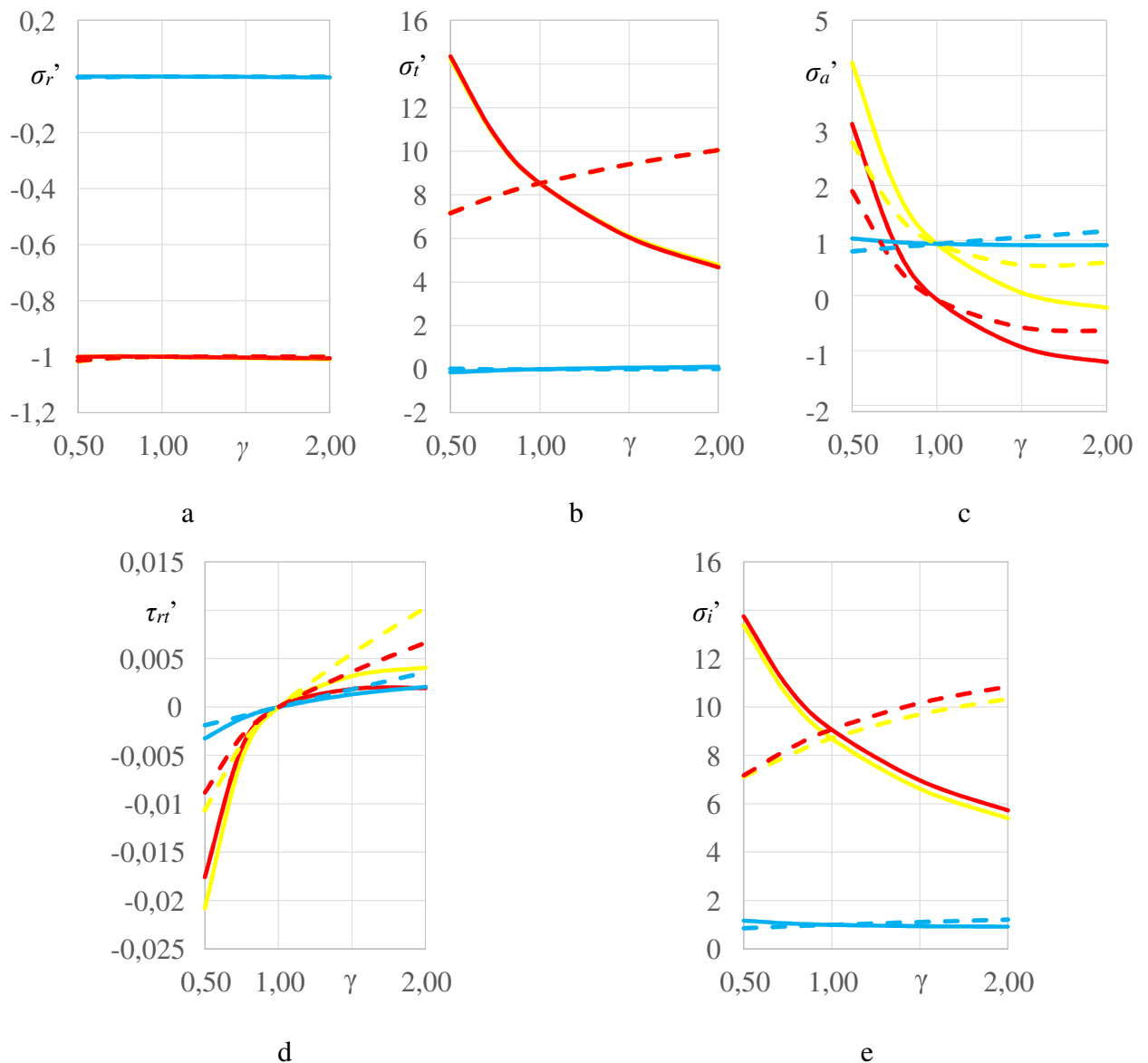
Vamzdžio ir siūlės medžiagų tarpusavio tamprumo modulių santykis nusakomas rodikliu

$$\gamma = \frac{E_v}{E_s};$$

čia  $E_v$  – vamzdžio medžiagos tamprumo modulis;  $E_s$  – siūlės medžiagos tamprumo modulis.

Kai  $\gamma > 1$  – vamzdžio medžiagos tamprumas (standumas) yra didesnis už siūlės medžiagos tamprumą, kai  $\gamma < 1$  – siūlės medžiagos tamprumas yra didesnis už vamzdžio medžiagos tamprumą, kai  $\gamma = 1$  – vamzdis yra vienalytis, t. y. vamzdis yra be suvirinimo siūlės.

Pirmoje šio poskyrio dalyje nagrinėjama įtempių būvio dedamųjų priklausomybė nuo medžiagų tamprumo modulių. Nagrinėjama tokios galimos medžiagų poros:  $\gamma > 1$ ;  $\gamma < 1$ ;  $\gamma = 1$  Kiti nekintantys šioje dalyje naudojami parametrai yra tokie:  $s = 6$  mm;  $r_{in} = 48$  mm;  $E_{siūlės} = 200$  GPa;  $\nu_{siūlės} = 0,28$ ;  $\nu_{vamzdžio} = 0,28$ ;  $h_s = 0,7 \cdot s$ ; Šiame poskyrije bus nagrinėti tokie apkrovimo atvejai:  $p = 1$  MPa ir  $p_a = 0$  MPa;  $p = 0$  MPa ir  $p_a = 1$  MPa;  $p = 1$  MPa ir  $p_a = 1$  MPa.



**2.21 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas pavojingajame taške vamzdžio (---) ir siūlės (—) medžiagose, keičiant vamzdžio ir siūlės tamprumo modulių santykį  $E_{vamzdžio} / E_{siūlės}$  a – radialiniai įtempiai; b – žiediniai įtempiai; c – ašiniai įtempiai; d – tangentiniai įtempiai; e – įtempių intensyvumas; (—) –  $p = 1$   $p_a = 1$  MPa; (—) –  $p = 1$   $p_a = 0$  MPa; (—) –  $p = 0$   $p_a = 1$  MPa

