

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Šarūnas Stremeckas

APKRAUTO SUVIRINTO SUJUNGIMO SU ŽIEDINE MINKŠTA  
SIŪLE ĮTEMPIMŲ IR DEFORMACIJŲ BŪVIO TYRIMAS

Magistro darbas

**Darbo vadovas**  
prof. habil. dr. A. Bražėnas

ŠIAULIAI 2006 m.

## SUMMARY

Stremeckas Š. Strains and deformations state research of loaded welded joint with circular soft seam: Master thesis of mechanical engineer / research advisor associate prof. habil. dr. A. Bražėnas, Šiauliai university, department of technologic, department of mechanical engineering. – Šiauliai, 2006. – 30 p.

Welded joints has an important part in production of ships, machines, buildings and other important industrial parts. These joints are mostly in the concentration zones of important constructions from which belongs their strenght and durability because during the work the proportional limits of materials are exceeded and there static or cyclic elasto-plastic strain appears. Therefore investigations of these welded joints are very important.

In the first chapter there is a review about mechanically heterogeneous welded joints. It describes parameters of simetric welded joint with simple soft seam.

The second chapter presents analysis of separate welded joint parameters. Obtained analysis allows appraise condition of mild and hard materials and properly evaluate state of welded joint from which belongs construction strenght and durability.

## TURINYS

SUMMARY.....	2
ĮVADAS.....	4
1. TEMPIAMO ŽIEDINIO SKERSPJŪVIO SUVIRINTOJO SUJUNGIMO SU PLOKŠČIA SIŪLE ĮTEMPIMŲ IR DEFORMACIJŲ TYRIMO LITERATŪROS APŽVALGA.....	5
1.1 ĮTEMPIMŲ IR DEFORMACIJŲ BŪVIO NUSTATYMAS.....	5
2. PARAMETRŲ ĮTAKOJANČIŲ SUVIRINTOJO SUJUNGIMO STIPRUMĄ IR LGAAMŽIŠKUMĄ TYRIMAS.....	21
IŠVADOS.....	29
LITERATŪRA.....	30

## IVADAS

Daugelyje pramonės šakų ypač plačiai taikomi suvirintieji sujungimai, kurie daugeliui atvejų yra atsakingų konstrukcijų koncentracijos zonose, kuriuose dažnai eksploatacijos metu yra viršijamos medžiagų proporcingumo ribos ir prasideda tampriai plastinis deformavimas. Todėl suvirintojo sujungimo, kaip konstrukcinio elemento, įvertinimas technologijų, eksploatacinių ir konstrukcinių savybių ir jų tyrimas, turi begalo didelę reikšmę pramonės vystymosi raidai.

Suvirintasis sujungimas susideda iš atskirų zonų, turinčių skirtingas mechanines charakteristikas, todėl yra mechaniškai nevienalytis. Šis mechaninis nevienalytiškumas, jau pasireiškiantis esant statiniam apkrovimui, dar labiau sustiprėja mažaciklio apkrovimo metu, kada atskirų zonų medžiagos turi skirtingas ciklines savybes ir turi didelę įtaką sujungimų stiprumui ir ilgaamžiškumui. Be to, didelę įtaką suvirintųjų sujungimų stiprumui ir ilgaamžiškumui turi suvirinimo technologiniai defektai, liekamieji įtempimai, konstrukcinis formos nevienalytiškumas. Suvirintajame sujungime yra zonų, kurių medžiagos mechaninės stiprumo charakteristikos yra didesnės arba mažesnės nei pagrindinio metalo. Mechaninis nevienalytiškumas gali atsirasti suvirinimo metu netinkamai parinkus suvirintosios siūlės medžiagą (elektrodus, vielą), taikant netinkamas suvirinimo technologijas arba eksploatacijos metu esant skirtingoms atskirų sujungimo zonų medžiagų ciklinėms charakteristikoms, pavyzdžiui, cikliškai stiprėjant pagrindiniam metalui ir cikliškai silpnėjant siūlei arba atvirkščiai. Kartais mechaninis nevienalytiškumas atsiranda eksploatacijos metu dėl nevienodo sujungimo medžiagų pasipriešinimo temperatūros poveikiui, deformaciniam senėjimui.

Didelę reikšmę suvirintųjų sujungimų patvarumui turi technologiniai suvirinimo defektai: nesusivirinamumas, šlako intarpai, tuštumos, sukuriantys įtempimų koncentraciją.

Todėl šio mano darbo tikslas ir yra ištirti kaip kinta suvirintojo sujungimo būklė, kaip pasiskirsto įtempimai, deformacijos suvirintajame sujungime kintant tam tikram suvirinimo parametrai – siūlės aukščiui  $a^M$ , nevienalytiškumo koeficientui ir kt. Iš atliktų skaičiavimų ir tyrimų galima padaryti daugelį naudingų išvadų, kurių pagalba, savo nuožiūra galime gerinti suvirintojo sujungimo kokybę, didinti ilgaamžiškumą bei stiprumą keičiant tam tikrus suvirintojo sujungimo parametrus.

Mechaniškai nevienalyčių suvirintųjų sujungimų tyrimus, esant statiniam apkrovimui, pirmieji pradėjo L.Kačanovas ir O.Bakši. Jų darbuose įtempimų būvis supaprastintuose sudurtiniuose sujungimuose su minkštu tarp sluoksniu buvo skaičiuojamas naudojant lyginamąsias koordinates, mažų tampriai plastinių deformacijų teoriją, plokščiųjų pjūvių hipotezę ir medžiagos nesuspaudžiamumo sąlygą.

Visi šie išvardinti faktoriai daugiau ar mažiau įtakoja suvirintųjų konstrukcijų stiprumą ir patikimumą. Todėl yra labai svarbu virinant įvairius nevienalyčius sujungimus parinkti reikimas suvirinimo technologijas, parinkti tinkamą virinimui pagrindinį metalą bei siūlę, įvertinti kitus suvirinimo parametrus kaip siūlės aukštis  $a^M$  ir kt.

# 1. TEMPIAMO ŽIEDINIO SKERSPJŪVIO SUVIRINTOJO SUJUNGIMO SU PLOKŠČIA SIŪLE ĮTEMPIMŲ IR DEFORMACIJŲ TYRIMO LITERATŪROS APŽVALGA

## Įtempimų ir deformacijų būvio nustatymas

Tempiamų (gniuždomų) mechaniškai nevienalyčių žiedinio skerspjūvio suvirintųjų sujungimų su plokščia minkšta siūle įtempimų ir deformacijų būvį, esant tamptariai plastiniam deformavimui, nustatė O. Bakši ir A. Bogomolova [1], taikydami tokias prielaidas:

- radialiniai ir žiediniai įtempimai yra lygūs ( $\sigma_r = \sigma_\varphi$ );
- tangentiniai įtempimai žiedo sienelės storio atžvilgiu pasiskirsto simetriškai.

Atsižvelgiant į išvardintas prielaidas žiedinio skerspjūvio suvirintųjų sujungimų įtempimų intensyvumas

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_z - \sigma_r)^2 + 3(\tau_{rz})^2} . \quad (1.1)$$

Darbe [1], išsprendus uždavinį santykinėse koordinatėse  $\rho = r/r_e, \eta = z/r_e$  (1.1 pav.), gautos šios įtempimų išraiškos:

$$\tau_{rz} = \pm \frac{\tau_{yt}^M C \eta (\rho - \rho_m)}{\alpha^M (1 - \rho_m) \sqrt{1 + C^2 (\rho - \rho_m)^2}} , \quad (1.2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_z = \sigma_{yt}^M \left\{ \frac{1}{\alpha^M \sqrt{3} (1 - \rho_m)} \left( \frac{1 - \rho_m}{C_*} - \frac{\sqrt{1 + C^2 (\rho - \rho_m)^2}}{C} \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{\sqrt{1 + C^2 (\rho - \rho_m)^2}} + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{C_*} \arcsin C_* - \frac{C_*}{C (1 - \rho_m)} \right] \right\} , \quad (1.3) \end{aligned}$$

$$\sigma_r = \sigma_\varphi = \sigma_z \pm \sqrt{(\tau_{yt}^M)^2 - (\tau_{rz})^2} , \quad (1.4)$$