2.21a pav. pavaizduota radialinių įtempių  $\sigma_r$  priklausomybė nuo medžiagų tamprumo modulių santykio. Iš paveikslo matyti, kad keičiantis medžiagoms  $\sigma_r$  nekinta. Radialinių įtempių dydis priklauso nuo vamzdį veikiančio vidinio slėgio. Žiediniai įtempiai  $\sigma_t$  kontakto plokštumoje vamzdžio medžiagoje mažėja, kai vamzdį veikia vidinis slėgis, o siūlės medžiagoje  $\sigma_t$  didėja. Ašiniai įtempiai  $\sigma_a$ , kai vamzdį veikia vidinis slėgis, mažėja. Kai vamzdį veikia tik ašinė apkrova  $\sigma_a$  vamzdžio medžiagoje nekinta, o siūlės medžiagoje nežymiai didėja. Tangentiniai įtempiai  $\tau_{rt}$  didėja nepriklausomai nuo veikiančios apkrovos (2.21d pav.). Kai vamzdžio ir siūlės medžiagos tampa vienodos ( $\gamma = 1$ )  $\tau_{rt}$  tampa lygūs 0. Įtempių intensyvumo  $\sigma_i$ , priklausomybė nuo medžiagų tamprumo modulių pavaizduota 2.21e pav. Įtempių intensyvumas, kaip ir žiediniai įtempiai, kontakto plokštumoje vamzdžio medžiagoje mažėja, kai vamzdį veikia vidinis slėgis, o siūlės medžiagoje didėja. Kai vamzdį veikia tik ašinė apkrova,  $\sigma_i$  vamzdžio medžiagoje nežymiai mažėja, o siūlės medžiagoje nežymiai didėja.

Sekančioje poskyrio dalyje pavaizduota, kaip įtempių būvio dedamosios priklauso nuo medžiagų Puasono koeficientų. Nagrinėti keturios priklausomybės:

$$\gamma = 2, v_{siūlės} = 0,26 \dots 0,3, v_{vamzdžio} = 0,28; (2.22 \text{ pav})$$

$$\gamma = 2, v_{vamzdžio} = 0,26 \dots 0,3, v_{siūlės} = 0,28; (2.23 \text{ pav})$$

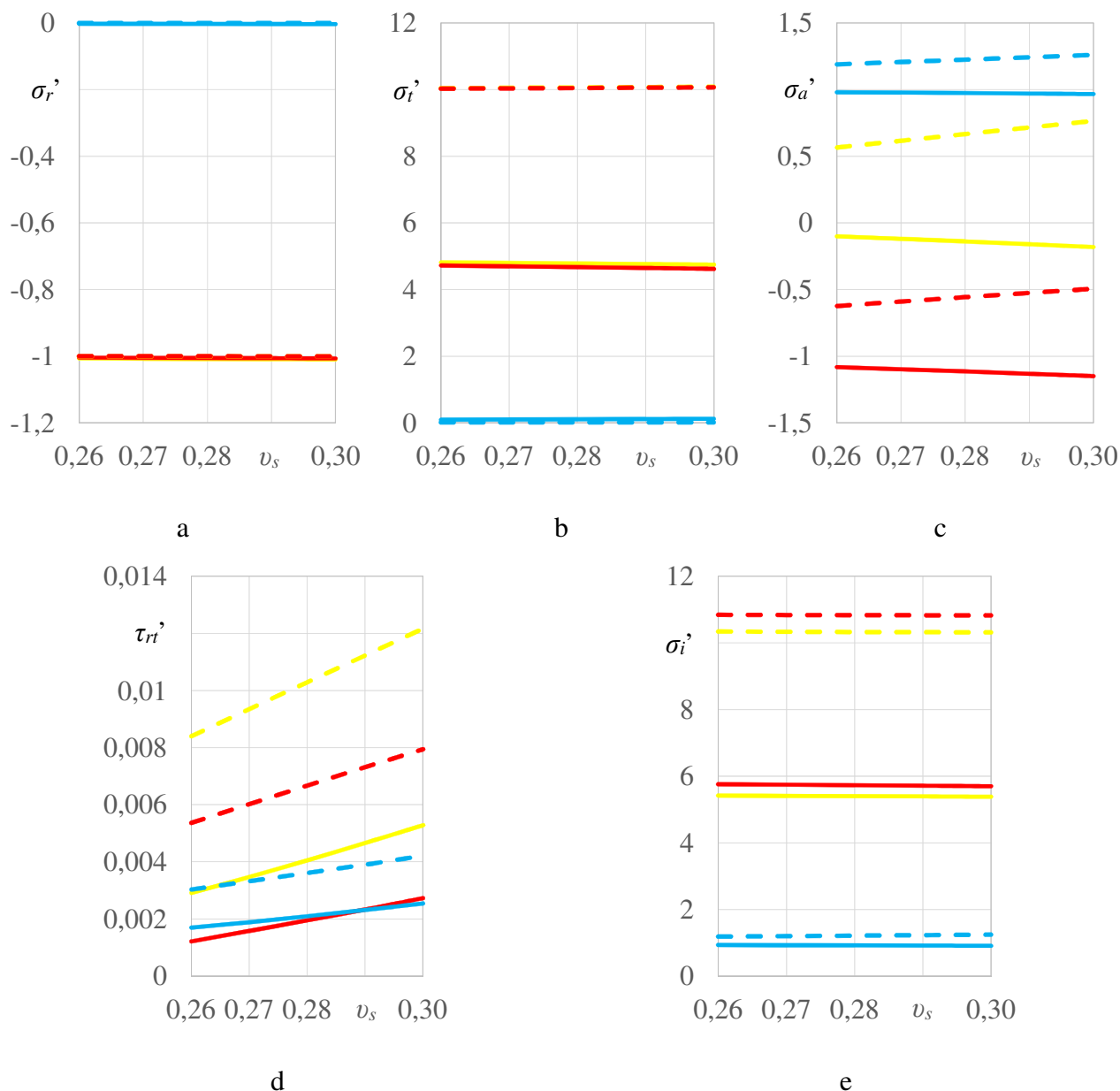
$$\gamma = 0,5, v_{siūlės} = 0,26 \dots 0,3, v_{vamzdžio} = 0,28; (2.24 \text{ pav})$$

$$\gamma = 0,5, v_{vamzdžio} = 0,26 \dots 0,3, v_{siūlės} = 0,28. (2.25 \text{ pav})$$

Kiti nekintantys parametrai naudojami tokie pat, kaip išvardinti šio poskyrio pradžioje.

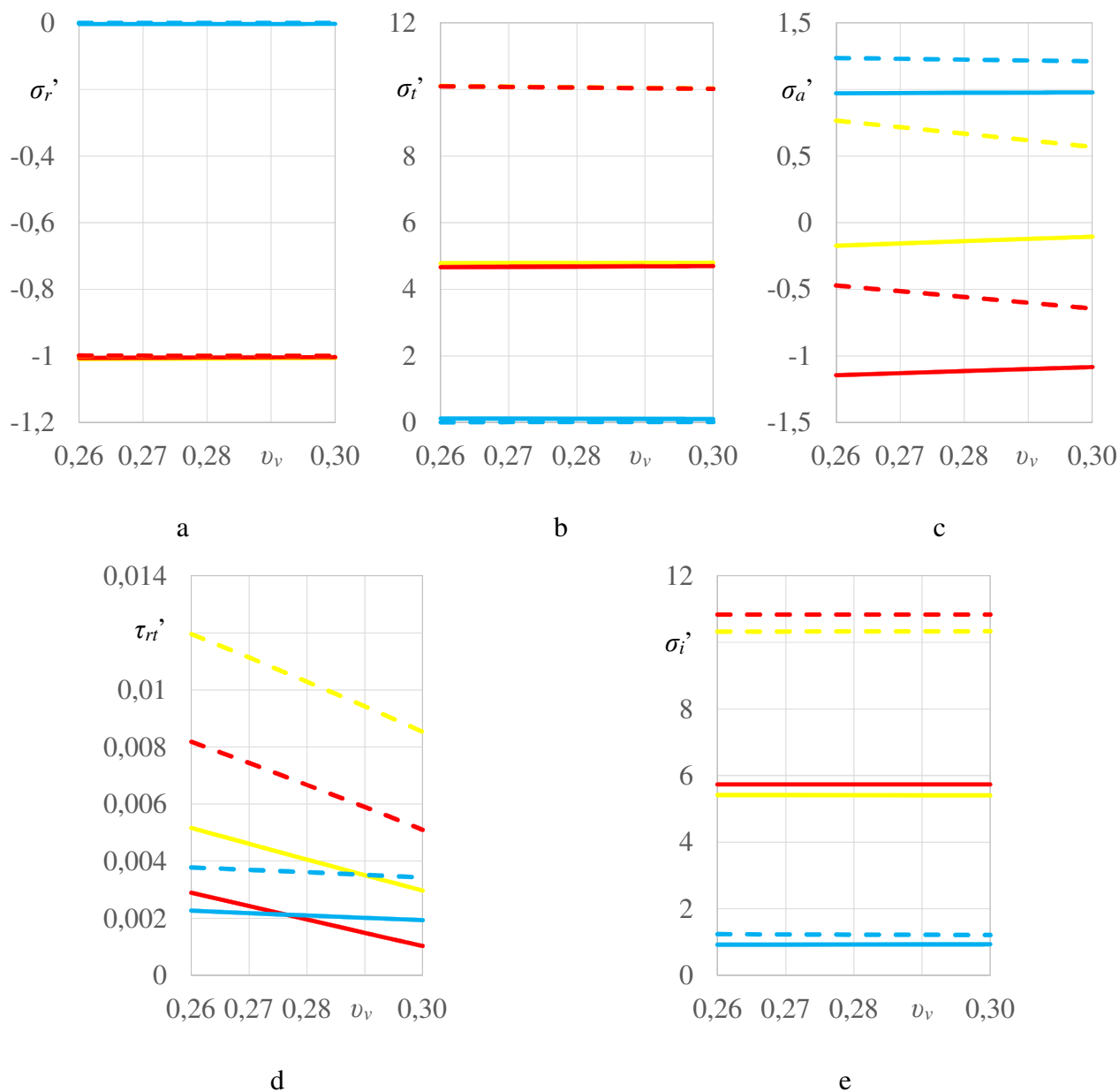
Radialinių įtempių  $\sigma_r$  priklausomybė nuo Puasono koeficientų pateikta 2.22 – 2.25 pav. a dalyse. Iš paveikslų matome, kad  $\sigma_r$  nuo Puasono koeficiento nepriklauso ir yra lygus vamzdį veikiančios vidinės apkrovos dydžiui. Kai vamzdžio neveikia vidinis slėgis radialiniai įtempiai nekyla. Žiediniai įtempiai keičiant medžiagų Puasono koeficientus nekinta ir jų dydis priklauso nuo vamzdžio ir siūlės medžiagų. Kai vamzdžio medžiaga yra du kartus standesnė ( $\gamma = 2$ ) už siūlės medžiagą, santykiniai žiediniai įtempiai kyla mažesni negu tada, kai siūlės medžiaga yra du kartus standesnė ( $\gamma = 0,5$ ) už vamzdžio medžiagą (žr. 2.22 – 2.23b ir 2.24 – 2.25b pav.). Kai vamzdžio medžiagos tamprumo modulis yra didesnis už siūlės medžiagos tamprumo modulį  $\sigma_t$  didesni kyla siūlės medžiagoje, o kai siūlės medžiaga yra standesnė už vamzdžio medžiagą – atvirkščiai. Ašiniai įtempiai, kai  $\gamma > 1$  didinant siūlės medžiagos Puasono koeficientą siūlės medžiagoje didėja, o vamzdžio medžiagoje mažėja (žr. 2.22c pav.). Kai yra didinamas vamzdžio medžiagos Puasono koeficientas siūlės medžiagoje santykiniai ašiniai įtempiai mažėja, o vamzdžio medžiagos  $\sigma_a$  nekinta (2.23c pav.). Kai  $\gamma < 1$ , o Puasono koeficientas keičiamas siūlės medžiagoje  $\sigma_a$  vamzdžio medžiagoje mažėja, o siūlės medžiagoje praktiškai nekinta, kaip ir tada, kai vamzdį veikia tik ašinė apkrova (tada įtempiai nekinta nei vamzdžio, nei siūlės medžiagoje) (2.24c pav.). Kai  $\gamma > 1$  ir Puasono koeficientas yra keičiamas vamzdžio medžiagoje,  $\sigma_a$  didėja, o siūlės medžiagoje  $\sigma_a$  nekinta. Santykiniai tangentiniai įtempiai  $\tau_{rt}$ , kai  $\gamma > 1$  ir keičiamas siūlės Puasono koeficientas didėja, o kai didinamas

vamzdžio medžiagos Puasono koeficientas –  $\tau_{rt}$  mažėja. Tangentiniai štempiai nekinta tik tada, kai vamzdį veikia tik vidinis slėgis. Analogiškai yra ir su standžios siūlės tangentiniais įtempiais. Įtempių intensyvumas  $\sigma_i$ , kaip ir žiediniai įtempiai  $\sigma_t$  nuo Puasono koeficiento nepriklauso. Kai vamzdį veikia tik ašinė apkrova jie yra maždaug lygūs veikiančios ašinės apkrovos dydžiui 2.22e – 2.25e pav. Kai  $\gamma > 1$ ,  $\sigma_i$  didesni kyla siūlės medžiagoje, o kai  $\gamma < 1$  – atvirkščiai.