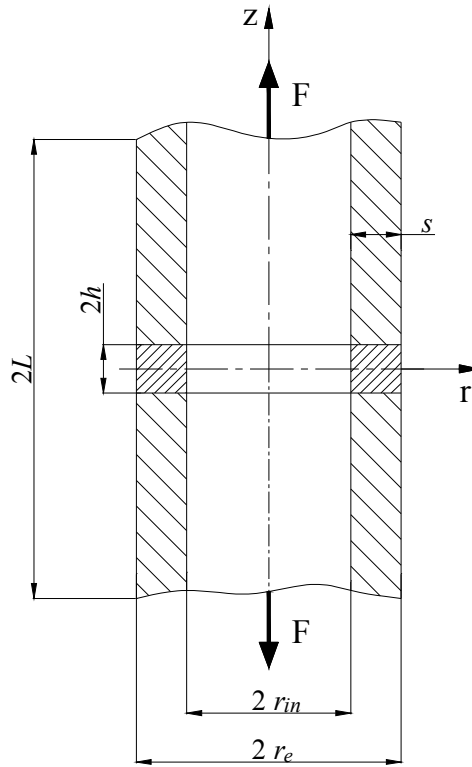
$$\begin{aligned}
\frac{p}{\sigma_{yt}^M} = & \frac{1}{\sqrt{3}\sigma^M C_*} - \frac{2}{3\sqrt{3}\sigma^M (1-\rho_m)(1-\rho_m^2)} \left[ \frac{(1-\rho_m)^3}{C_*^3} - \frac{1}{C_*^3} \right] - \frac{\rho_m}{\sqrt{3}(1-\rho_m)(1-\rho_m^2)} \times \\
& \times \left\{ \frac{(1-\rho_m)^2}{C_*} + \frac{1}{C^2} \left[ \ln(1-\rho_m) \left( 1 - \frac{1}{C_*} \right) - \ln \frac{1}{C} \right] \right\} + \frac{2}{C} \left( \frac{1-\rho_m}{C_*} - \frac{1}{C} \right) \frac{1}{1-\rho_m^2} + \\
& + \frac{2\rho_m}{C(1-\rho_m^2)} \left[ \ln(1-\rho_m) \left( 1 + \frac{1}{C_*} \right) - \ln \frac{1}{C} \right] + \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{C_*} \arcsin C_* - \frac{C_*}{C(1-\rho_m)} \right], \quad (1.5)
\end{aligned}$$

Čia  $\sigma_{yt}^M$  - minkštos medžiagos takumo riba;  $\tau_{yt}^M$  - minkštos medžiagos tangentiųjų įtempimų takumo riba;  $p$  - vidutiniai tempimo įtempimai;  $\rho_m = \frac{r_{in} + r_e}{2r_e}$  - vidutinis santykinis spindulys;  $\alpha^M = 2h/s$  - santykinis minkštos siūlės aukštis;  $C$  - koeficientas nustatomas iš integralinės pusiausvyros sąlygos  $C_* = \frac{C(1-\rho_m)}{\sqrt{1+C^2(1-\rho_m)^2}}$ .

Žiedinio skerspjūvio suvirintojo sujungimo su minkšta plokščia siūle kontaktinis sustiprėjimo koeficientas:

$$K_\alpha = \frac{\pi}{4} + \frac{1+2\rho_m}{3\sqrt{3}\alpha^M(1+\rho_m)}. \quad (1.6)$$

Priklausomybės (1.2) – (1.6) tinka tik sujungimams su plona siūle ( $\alpha^M \ll 1$ ) skaičiuoti, kai  $\alpha^M > \alpha_{\min}^M$ . Tikslus šio uždavinio sprendimas pateiktas [1, 2] darbuose. Čia įvertinama kietos ir minkštos medžiagų tarpusavio sąveika bei laikoma, kad radialiniai ir žiediniai įtempimai, artėjant prie minkšto tarpfluksnio simetrijos ašies ( $\eta = 0$ ), mažėja. Uždavinys taip pat išspręstas santykinėse koordinatėse  $\rho = r/r_e$ ,  $\eta = z/r_e$ , o santykinis siūlės aukštis  $\alpha_s^M = 0.5h/(r_{in} + s)$  (1.1 pav.).



1.1 pav. Žiedinio skerspjūvio suvirintojo sujungimo schema naudota [1, 2, 3] darbuose

Darbe [3] įtempimai apskaičiuojami analogiškai kaip ir plokščioje siūlėje, esant plokščiai deformacijai, t.y.

$$\tau_{rz}^H = \Phi(\eta^H) p C_r^* (\rho - \rho_\tau), \quad (1.7)$$

$$\sigma_r^H = \sigma_\varphi^H = -\frac{1}{2} f_2(\eta^H) p C_r^* [1 - \rho^2 - 2\rho_\tau(1 - \rho)], \quad (1.8)$$

$$\sigma_z^H = \sigma_r^H + \sigma_{i\tau}^H - D^H \tau_{rz}^H \frac{\rho - \rho_\tau}{1 - \rho_\tau}, \quad (1.9)$$

$$\tau_{rz}^M = \Phi(\eta^M) p C_r^* (\rho - \rho_\tau), \quad (1.10)$$

$$\sigma_r^M = \sigma_\varphi^M = \frac{1}{2} f_2(\eta^M) p C_r^* [1 - \rho^2 - 2\rho_\tau(1 - \rho)], \quad (1.11)$$

$$\sigma_z^M = \sigma_{i\tau}^M - D^M \tau_{rz}^M \frac{\rho - \rho_\tau}{1 - \rho_\tau} + \sigma_r^M. \quad (1.12)$$

čia  $\rho_\tau = \rho_m$  - santykinis žiedo spindulys, kuriame  $\tau_{rz} = 0$ ;  $\sigma_{i\tau}^H$ ,  $\sigma_{i\tau}^M$  - įtempimų intensyvumas kietos ir minkštos medžiagų pjūvyje  $\rho_\tau$ ;  $\Phi(\eta^H)$  ir  $\Phi(\eta^M)$  - tangentinųjų įtempimų pasiskirstymo funkcijos išilgai  $z$  ašies kietame ir minkštame metaluose;  $f_2(\eta^H)$  ir  $f_2(\eta^M)$  - radialinių įtempimų pasiskirstymo funkcijos išilgai  $z$  ašies kietame ir minkštame metaluose.

Pjūvyje  $\rho_\tau$  vidutinis įtempimas  $p$ , įtempimų intensyvumai  $\sigma_{i\tau}^M$ ,  $\sigma_{i\tau}^H$  ir tangentinųjų įtempimų parametras  $pC_r^*$  nustatomi iš integralinės pusiausvyros sąlygos  $p = \frac{2}{1 - \rho_{in}^2} \int_{\rho_m}^1 \rho \sigma_z d\rho$ .

Darbe [3] gauta tokia tangentinųjų įtempimų parametro išraiška:

$$pC_r^* = \frac{4\sigma_{i\tau}^{M*}(\gamma_N - 1)}{C_1^* [f_2(\alpha_s^H) + f_2(\alpha_s^M)] - 2C_2^*(D^M - D^H)}, \quad (1.13)$$

ir minkštos medžiagos sustiprėjimo koeficientas

$$K_{re} = \frac{1}{1 - \frac{f_2(0)(\gamma_N - 1)}{f_2(\alpha_s^H) + \gamma_N f_2(\alpha_s^M) + 2C_2^*(D^H - \gamma_N D^M) / C_1^*}}. \quad (1.14)$$

čia  $\gamma_N = \sigma_{i\tau}^{H*} / \sigma_{i\tau}^{M*}$  - momentinis suvirintojo sujungimo mechaninis nevienalytškumo koeficientas;

$\alpha^H$  - santykinis atstumas nuo kontakto plokštumos, kuriame kietame metalo išnyksta sujungimo

medžiagų tarpusavio sąveika ( $\sigma_r^H \approx 0$ );  $C_1^* = 1 - \rho_{in} - 4\rho_m \left( 1 - \frac{2}{3} \cdot \frac{1 - \rho_{in}^3}{1 - \rho_{in}^2} \right)$  ir

$$C_2^* = \frac{2}{1 - \rho_m} \left( \frac{2}{3} \cdot \frac{1 - \rho_{in}^3}{1 - \rho_{in}^2} - \rho_m \right).$$

Kontaktinio sustiprėjimo koeficientas  $K_{re}$  priklauso nuo radialinių įtempimų santykio  $\sigma_{rc}^M / \sigma_{r\tau}^{M*}$  ( $\sigma_{rc}^M = \sigma_{r|\eta^M=0}$  - įtempimas minkšto tarp sluoksniu centre ir  $\sigma_{r\tau}^{M*}$  - minkštos medžiagos įtempimas kontakto plokštumos taške, kuriame  $\tau_{rz}^M = 0$ ). BEM (baigtinių elementų metodu) buvo atlikti  $\sigma_{rc}^M / \sigma_{r\tau}^{M*}$  priklausomybės nuo  $r_{in}$  tyrimai, kai žiedo sienelės storis  $s$  yra pastovus (1.2 pav.).



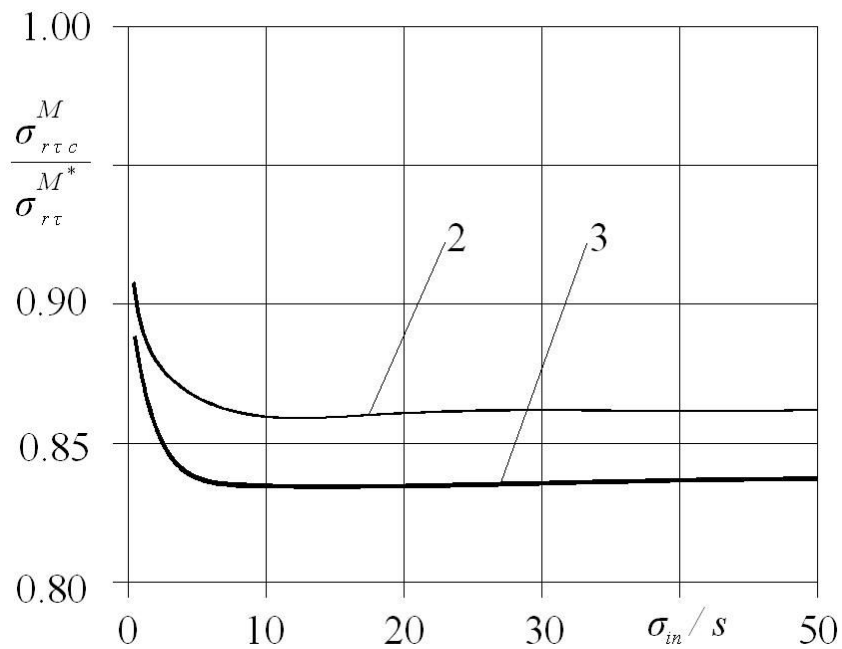
Esant pastoviai  $h/s$  reikšmei, radialinių įtempimų santykis  $\sigma_{rc}^M / \sigma_{r\tau}^{M^*}$ , didėjant  $r_{in}$ , mažėja tik, kai  $r_{in}/s < 4$ . Esant didesnėms  $r_{in}/s$  reikšmėms radialinių įtempimų santykis nebekinta. Įtempimų santykiai  $\sigma_{xc}^M / \sigma_{x\tau}^{M^*}$  ir  $\sigma_{rc}^M / \sigma_{r\tau}^{M^*}$ , apskaičiuoti BEM, esant plokščiai deformacijai ir žiedinio skerspjuvio sujungime, kai  $r_{in}/s = 4$  pakankamai gerai sutampa (1.3 pav.). Darbuose [2,3] santykinis siūlės aukštis priimtas  $\alpha_s^M = 0.5h/(r_{in} + s)$ , todėl šiuose darbuose nustatytos priklausomybės gali būti taikomos tik palyginti mažo skersmens storasieniams vamzdžiams. Pagal darbuose [2,3] pateiktas priklausomybes, esant didesniems žiedinio skerspjuvio suvirintojo sujungimo išoriniams skersmenims, apskaičiuotas sujungimo stiprumas būtų žymiai didesnis už tikrąjį. Todėl šiame darbe priimta ta pati santykinio minkšto tarp sluoksnio išraiška, kaip ir darbe [1]:  $\alpha^M = h/s = h/(r_e - r_{in})$ . Įtempimų nustatymą žiedinio skerspjuvio sujungimo sienelės išilginiame pjūvyje galima atlikti analogiškai, kaip suvirintuose plokščiuose lakštuose. Tačiau, kai  $r_{in}/s$  yra mažas, radialinis įtempimas  $\sigma_{rc}^M$  sujungime su žiediniu skerspjuviu žymiai skiriasi nuo jo reikšmės sujungime, esant plokščiai deformacijai (1.2 pav.). Tai paaiškinama tuo, kad esant mažesnėms  $r_{in}$  reikšmėms, dėl didesnio uždaro kontūro kreivumo deformacijos vamzdžio sienelės minkštame tarp sluoksnyje yra daugiau suvaržytos, negu tu pačių matmenų plokščiam suvirintajame sujungime. Kai žiedinio skerspjuvio suvirintojo sujungimo su minkštu tarp sluoksniu vidinis spindulys  $r_{in} \rightarrow 0$ , sujungimo stiprumas turi būti toks pat kaip ir sujungimo su skritulio formos skerspjuviu, kurio  $\alpha_s^M = 0.5h/(r_{in} + s)$ . Kai  $r_{in}$  artimas nuliui,  $\alpha^M$  yra beveik du kartus didesnis už  $\alpha_s^M$ . Kad radialiniai įtempimai, kai  $r_{in} \rightarrow 0$ , abiem atvejais taptų lygūs, esant skirtingoms  $\alpha^M$  ir  $\alpha_s^M$  reikšmėms, funkcija  $F(\alpha^M)$  apskaičiuojama vietoj minkšto tarp sluoksnio aukščio  $\alpha^M$  įstačius redukuotą jo reikšmę:

$$\alpha_R^M = K_R \cdot \alpha^M. \quad (1.15)$$

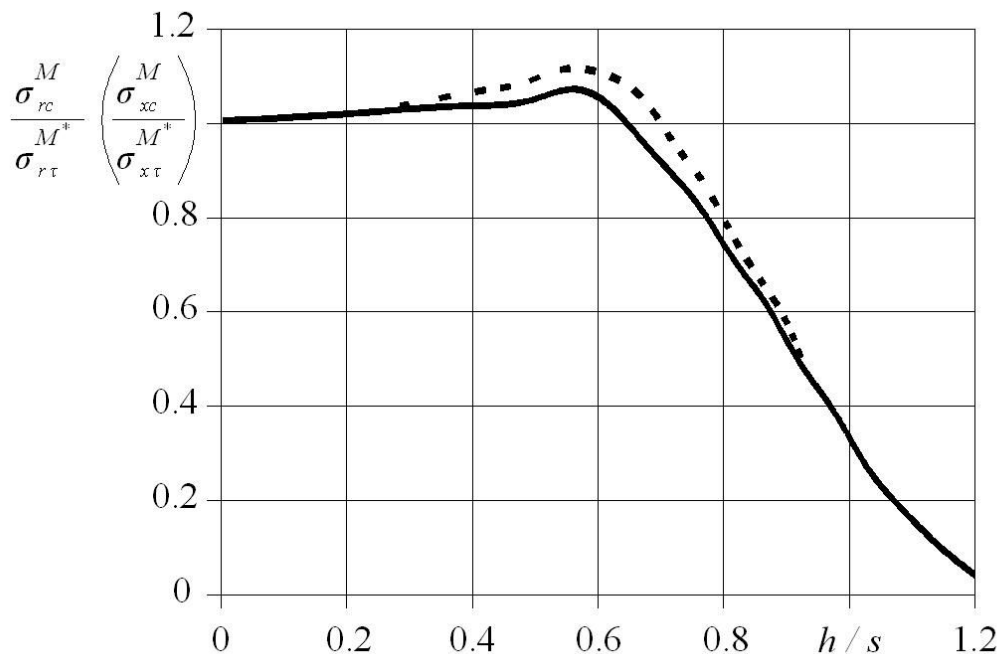
čia  $K_R$  - redukcijos koeficientas. Kai  $r_{in}$  artimas nuliui,  $K_R = 0.5$ , o kai  $r_{in}/s \geq 4 - K_R = 1$ , nes esant toms pačioms  $\alpha^M$  ir  $r_{in}/s \geq 4$  reikšmėms radialinių įtempimų santykis  $\sigma_{rc}^M / \sigma_{r\tau}^{M^*}$  tiek žiedinio skerspjuvio sujungime, tiek lakštiniame sujungime, esant plokščiai deformacijai, praktiškai vienodas (1.3 pav.). Įvertindami, kad, esant  $\rho_{in} = r_{in}/s < 4$ , radialinių įtempimų santykis  $\sigma_{rc}^M / \sigma_{r\tau}^{M^*}$  kinta pagal eksponentės dėsnį (1.2 pav.), redukcijos koeficientas:

$$\left. \begin{aligned} K_R &= 0.5 \exp(0.173\rho_{in}), \text{ kai } \rho_{in} < 4 \\ K_R &= 1, \text{ kai } \rho_{in} \geq 4 \end{aligned} \right\}. \quad (1.16)$$