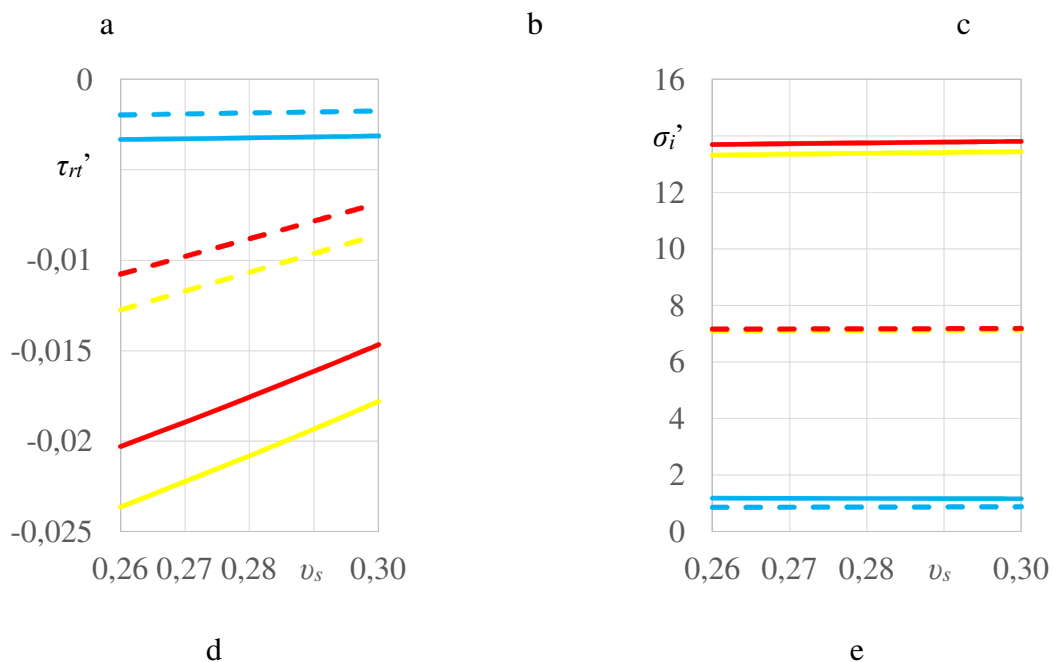
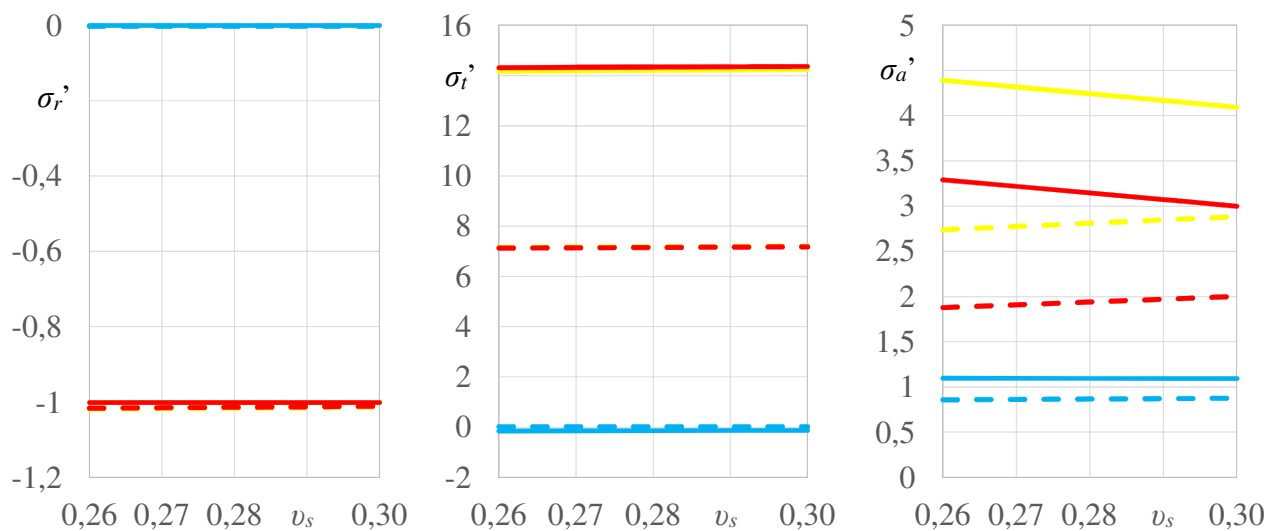
**2.22 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas pavojingajame taške vamzdžio (– – –) ir siūlės (—) medžiagose, priklausomai nuo siūlės medžiagos Puasono koeficiento kai  $\gamma = 2$ : a – radialiniai įtempiai; b – žiediniai įtempiai; c – ašiniai įtempiai; d – tangentiniai įtempiai; e – įtempių intensyvumas; ( — ) –  $p = 1$   $p_a = 1$  MPa; ( — ) –  $p = 1$   $p_a = 0$  MPa; ( — ) –  $p = 0$   $p_a = 1$  MPa

Atlikus tyrimą gauta, kad įtempių būvio dedamosioms didesnę įtaką turi medžiagų tamprumo moduliai negu medžiagų Puasono koeficientai. Nustatyta, kai  $\gamma < 1$  didžiausi įtempiai kyla vamzdžio medžiagoje ir  $\gamma$  didėjant, įtempiai vamzdžio medžiagoje mažėja Siūlės medžiagoje  $\gamma$  santykiui didėjant įtempiai tai pat didėja. Įtempiai keičiasi, kai vamzdį veikia tik vidinis slėgis arba kombinuota apkrova (vidinis slėgis ir ašinė apkrova). Kai vamzdį veikia ašinė apkrova įtempių intensyvumas praktiškai nekinta.