Šiame darbe įtempimų ir deformacijų būvis žiedinio skerspjuvio mechaniškai nevienalyčiame suvirintajame sujungime skaičiuojamas naudojant tokias santykinės koordinatas:  $\eta = z/s$ ,  $\xi = x/s$ ,  $\rho_{in} = r_{in}/s$ ,  $\rho = r/s = (r_{in} + x)/s = \rho_{in} + \xi$ ,  $\rho_m = (r_{in} + r_e)/2s = \rho_{in} + 0.5$ ,  $\rho_e = r_e/s = \rho_{in} + 1$  (1.4 pav.).



1.2 pav. Įtempimų santykio  $\sigma_{rc}^M / \sigma_r^{M^*}$  ties viduriniu žiedo spinduliu priklausomybė nuo žiedinio skerspjūvio suvirintojo sujungimo vidinio žiedo spindulio  $r_{in}$ , kai  $e_{ym} = 0.5\%$ ,  $L/s = 5$  ir  $\alpha^M = h/s = 0.75$ . Kreivės numeris suvirintojo sujungimo tipą



1.3 pav. Įtempimų santykių  $\sigma_{rc}^M / \sigma_r^{M^*}$  ir  $\sigma_{xc}^M / \sigma_{x\tau}^{M^*}$  ties viduriniu žiedo spindulio priklausomybė nuo santykinio siūlės aukščio ( $\gamma_e = 1.7$ ), kai  $e_{ym} = 0.5\%$ ,  $L/s = 5$ : (—) - žiedinio skerspjūvio sujungime su  $r_{in}/s = 4$ ; (- - -) - lakštiniame sujungime esant plokščiai deformacijai

Vidutiniai įtempimai  $\sigma_{rm}^M$  išilgai minkštos siūlės aukščio apskaičiuojami iš minkštos medžiagos elemento 1  $\xi$   $\xi^*$  1\* (1.4 pav., b) pusiausvyros sąlygos įvertinus, kad  $\tau_{rzc}^M = \tau_{k\alpha|\eta^M=0}^M = 0$ . Tuomet:

$$\sigma_{rm}^M = \frac{2}{\alpha^M} \int_{\rho}^{\rho_z} \tau_{rz}^{M*} d\rho = \frac{2}{\alpha^M} \int_{\xi}^1 \tau_{rz}^{M*} d\xi. \quad (1.17)$$

Čia  $\alpha^M = h/s$  – santykinis siūlės aukštis (1.4 pav., a).

Iš 1.4 pav., b matyti, kad vidutinį įtempimą  $\sigma_{rm}^M$  taip pat galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$\sigma_{rm}^M = \frac{2}{\alpha^M} \int_0^{\alpha^M/2} \sigma_r^M d\eta^M. \quad (1.18)$$

Radialinis įtempimas  $\sigma_r^M$  darbuose [3,4] priimtas:

$$\sigma_r^M = \sigma_r^{M*} f_1(\eta^M). \quad (1.19)$$

Čia  $f_1(\eta^M)$  - radialinių įtempimų pasiskirstymo funkcija išilgai z ašies, įgalinanti apskaičiuoti įtempimą  $\sigma_r^M$ , kai žinoma jo reikšmė kontakto plokštumoje  $\sigma_r^{M*}$ . Šiuo atveju įvertinus, kad  $\eta$  ašis sutapdinta su vidine žiedo sienele, gauname:

$$f_1(\eta^M) = \frac{1}{F(\alpha_R^M)} \left\{ 1 + 4 \left( \frac{\eta^M}{\alpha^M} \right)^2 [F(\alpha_R^M) - 1] \right\}. \quad (1.20)$$

Iš (1.18) – (1.20) priklausomybių matyti, kad

$$\sigma_r^M = f_2(\eta^M) \int_{\xi}^1 \tau_{rz}^{M*} d\xi, \quad (1.21)$$

$$f_2(\eta^M) = \frac{f_1(\eta^M)}{\int_0^{\alpha^M/2} f_1(\eta^M) d\eta^M} = 6 \frac{1 + 4 \left( \frac{\eta^M}{\alpha^M} \right)^2 [F(\alpha_R^M) - 1]}{\alpha^M [F(\alpha_R^M) + 2]}. \quad (1.22)$$

Čia radialinių įtempimų pasiskirstymo funkcija išilgai z ašies.

Siūlėje veikiantys tangentiniai įtempimai apskaičiuojami iš elemento 1  $\xi$   $\xi_{\eta^M} 1_{\eta^M}$  pusiausvyros sąlygos (1.5 pav.), t.y.:

$$\int_0^{\eta^M} \sigma_r^M d\eta^M = \int_{\xi}^1 \tau_{rz}^M d\xi \quad \text{arba} \quad \tau_{rz}^M = \int_0^{\eta^M} \frac{\partial \sigma_r^M}{\partial \xi} d\eta^M.$$

Įvertinę (1.21) gauname:

$$\tau_{rz}^M = \Phi(\eta^M) \tau_{rz}^{M*}, \quad (1.23)$$

čia:

$$\Phi(\eta^M) = \int_0^{\eta^M} f_2(\eta^M) d\eta^M = \frac{6\eta^M}{\alpha^M} \cdot \frac{1 + \frac{4}{3} \left( \frac{\eta^M}{\alpha^M} \right)^2 [F(\alpha_R^M) - 1]}{F(\alpha_R^M) + 2}. \quad (1.24)$$

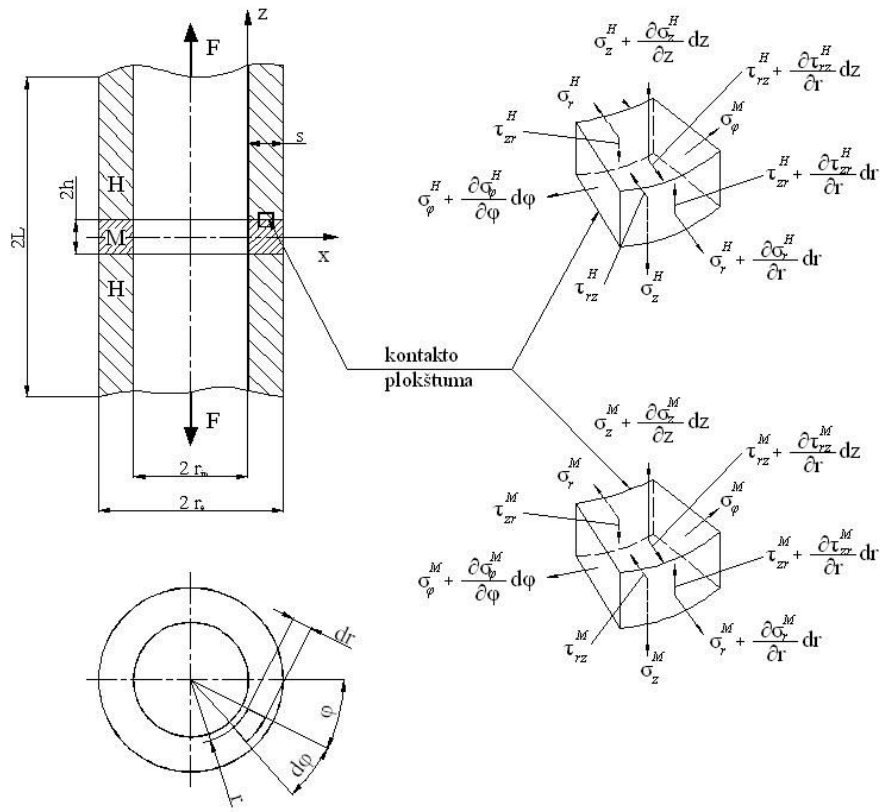
Tangentinių įtempimų pasiskirstymo funkcija išilgai z ašies.

Minkštoje siūlės medžiagoje M koordinatų pradžia yra vidinio siūlės krašto viduriniame taške 0, nuo kontakto plokštumos nutolusiame atstumu  $\alpha^M / 2$  (1.4 pav.). Funkcijos (1.20), (1.22) ir (1.24) galioja, kai  $0 \leq \eta^M \leq \alpha^M / 2$ .

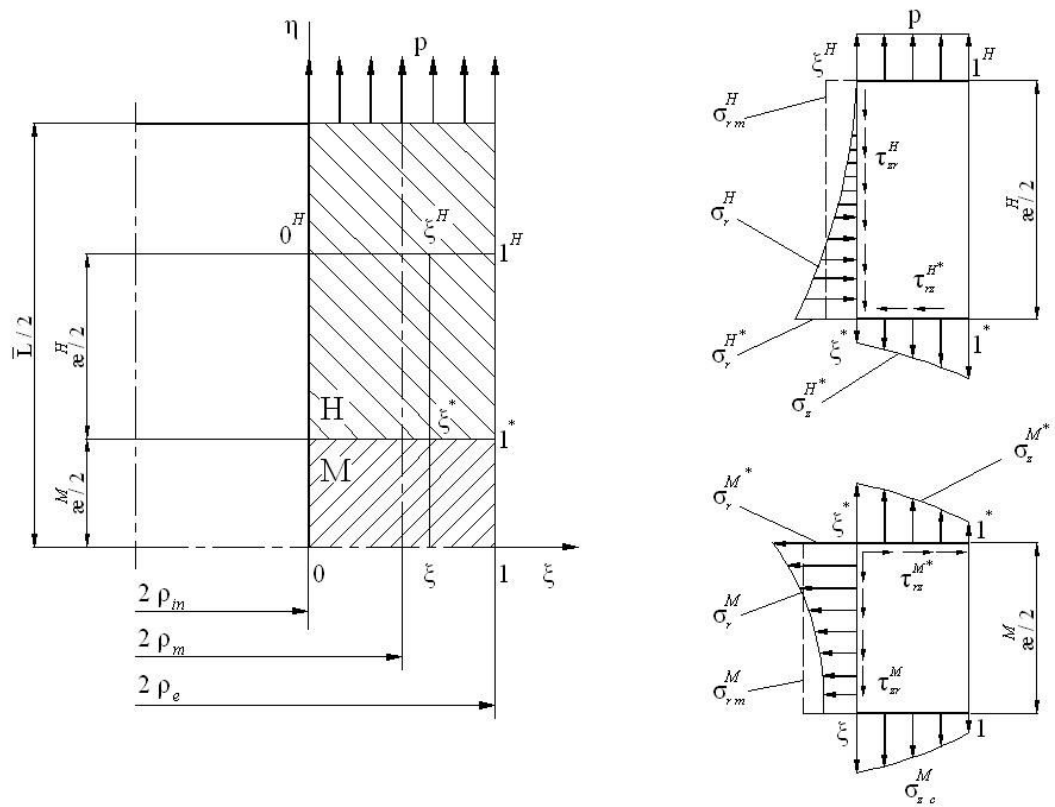
Įtempimų būvį kietoje pagrindinėje medžiagoje H nustatome analogiškai, kaip ir minkštoje siūlės medžiagoje, tik iš elemento 1\*  $\xi^*$   $\xi^H 1^H$  pusiausvyros sąlygos (1.4 pav., b).

Tangentinių įtempimų išraiška kontakto plokštumoje, pritaikius plokščiųjų pjūvių hipotezę tampriai besideformuojančiai kietai medžiagai gaunama tokia pat kaip ir darbe [3], t.y.:

$$\tau_{rz}^* = \tau_{rz}^{H*} = pC_{rp}^* (\xi - \xi_\tau). \quad (1.25)$$

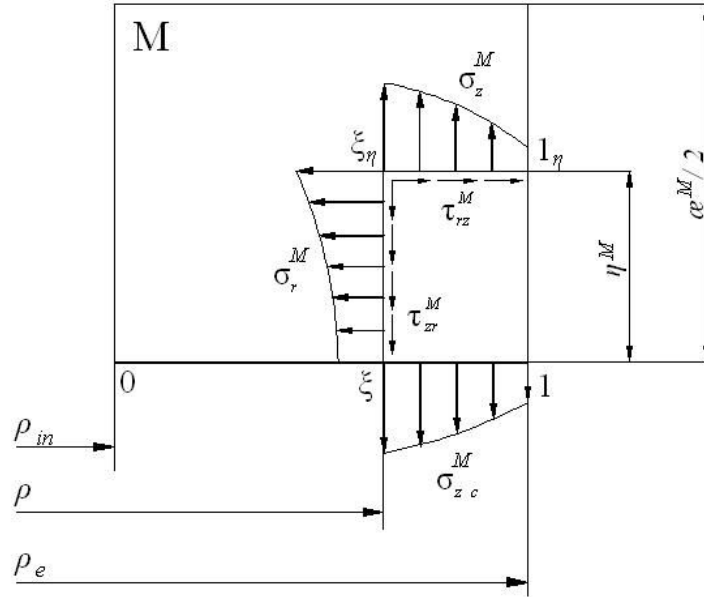


a



b

1.4 pav. Žiedinio skerspjūvio suvirinto sujungimo su minkšta siūle skaičiavimo schema

1.5 pav. Tangentinių įtempimų  $\tau_{rz}^M$  nustatymo schema

Čia  $pC_{rp}^*$  – tangentinių įtempimų parametras nustatomas iš integralinės pusiausvyros sąlygos;  $\xi_r$  – koordinatė, kurioje  $\tau_{rz} = 0$ . Priėmus, kad tangentiniai įtempimai išilgai žiedo sienelės storio pasiskirsto simetriškai, gaunama  $\xi_r = 1/2$ .

Pritaikę plokščiųjų pjūvių hipotezę kietos medžiagos skerspjūviams gauname tokias įtempimų išraiškas:

$$\tau_{rz}^H = \Phi(\eta^H) pC_{rp}^* (\xi - \xi_r), \quad (1.26)$$

$$\sigma_r^H = -\frac{1}{2} f_2(\eta^H) pC_{rp}^* (\xi - \xi^2), \quad (1.27)$$

$$\sigma_z^H = \sigma_{i\tau}^H + \sigma_r^H. \quad (1.28)$$

Funkcijose  $f_2(\eta^H)$  ir  $\Phi(\eta^H)$  vietoje  $\alpha^M$  reikia įrašyti dvigubą santykinį atstumą nuo kontakto plokštumos  $\alpha^H$ , kuriame išnyksta medžiagų M ir H tarpusavio sąveika, t.y., kuriame

$\sigma_r^H \approx 0$ . Darbuose [2,3 ir 4] šis atstumas, esant plokščiai ir ašiai simetrinei deformacijai, priimtas lygus 1.2. Skaičiavimai BEM parodė, kad ir žiedinio skerspjuvio suvirintuosuose sujungimuose šis atstumas yra apytiksliai toks pat, todėl ir šiame darbe priimame, kad  $a^H = 1.2$ . Kietoje pagrindinėje medžiagoje H koordinačių pradžia yra taške  $0^H$ , nuo kontakto plokštumos nutolusiame atstumu  $a^H / 2$  (1.4 pav.). Medžiagoje H funkcijos (1.20), (1.22) ir (1.24) galioja, kai  $0 \leq \eta^H \leq a^H / 2$ .