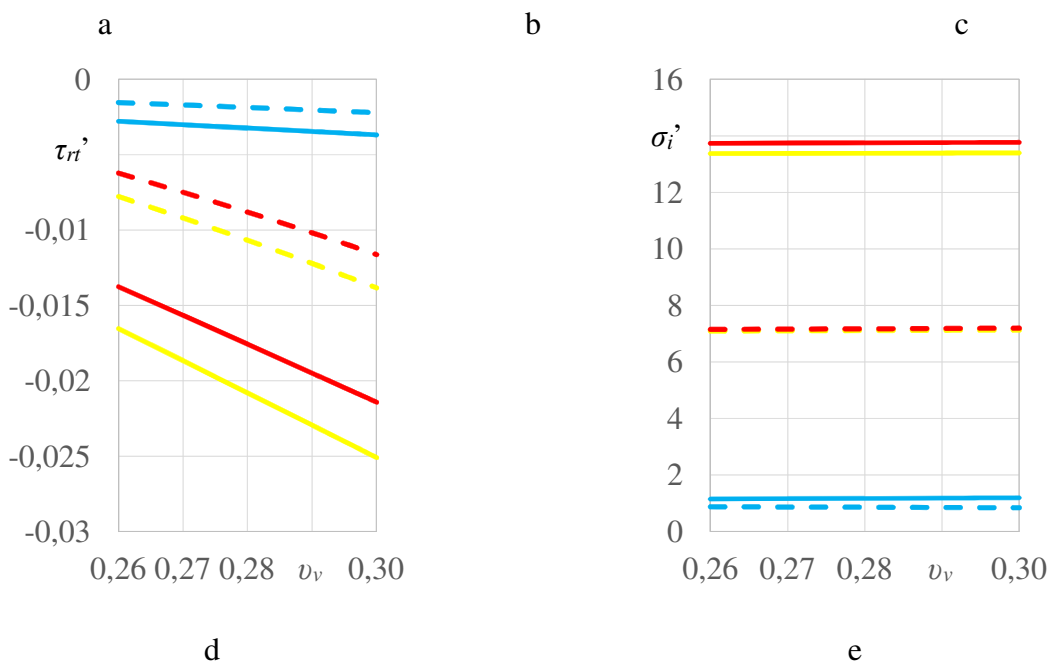
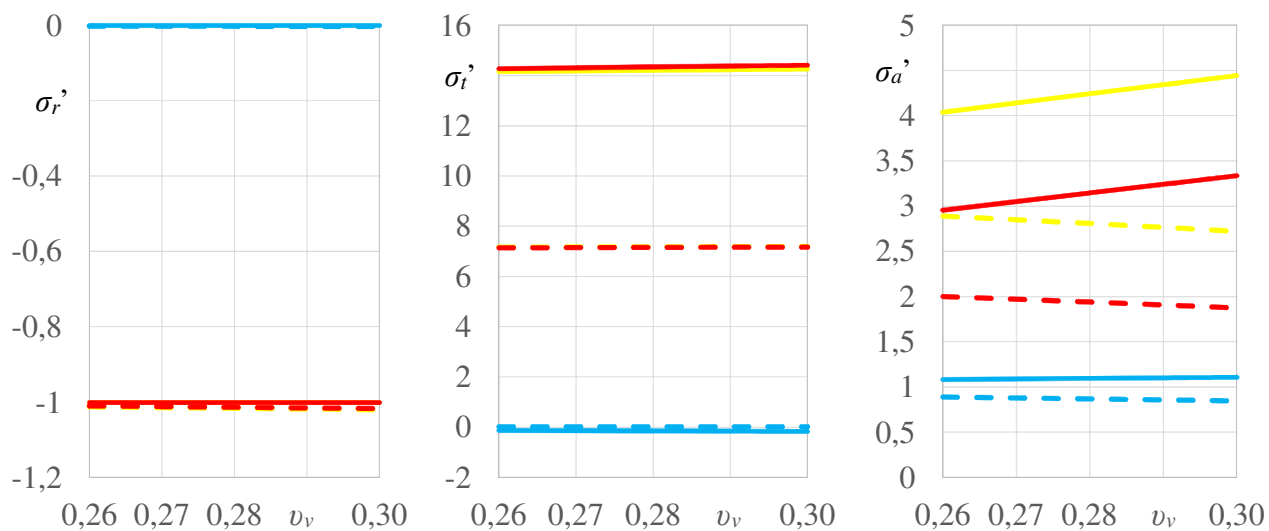


**2.23 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas pavojingajame taške vamzdžio (---) ir siūlės (—) medžiagose, keičiant vamzdžio medžiagos Puasono koeficientą kai  $\gamma = 0,5$ : a – radialiniai įtempiai; b – žiediniai įtempiai; c – ašiniai įtempiai; d – tangentiniai įtempiai; e – įtempių intensyvumas; (—) –  $p = 1$   $p_a = 1$  MPa; (—) –  $p = 1$   $p_a = 0$  MPa; (—) –  $p = 0$   $p_a = 1$  MPa





**2.24 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas pavojingajame taške vamzdžio (---) ir siūlės (—) medžiagose, keičiant siūlės medžiagos Puasono koeficientą kai  $\gamma = 2$ : a – radialiniai įtempiai; b – žiediniai įtempiai; c – ašiniai įtempiai; d – tangentiniai įtempiai; e – įtempių intensyvumas; (—) –  $p = 1$   $p_a = 1$  MPa; (—) –  $p = 1$   $p_a = 0$  MPa; (—) –  $p = 0$   $p_a = 1$  MPa



**2.25 pav.** Įtempių būvio dedamųjų kitimas pavojingajame taške vamzdžio (---) ir siūlės (—) medžiagose, keičiant vamzdžio medžiagos Puasono koeficientą, kai  $\gamma = 2$ : a – radialiniai įtempiai; b – žiediniai įtempiai; c – ašiniai įtempiai; d – tangentiniai įtempiai; e – įtempių intensyvumas; (—) –  $p = 1$   $p_a = 1$  MPa; (—) –  $p = 1$   $p_a = 0$  MPa; (—) –  $p = 0$   $p_a = 1$  MPa

## Išvados

1. Išanalizavus charakteringuosius suvirintojo vamzdžio pjūvius nustatyta, kad pavojingoji vieta yra kontakto plokštumoje ties vidiniu vamzdžio spinduliu. Šioje vietoje kyla didžiausios įtempių intensyvumo ir žiedinių įtempių vertės nepriklausomai nuo veikiančios apkrovos tipo ir dydžio.

2. Šiame darbe buvo tiriama kaip įtempių būvio dedamosios, kylančios suvirintame vamzdyje, priklauso nuo apkrovos pobūdžio. Tirta trijų apkrovų įtaka: veikia tik vidinis slėgis; veikia tik ašinė apkrova; veikia vidinis slėgis ir ašinė apkrova (abiejų apkrovų vertės, išreikštos MPa, buvo vienodos). Nustatyta, kad pavojingiausias atvejis yra, kai vamzdį veikia tik vidinis slėgis.

3. Atlikus įtempių būvio dedamųjų priklausomybės nuo pagrindinių geometrinių parametru tyrimą galima teigti, kad didžiausią įtaką įtempių būviui turi vamzdžio vidinis spindulys. Nes didinant vidinį spindulį įtempiai sparčiai didėja. Tačiau tai yra glaudžiai susiję su sienelės storiu, kadangi didinant vidinį vamzdžio spindulį ir paliekant sienelės storį tokį pat iš storasienio vamzdžio gauname plonasienį vamzdį, kur įtempiai kyla žymiai didesni nei storasieniame vamzdyje.

4. Įtempių būvio dedamosioms didesnę įtaką turi medžiagų tamprumo moduliai negu medžiagų Puasono koeficientai. Nustatyta, kad kai siūlė yra standi didžiausi įtempiai kyla vamzdžio medžiagoje, o siūlei prarandant standumą įtempiai vamzdžio medžiagoje mažėja, o siūlės medžiagoje didėja, kai vamzdį veikia tik vidinis slėgis arba kombinuota apkrova (vidinis slėgis ir ašinė apkrova). Kai vamzdį veikia ašinė apkrova įtempių intensyvumas praktiškai nekinta.

## Literatūra

1. **Vaičiulis D., Bražėnas A.** Determination of stress strain state in pipe subjected to internal pressure at plane strain condition under elasto plastic loading // *Mechanika*. 2011. 17(4): 346-351.
2. **Kaminskas V., Bražėnas A.** Stresses and strains determination of welded pipelines with the mild interlayer at plane stress state under elastic-plastic loading // *Mechanika* 3(53) – Kaunas: Technologija, 2011. P. 5-11. ISSN 1392 – 1207.
3. **Cameron Daugherty and Dr. Mark Archibald.** Strength of Thin-Walled, Butt-Welded Steel Tube. Grove City College 100 Campus Drive Grove City, PA 116127.
4. **J. Pretorius, P. Vandermerwe, GJ. Van Den Berg.** Burst strength of type 304l stainless steel tubes subjected to internal pressure and external forces. Thirteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures St. Louis, Missouri U.S.A., October 17-18,1996.
5. **Bražėnas A., Vaičiulis D.** Stress strain state of mechanically heterogeneous welded joints with ring shaped flat transverse interlayer subjected to tension (compression) // *Mechanika* Nr. 4(15). – Kaunas: Technologija, 1998. P. 5-13. ISSN 1392-1207.
6. **A. Bražėnas, D. Vaičiulis.** Stress Strain State of Mechanically Heterogeneous Welded Joints with the Ring Cross-Section and V Shaped Hard Weld Subjected to Tension (Compression). // *Mechanika*. 2000. 2(22): 2-13. ISSN 1392 – 1207.
7. **M. Erdelen, G. Knauf, U. Marewski, O. Reepmeyer.** Longitudinal welded pipes with enhanced fatigue strength (Hifa ® pipe).
8. **Majid Hemmatzadeh, Hessamoddin Moshayedi, Iradj Sattari-Far.** Influence of heat input and radius to pipe thickness ratio on the residual stresses in circumferential arc welded pipes of API X46 steels. Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, PO Box 15875-4413, Tehran, Iran.
9. **J. Mathew a, b, R.J. Moat b, S. Paddea b, M.E. Fitzpatrick a, P.J. Bouchard b.** Prediction of residual stresses in girth welded pipes using an artificial neural network approach. Faculty of Engineering and Computing, Coventry University, Priory Street, Coventry CV1 5FB, UK.
10. **B. Brickstad, B. L. Josefsonb.** A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes. Division of Solid Mechanics. Chalmers University of Technology, S-412 96 Gijteborg, Sweden.
11. Serfas. Apvalūs konstrukciniai vamzdžiai. Prieiga per internetą: < <http://www.serfas.lt/katalogas/metalo-produkcija/vamzdiniai-profiliai/> apvalus-konstrukciniai-vamzdžiai-en-10219.html > [žiūrėta 2016-12-02].

12. ANSYS Mechanical APDL Feature Archive. Prieiga per internetą: < <http://148.204.81.206/Ansys/150/ANSYS%20Mechanical%20APDL%20Feature%20Archive.pdf> > [žiūrėta 2016-12-02].

### **PUBLIKACIJOS DARBO TEMATIKA**

13. **Karlinskas I., Vaičiulis D.** Suvirintojo vamzdžio su plokščia siūle, veikiamo vidinio slėgio ir ašinės apkrovos, įtempimų intensyvumo tyrimas // Studentų mokslinių darbų konferencijos „Technologijų ir verslo aktualijos – 2017“ pranešimų medžiaga. – Panevėžys, 2017. (Atiduota spausdinimui).

## Priedas

Naudojantis pateiktais rodikliais sukurta ANSYS komandų seka (script'as), kurią įvykdžius ANSYS terpėje automatiškai sukuriamas duotojo tipo suvirintojo sujungimo modelis su plokščia suvirinimo siūle ir išsprendžiamas plokščiasis ašiai simetrinis tamprusis statikos uždavinys. Programos kodas pateiktas toliau.

```
/nopr
FINISH
/CLEAR,NOSTART
/TITLE,Vamzdis veikiamas vidinio slėgio ir asinės jėgos
/PREP7
!-----
! Pradiniai duomenys
!-----
s      = 6           ! vamzdžio sienelės storis, mm
rin    = 48          ! vidinis svamzdžio spindulys, mm
hs     = 1.2*s       ! suvirinimo siūlės aukštis, mm
hp     = 1.2*s       ! vamzdžio aukštis kuriame dar atsirand itempimai, mm
L      = 6.0*s       ! nagrinėjamo vamzdžio ilgis, mm
delta  = 0.2*s       ! atstumas nuo kontakto plokstumos, mm
E      = 2e5         ! pagrindinis tamprumo modulis, MPa
Niu    = 0.28        ! Puasono koeficientas
gama   = 2           ! tamprumo modulių santykis E_vamzdziu / E_siules
p      = 0           ! vidinis slėgis, MPa
pa     = 1           ! asinė apkrova, MPa
N      = 50          ! elementų kiekis kontakto plokstumoje pagal r ašį
TSk    = 200        ! taskų skaičius išilgai trajektorijos
!-----
! Medžiagų aprašymas
!-----
! Siūlės medžiaga
MP,Ex,1,E
MP,NUxy,1,Niu
! Pagrindinė medžiaga
MP,Ex,2,E*gama
MP,NUxy,2,Niu
!-----
! Elemento tipas
!-----
ET,1,PLANE82
KEYOPT,1,3,1 ! paskutinio skaičiaus reikšmės: 0 - plokščias itemptas buvis
              ! 1 - ašiai simetrinis
              ! 2 - plokščias deformuotas buvis
              ! 3 - plokščias užduodant plokšteles stori
!-----
! Geometrijos aprašymas
!-----
K, 1, rin, 0
K, 2, rin+s/2, 0
K, 3, rin+s, 0
K, 4, rin, hs
K, 5, rin+s/2, hs
K, 6, rin+s, hs
K, 7, rin, hs+hp
K, 8, rin+s/2, hs+hp
K, 9, rin+s, hs+hp
K, 10, rin, L
K, 11, rin+s/2, L
K, 12, rin+s, L
L,1,2           ! 1 linija
L,2,3           ! 2
L,1,4           ! 3
L,4,5           ! 4
```

```

L,2,5          ! 5
L,5,6          ! 6
L,3,6          ! 7
L,4,7          ! 8
L,7,8          ! 9
L,5,8          ! 10
L,8,9          ! 11
L,6,9          ! 12
L,7,10         ! 13
L,10,11        ! 14
L,8,11         ! 15
L,11,12        ! 16
L,9,12         ! 17
L PLOT
AL,1,3,4,5     ! 1 plotas (siule metalas)
AL,2,5,6,7     ! 2 plotas (siule metalas)
AL,4,8,9,10    ! 3 plotas (pagrindinis metalas)
AL,6,10,11,12  ! 4 plotas (pagrindinis metalas)
AL,9,13,14,15  ! 5 plotas (pagrindinis metalas)
AL,11,15,16,17 ! 6 plotas (pagrindinis metalas)
A PLOT
ASEL,S,,, 1,2
AATT,1,,,
ASEL,S,,, 3,6
AATT,2,,,
!-----
! Tinklelio sudarymas
!-----
MSHKEY,2       ! 0 - bet koks (trikampis) tinklelis
                ! 1 - staciakampis tinklelis
                ! 2 - jei imanoma sudaryti staciakampi tinkleli

ALLSEL,ALL
ESIZE,s/N
AMESH,ALL
E PLOT
!-----
! Itvirtinimai
!-----
! ITVIRTINIMAI
DL, 1,,UY,0
DL, 2,,UY,0
!-----
! Apkrovos
!-----
SFL, 3,PRES,p
SFL, 8,PRES,p
SFL, 13,PRES,p
SFL, 14,PRES,-pa
SFL, 16,PRES,-pa
!-----
! Uzdavinio sprendimas
!-----
/SOLU
SOLVE
!-----
! Rezultatu isvedimas ir saugojimas
!-----
/POST1
/DSCALE,1,OFF
!PLNSOL,S,X,0,1      ! Sr itempimai (radialiniai itempimai)
!PLNSOL,S,Y,0,1      ! Sz itempimai (asinai itempimai)
!PLNSOL,S,XY,0,1     ! Srz itempimai (tangentiniai itempimai)
PLNSOL,S,EQV,0,1     ! Si itempimai (itempimu intensyvumas)
!PLNSOL,EPTO,X,0,1   ! er deformacijos
!PLNSOL,EPTO,Y,0,1   ! ez deformacijos
!PLNSOL,EPTO,XY,0,1  ! erz deformacijos
!PLNSOL,EPTO,EQV,0,1 ! ei deformacijos
!-----
! Charakteringu pjuviu sudarymas
!-----
!path,OO,2,,Tsk
!ppath,1,,rin,0