Įvertinus (1.19), (1.23),  $\xi_\tau = 1/2$  ir sąlyga  $\tau_{rz}^{M^*} = \tau_{rz}^{H^*} = \tau_{rz}^*$ , gaunama radialinių įtempimų išraiška:

$$\sigma_r^M = \frac{1}{2} f_2(\eta) p C_{rP}^* (\xi - \xi^2). \quad (1.29)$$

Kai medžiaga H pradeda deformotis tampriai plastiškai ( $\sigma_i^{H^*}(1) > \sigma_e^H$ ), nebegalioja plokščiųjų pjūvių hipotezė. Esant duotai  $\sigma_i^{H^*}$  reikšmei įtempimų intensyvumo  $\sigma_i^{H^*}(1)$  kitimas priklauso nuo  $\tau_{rz}^{H^*}$  ir  $m_0^H$  arba  $\bar{E}_T^H = E_T^H / E^H$ . Todėl, esant  $\sigma_i^{H^*}(1) > \sigma_e^H$ , kietos pagrindinės medžiagos H išilginiai įtempimai  $\sigma_z^H$  randami pagal analogišką išraišką, pateiktą darbuose [2, 4]:

$$\sigma_z^H = \sigma_{i\tau}^H + \sigma_r^H - D^H \left| \tau_{rz}^H \frac{\xi - \xi_\tau}{1 - \xi_\tau} \right|. \quad (1.30)$$

Čia  $D^H$  – koeficientas.

Darbe [2]  $D^H$  paskaičiuojamas iš prielaidos, kad įtempimų būviai  $\xi^* = 1$  taške ir įtempimų koncentracijos zonose yra panašūs. Įtempimų intensyvumas  $\sigma_i^{H^*}$  buvo nustatytas pagal N. Machutovo priklausomybes su kintamu teoriniu įtempimų koncentracijos koeficientu  $\alpha_\sigma$  [2, 5].

Kadangi  $\alpha_\sigma$  priklauso nuo  $\sigma_i^{H^*}$ , jo nustatymas yra labai sudėtingas.

Todėl šiame darbe taške  $\xi^* = 1$  H medžiagos įtempimų intensyvumas  $\sigma_i^{H^*}$ , išilginė deformacija  $e_z^*$  ir  $D^H$  nustatomi iš potencinės energijos pastovumo principo, kuris kartais naudojamas įtempimų koncentracijos zonose esant tampriai plastiniam deformavimui. Įvertinant, kad įtempimų būvis taške  $\xi^* = 1$  yra panašus kaip įtempimų koncentracijos zonose, kietos medžiagos H taške  $\xi^* = 1$  potencinė energija, esant tampriam ir tampriai plastiniam deformavimui yra ta pati. Tuomet:

$$\sigma_i^{H^*}(1) = \frac{\sigma_i^{H^*}(1)_f^2}{E^H f[\sigma_i^{H^*}(1)]}. \quad (1.31)$$

čia  $\sigma_i^{H^*}(1)_f = \sqrt{(\sigma_{i\tau}^{H^*})^2 + 3[(pC_{rp}^*)_f(1 - \xi_\tau)]^2}$  – fiktyvus įtempimų intensyvumas, apskaičiuotas pagal (1.1), (1.27) – (1.29) priklausomybes laikant, kad H metalas yra absoliučiai tamprus. Fiktyvus įtempimų intensyvumas  $\sigma_{i\tau}^{H^*} = \gamma_{Nf} \sigma_{i\tau}^{M^*}$ . Kai  $e_{i\tau}^* \leq e_e^H$  priimama  $\gamma_{Nf} = \gamma_e$  ir kai  $e_{i\tau}^* > e_e^H$ , tai  $\gamma_{Nf} = e_{i\tau}^*$ . Tangentinių įtempimų koeficientas  $(pC_{rp}^*)_f$  apskaičiuojamas pagal (1.39) priėmus, kad  $D^H = 0$  ir  $\gamma_N = \gamma_{Nf}$ .

Funkcija  $f[\sigma_i^{H^*}(1)]$  priklauso nuo H medžiagos deformavimo diagramos aproksimacijos, esant laipsninei aproksimacijai:

$$f[\sigma_i^{H^*}(1)] = e_e^H \left( \frac{\sigma_i^{H^*}(1)}{\sigma_e^H} \right)^{\frac{1}{m_0^H}},$$

ir linijinei aproksimacijai

$$f[\sigma_i^{H^*}(1)] = \frac{\sigma_i^{H^*}(1)}{E_T^H} - \sigma_e^H \frac{E^H - E_T^H}{E^H E_T^H}.$$

Tuomet kietos tampriai plastiškai deformuotos medžiagos įtempimų intensyvumas taške  $\xi^* = 1$ , esant laipsninei aproksimacijai:

$$\sigma_i^{H^*}(1) = \sigma_e^H \left( \frac{\sigma_i^{H^*}(1)_f}{\sigma_e^H} \right)^{\frac{2m_0^H}{1+m_0^H}}, \quad (1.32)$$



ir

$$\sigma_i^{H^*}(1) = \frac{\sigma_e^H(E^H - E_T^H)}{2E^H} + \sqrt{\left[ \frac{\sigma_e^H(E^H - E_T^H)}{2E^H} \right]^2 + \frac{\sigma_i^{H^*}(1)^2 E_T^H}{E^H}}. \quad (1.33)$$

esant linijinei aproksimacijai.

Kai žinomas  $\sigma_i^{H^*}(1)$ , iš (1.1) ir (1.30) priklausomybių taške  $\xi^* = 1$  nustatomas koeficientas

$$D^H = \frac{\sigma_{i\tau}^{H^*} - \sqrt{[\sigma_i^{H^*}(1)]^2 - 3[\tau_{rz}^{H^*}(1)]^2}}{|\tau_{rz}^{H^*}(1)|}. \quad (1.34)$$

Išilgai minkštos medžiagos M įtempimai  $\sigma_z^M$  nustatomi analogiškai kaip ir kieto tampriai plastiško deformuojamo H metalo:

$$\sigma_z^M = \sigma_{i\tau}^M + \sigma_r^M - D^M \left| \tau_{rz}^M \frac{\xi - \xi_\tau}{1 - \xi_\tau} \right|. \quad (1.35)$$

čia  $D^M$  - koeficientas apskaičiuojamas iš medžiagų M ir H išilginių deformacijų lygybės kraštiniuose kontakto plokštumos taškuose  $\xi^* = 0$  arba  $\xi^* = 1$ , t.y. iš  $e_z^{M^*}(0) = e_z^{H^*}(0)$  arba  $e_z^{M^*}(1) = e_z^{H^*}(1)$ .

Vidutinis įtempimas  $p$  nuo išorinės apkrovos apskaičiuojamas iš integralinės pusiausvyros sąlygos

$$p = \frac{2}{r_e^2 - r_{in}^2} \int_{r_{in}}^{r_e} r \sigma_z dr = \frac{1}{\rho_m} \int_0^1 (\rho_{in} + \xi) \sigma_z d\xi. \quad (1.36)$$

Ją užrašius M arba H medžiagų kontakto plokštumai gauname:

$$p = \sigma_{i\tau}^{M^*} + \frac{pC_{rP}^*}{12} [f_2(\alpha^M / 2) - 2D^M], \quad (1.37)$$

$$p = \sigma_{i\tau}^{H^*} + \frac{pC_{rP}^*}{12} [f_2(\alpha^H / 2) - 2D^H]. \quad (1.38)$$

Iš (1.37) ir (1.38) lygybių apskaičiuojamas tangentių įtempimų parametras

$$pC_{rP}^* = \frac{12\sigma_{i\tau}^{M^*}(\gamma_N - 1)}{f_2(\alpha^M / 2) + f_2(\alpha^H / 2) + 2(D^H - D^M)}. \quad (1.39)$$

čia  $\gamma_N = \sigma_{i\tau}^{H^*} / \sigma_{i\tau}^{M^*}$  - momentinis sujungimo mechaninis nevienalytiškumo koeficientas.