```

```

!ppath,2,,rin+s,0
!pdef,ex,EPTO,X,NOAV
!pdef,ez,EPTO,Z,NOAV
!pdef,ei,EPTO,EQV,NOAV
!pdef,Sr,S,X,NOAV
!pdef,Sa,S,y,NOAV
!pdef,st,s,z,NOAV
!pdef,srt,s,xy,NOAV
!pdef,Si,S,EQV,NOAV

!/output,d:\OO_Sr.txt,
!prpath,Sr
!/output,d:\OO_Sa.txt,
!prpath,Sa
!/output,d:\OO_St.txt,
!prpath,St
!/output,d:\OO_Srt.txt,
!prpath,Srt
!/output,d:\OO_Si.txt,
!prpath,Si
!-----
!path,h_h-delta,2,,TSk
!ppath,1,,rin,hs-delta
!ppath,2,,rin+s,hs-delta
!pdef,ex,EPTO,X,NOAV
!pdef,ez,EPTO,Z,NOAV
!pdef,ei,EPTO,EQV,NOAV
!pdef,Sr,S,X,NOAV
!pdef,Sa,S,y,NOAV
!pdef,st,s,z,NOAV
!pdef,srt,s,xy,NOAV
!pdef,Si,S,EQV,NOAV

!/output,d:\h_h-delta_Sr.txt,
!prpath,Sr
!/output,d:\h_h-delta_Sa.txt,
!prpath,Sa
!/output,d:\h_h-delta_St.txt,
!prpath,St
!/output,d:\h_h-delta_Srt.txt,
!prpath,Srt
!/output,d:\h_h-delta_Si.txt,
!prpath,Si
!-----
!path,h_h+delta,2,,TSk
!ppath,1,,rin,hs+delta
!ppath,2,,rin+s,hs+delta
!pdef,ex,EPTO,X,NOAV
!pdef,ez,EPTO,Z,NOAV
!pdef,ei,EPTO,EQV,NOAV
!pdef,Sr,S,X,NOAV
!pdef,Sa,S,y,NOAV
!pdef,st,s,z,NOAV
!pdef,srt,s,xy,NOAV
!pdef,Si,S,EQV,NOAV

!/output,d:\h_h+delta_Sr.txt,
!prpath,Sr
!/output,d:\h_h+delta_Sa.txt,
!prpath,Sa
!/output,d:\h_h+delta_St.txt,
!prpath,St
!/output,d:\h_h+delta_Srt.txt,
!prpath,Srt
!/output,d:\h_h+delta_Si.txt,
!prpath,Si
!-----
!path,L-L,2,,TSk
!ppath,1,,rin,L
!ppath,2,,rin+s,L
!pdef,ex,EPTO,X,NOAV
!pdef,ez,EPTO,Z,NOAV

```



```

!pdef,ei,EPTO,EQV,NOAV
!pdef,Sr,S,X,NOAV
!pdef,Sa,S,y,NOAV
!pdef,st,s,z,NOAV
!pdef,srt,s,xy,NOAV
!pdef,Si,S,EQV,NOAV

!/output,d:\L-L_Sr.txt,
!prpath,Sr
!/output,d:\L-L_Sa.txt,
!prpath,Sa
!/output,d:\L-L_St.txt,
!prpath,St
!/output,d:\L-L_Srt.txt,
!prpath,Srt
!/output,d:\L-L_Si.txt,
!prpath,Si
!-----
path,rin-rin,2,,TSk
ppath,1,,rin,0
ppath,2,,rin,L
!pdef,ex,EPTO,X,NOAV
!pdef,ez,EPTO,Z,NOAV
!pdef,ei,EPTO,EQV,NOAV
pdef,Sr,S,X,NOAV
pdef,Sa,S,y,NOAV
pdef,st,s,z,NOAV
pdef,srt,s,xy,NOAV
pdef,Si,S,EQV,NOAV

/output,d:\rin-rin_Sr.txt,
prpath,Sr
/output,d:\rin-rin_Sa.txt,
prpath,Sa
/output,d:\rin-rin_St.txt,
prpath,St
/output,d:\rin-rin_Srt.txt,
prpath,Srt
/output,d:\rin-rin_Si.txt,
prpath,Si
!-----
!path,r-r,2,,TSk
!ppath,1,,rin+s/2,0
!ppath,2,,rin+s/2,L
!pdef,ex,EPTO,X,NOAV
!pdef,ez,EPTO,Z,NOAV
!pdef,ei,EPTO,EQV,NOAV
!pdef,Sr,S,X,NOAV
!pdef,Sa,S,y,NOAV
!pdef,st,s,z,NOAV
!pdef,srt,s,xy,NOAV
!pdef,Si,S,EQV,NOAV

!/output,d:\r-r_Sr.txt,
!prpath,Sr
!/output,d:\r-r_Sa.txt,
!prpath,Sa
!/output,d:\r-r_St.txt,
!prpath,St
!/output,d:\r-r_Srt.txt,
!prpath,Srt
!/output,d:\r-r_Si.txt,
!prpath,Si
!-----
!path,ri-ri,2,,TSk
!ppath,1,,rin+s,0
!ppath,2,,rin+s,L
!pdef,ex,EPTO,X,NOAV
!pdef,ez,EPTO,Z,NOAV
!pdef,ei,EPTO,EQV,NOAV
!pdef,Sr,S,X,NOAV
!pdef,Sa,S,y,NOAV