Pritaikius (1.36) formulę bet kuriam  $\eta^M$  ir  $\eta^H$  pjūviui gautos įtempimų intensyvumų  $\sigma_{i\tau}^M$  ir  $\sigma_{i\tau}^H$  priklausomybės:

$$\sigma_{i\tau}^M = p - \frac{pC_{rP}^*}{12} [f_2(\eta^M) - 2\Phi(\eta^M)D^M], \quad (1.40)$$

$$\sigma_{i\tau}^H = p - \frac{pC_{rP}^*}{12} [f_2(\eta^H) - 2\Phi(\eta^H)D^H]. \quad (1.41)$$

Deformacijos apskaičiuojamos iš apibendrinto Huko dėsnio, įvertinus, kad  $\nu = 0.5$ ,  $\sigma_r = \sigma_\varphi$  ir tamprumo modulį  $E$  pakeitus momentiniu deformavimo diagramos modulio  $E'$ .

$$e_z = -2e_r = -2e_\varphi = \frac{\sigma_z - \sigma_r}{E'}, \quad (1.42)$$

$$e_{rz} = \frac{3\tau_{rz}}{E'}, \quad (1.43)$$

$$e_i = \sqrt{e_z^2 + \frac{1}{3}\gamma_{rz}^2}. \quad (1.44)$$

Norint apskaičiuoti įtempimų ir deformacijų būvį žiedinio skerspjūvio suvirintajame sujungime, turi būti žinomas deformacijų intensyvumas kontakto plokštumos taške  $\xi = \xi_\tau = 0.5$ . Kadangi šiame pjūvyje šlyties deformacijos lygios nuliui, tai  $e_{i\tau}^* = e_{z\tau}^*$ .

Kai žinoma  $e_{i\tau}^*$  pagal (1.22) – (1.30), (1.32) – (1.35), (1.37) – (1.44) priklausomybes įtempimų ir deformacijų būvis žiedinio skerspjūvio suvirintajame sujungime nustatomas taip:

1. Nustatome  $\sigma_{i\tau e}^{H^*}$ , kuris atitinka  $\sigma_{i\tau e}^{H^*}(1) = \sigma_e^H$ , t.y. nustatome apkrovimą, kuriam esant H medžiaga deformuojama tik tampriai (žr. Žemiau A – G punktus).
2. Pagal  $e_{i\tau}^*$  iš sujungimo medžiagų deformavimo deagramų nustatome  $\sigma_{i\tau}^{H^*}$  ir  $\sigma_{i\tau}^{M^*}$ , o po to apskaičiuojame sujungimo momentinį mechaninį nevienalytiškumo koeficientą  $\gamma_N$ .
3. Kai  $\sigma_{i\tau}^{H^*} > \sigma_{i\tau e}^{H^*}$ , iš potencinės energijos pastovumo principo apskaičiuojame  $D^H$ , priešingu atveju  $D^H = 0$ .
4. Apskaičiuojame  $pC_{rp}^*$ .
5. Nustatome  $e_z^{M^*}(1)$  ir  $e_z^{H^*}(1)$ .
6. Kai  $e_z^{M^*}(1) > e_z^{H^*}(1)$   $D^M$  didinamas, priešingu atveju – mažinamas ir skaičiavimus tęsiame pradedant 4 punktu.  $D^M$  kitimo žingsnis po pirmosios iteracijos gali būti apskaičiuotas pagal formulę:  $\Delta D^M = \left[ \sigma_{i\tau}^{M^*} - E^{M^*} e_z^{H^*}(1) \right] / \left| \tau_{rz}^{M^*}(1) \right|$ .
7. Skaičiuojame tol, kol skirtumas  $\left| e_z^{M^*}(1) - e_z^{H^*}(1) \right|$  tampa norimai mažas.

Įtempimų intensyvumas  $\sigma_{i\tau e}^{H^*}$  nustatomas taip:

- A. Priimame  $D^H = 0$ ,  $D^M = 0$ .
- B. Apskaičiuojame pirmojo priartėjimo  $\sigma_{i\tau e}^{H^*} = 1 - \gamma_e / 10$ .
- C. Apskaičiuojame mechaninį nevienalytiškumo koeficientą  $\gamma_N = \sigma_{i\tau}^{H^*} / \sigma_{i\tau}^{M^*}$ .
- D. 4 – 7 punktuose numatyta priartėjimų tvarka pasiekiamo, kad  $e_z^{M^*}(1) = e_z^{H^*}(1)$  norimu tikslumu.

E. Apskaičiuojame  $\sigma_i^{H^*}(1)$ .

F. Kai  $\sigma_i^{H^*}(1) > \sigma_e^H$ , tai  $\sigma_{i \tau e}^{H^*}$  mažinamas, priešingu atveju – didinamas ir grįžtame į punktą

D.  $\sigma_{i \tau e}^{H^*}$  kitimo žingsnis po pirmosios iteracijos gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$\Delta \sigma_{i \tau e}^{H^*} = \sigma_e^H - \sigma_i^{H^*}(1).$$

G. Skaičiuojame tol, kol skirtumas  $|\sigma_e^H - \sigma_i^{H^*}(1)|$  tampa norimai mažas.

Skaičiuojant gniuždomą suvirintąjį sujungimą, įtempimų ir deformacijų ženklus reikia pakeisti priešingais.

Medžiagų deformavimo diagramų aproksimacijai ir skaičiavimams supaprastinti uždaviniai dažnai sprendžiami naudojant santykinės įtempimų ir deformacijų reikšmes. Šiuo atveju įtempimai ir deformacijos išreiškiami santykiniais vienetais, palyginant juos su proporcingumo ribos įtempimu ir deformacija:

$$\bar{\sigma}_e = 1, \bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_r}{\sigma_e}, \bar{\sigma}_z = \frac{\sigma_z}{\sigma_e}, \bar{\tau}_{rz} = \frac{\tau_{rz}}{\sigma_e}, \bar{\sigma}_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_e}, \bar{p} = \frac{p}{\sigma_e},$$

$$\bar{e}_e = 1, \bar{e}_r = \frac{e_r}{e_e}, \bar{e}_z = \frac{e_z}{e_e}, \bar{e}_{rz} = \frac{e_{rz}}{e_e}, \bar{e}_i = \frac{e_i}{e_e}.$$

Norint įtempimus ir deformacijas išreikšti santykiniais vienetais reikia aukščiau pateiktose priklausomybėse vietoj įtempimų ir deformacijų įstatyti santykinės jų reikšmes. Skaičiuojant santykiniais vienetais būtina atsižvelgti į tai, kad  $\bar{E} = 1, \bar{E}_T = E_T / E, \bar{E}' = \bar{\sigma}_i / \bar{e}_i$ . Lyginant deformacijas kontakto plokštumoje, būtina turėti omeny, kad  $\bar{\sigma}_{i \tau}^{H^*} \cdot \gamma_e = \bar{\sigma}_i^{M^*}$ ,  $\bar{e}^H \cdot \gamma_e = \bar{e}^M$ , o apskaičiuojant vidutinį įtempimą -  $\bar{p}^H \cdot \gamma_e = \bar{p}^M$ . Atsižvelgiant į šiuos pakeitimus, įtempimų būvio komponentai išreiškiami minkštos medžiagos santykiniais vienetais [2].

## 2. PARAMETRŲ ĮTAKOJANČIŲ SUVIRINTOJO SUJUNGIMO STIPRUMĄ IR ILGAAMŽIŠKUMĄ TYRIMAS

Tyrimas buvo atliktas skaičiuojant programa „Žiedas“ [8]. Suvirintąjį sujungimą sudaro: pagrindinis metalas H – plienas 45 ir siulės metalas M – plienas 25.

Vienas iš pagrindinių parametrų įtakojančių suvirintojo sujungimo stiprumą bei ilgaamžiškumą – santykinis siulės aukštis  $\alpha^M$ . Kaip pasiskirsto įtempimai cilindrinėje koordinatėse sistemoje pavaizduota 2.1 pav. a, b. Mažėjant minkštos siulės santykiniam aukščiui  $\alpha^M$  įtempimai kontakto plokštumoje didėja. Ir atvirkščiai, kai mažėja santykinis siulės aukštis deformacijos taip pat mažėja. Deformacijų pasiskirstymo grafikai priklausomai nuo santykinio siulės aukščio pateikti 2.2 pav. a, b.