```

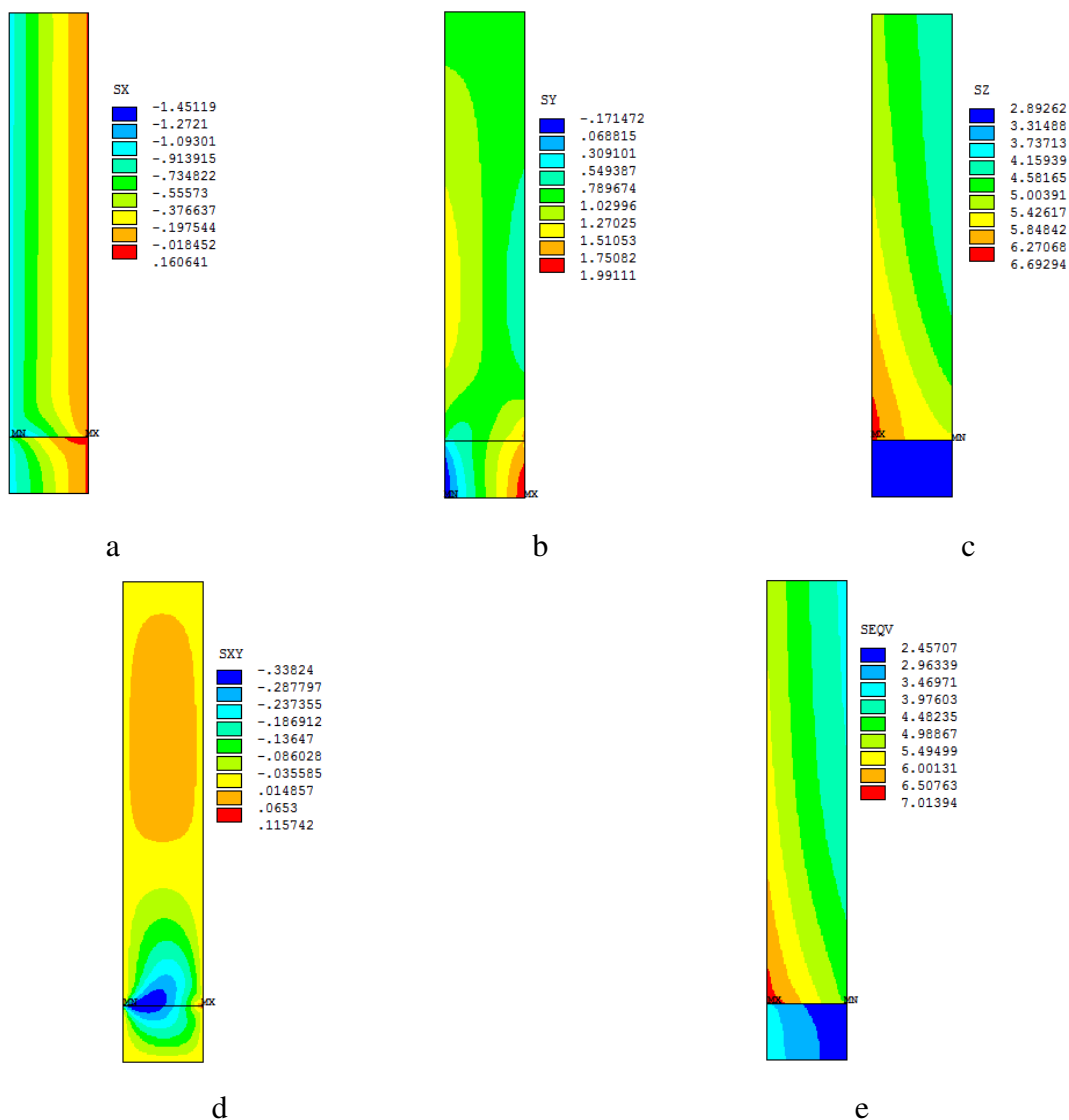
```

!pdef, st, s, z, NOAV
!pdef, srt, s, xy, NOAV
!pdef, Si, S, EQV, NOAV

!/output, d:\ri-ri_Sr.txt,
!prpath, Sr
!/output, d:\ri-ri_Sa.txt,
!prpath, Sa
!/output, d:\ri-ri_St.txt,
!prpath, St
!/output, d:\ri-ri_Srt.txt,
!prpath, Srt
!/output, d:\ri-ri_Si.txt,
!prpath, Si
!-----
/output
path, h_h-delta
plpath, Srt, sr

```

Sekančiame paveiksliuke pateikta įtempių būvio dedamųjų pasiskirstymas suvirintame sujungime, kai:  $s = 6 \text{ mm}$ ;  $r_{in} = 48 \text{ mm}$ ;  $\gamma = 2 \left( \gamma = \frac{E_{vamzdžio}}{E_{siulės}} \right)$ ;  $E_{siulės} = 200 \text{ GPa}$ ;  $\nu_{siulės} = 0,28$ ;  $\nu_{vamzdžio} = 0,28$ ;  $h_s = 0,7 \cdot s$ ; Apkrovos:  $p = 1 \text{ MPa}$  ir  $p_a = 1 \text{ MPa}$ ;



**3.1 pav.** Įtempio būvio dedamųjų pasiskirstymas vamzdyje a – radialiniai įtempiai; b – žiediniai įtempiai; c – ašiniai įtempiai; d – tangentiniai įtempiai; e – įtempių intensyvumas