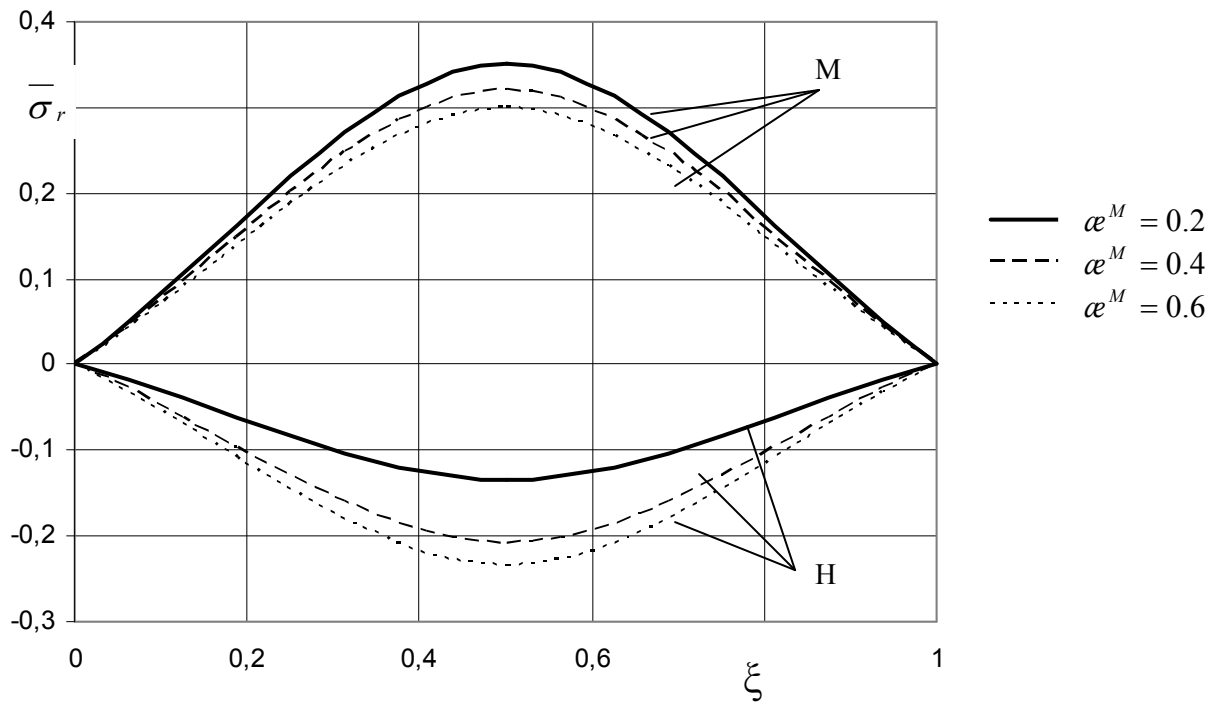
Kitas labai svarbus parametras – tai mechaninis nevienalytiškumo koeficientas  $\gamma_N$ . Mechaninio nevienalytiškumo atsiradimo priežastis yra suvirintojo sujungimo skirtingos medžiagų stiprumo mechaninės charakteristikos. Tai pat atsiradimo priežastimi gali būti netinkamai parinkta siulės medžiaga, taikant netinkama suvirinimo technologiją ar esant atskirų zonų skirtingoms ciklinėms charakteristikoms. Mechanškai nevienalyčių suvirintųjų sujungimų kontakto plokštumoje realizuojasi erdvinis įtempimų būvis. Kaip kinta įtempimų, deformacijų būvis pavaizduota 2.3 pav. a, b ir 2.4 pav. a, b. Didžiausios deformacijos, o kartu ir pavojingiausias pjūvis yra ties minkštos siulės viduriu. Didėjant sujungimo mechaniniam nevienalytiškumui deformacijos taip pat didėja.

Didelę įtaką suvirintojo sujungimo stiprumui ir ilgaamžiškumui turi medžiagos sustiprėjimas tampriai plastinėje zonoje. Todėl didelios įtakos turi minkštos medžiagos sustiprėjimo tampriai plastinėje zonoje charakteristika esant laipsninei medžiagos deformavimo diagramos aproksimacijai  $m^M_0$ . Įtempimų ir deformacijų priklausomybės nuo  $m^M_0$  pavaizduotos 2.5 pav. a, b ir 2.6 pav. a, b. Iš grafikų matyti, kad sustiprėjimo charakteristika tampriai plastinėje zonoje turi ypač didelės įtakos suvirintojo sujungimo stiprumui. Dar labiau mažėjant  $m^M_0$  parametrai, deformacijos ir įtempimai žymiai padidėja. Didžiausios deformacijos pasireiškia ties kontakto plokštuma

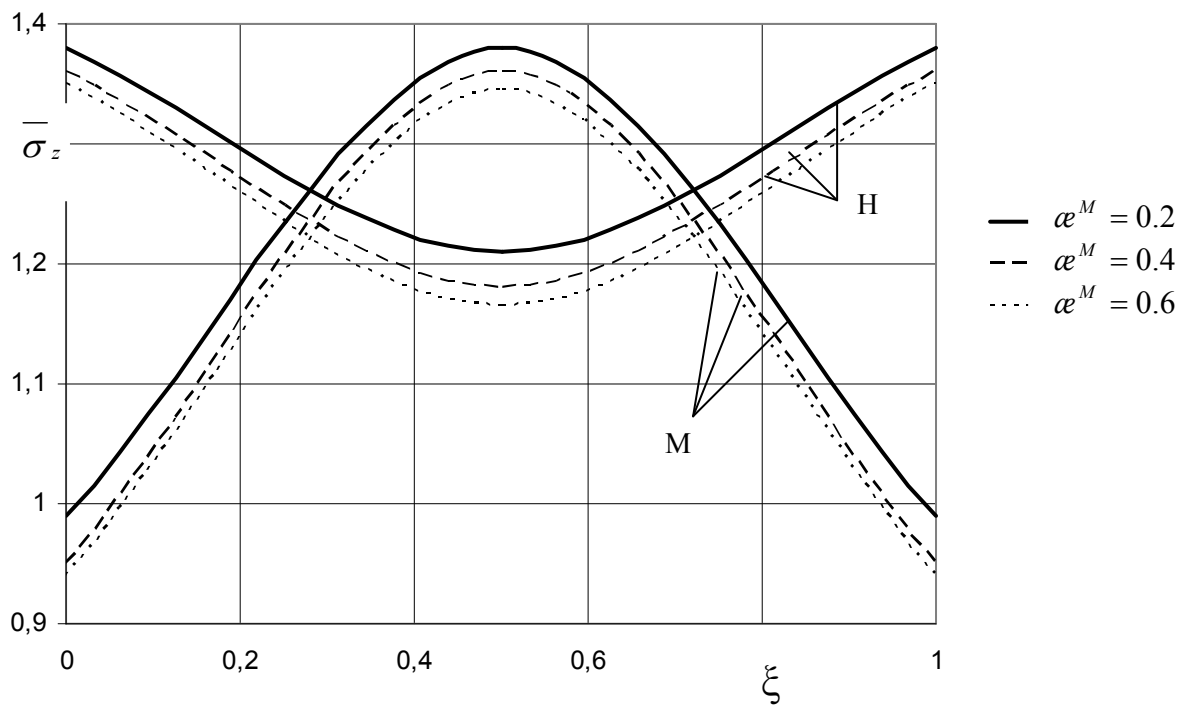
Priklausomai kintant santykiniam suvirintojo sujungimo deformavimo bazės ilgiui  $\bar{L}$ , deformacijos cilindrinėje koordinatėse sistemoje taip pat didėja (2.7 pav.).

Mechaniškai nevienalyčiuose sujungimuose metale M vyksta tempimo įtempimai, o metale H- gniuždymo įtempimai. Tai vyksta dėl to, kad tampriai plastiškai deformuojantis minkštesniam metalui M, jo deformacijas varžo kietesnis metalas H. Dėl to ties šių medžiagų kontakto plokštuma realizuojasi erdvinis įtempimų būvis.

Iš atliktų tyrimų galima daryti išvadą, jog virinant sujungimą su minkšta siūle reikia stengtis pasirinkti tokius suvirinimo parametrus: siulės aukštį išlaikyti artimą realiai –  $\alpha^M = 0.75$ , stengtis, kad kuo labiau sumažinti suvirinamojo sujungimo nevienalytiškumo koeficientą naudojant tinkamas suvirinimo technologijas, parenkant tinkamus metalus, nes didėjant nevienalytiškumo koeficientui  $\gamma_N$ , įtempimai bei deformacijos suvirintajame sujungime taip pat stipriai didėja, kas turi labai didelės įtakos sujungimo stiprumui bei ilgaamžiškumui. Taip pat nuo parinktų suvirintojo sujungimo metalų priklausys santykinis sujungimo deformavimo bazės ilgis,  $m^M_0$  charakteristika, kas taip pat turės didelios įtakos suvirintojo sujungimo stiprumui bei ilgaamžiškumui.



a

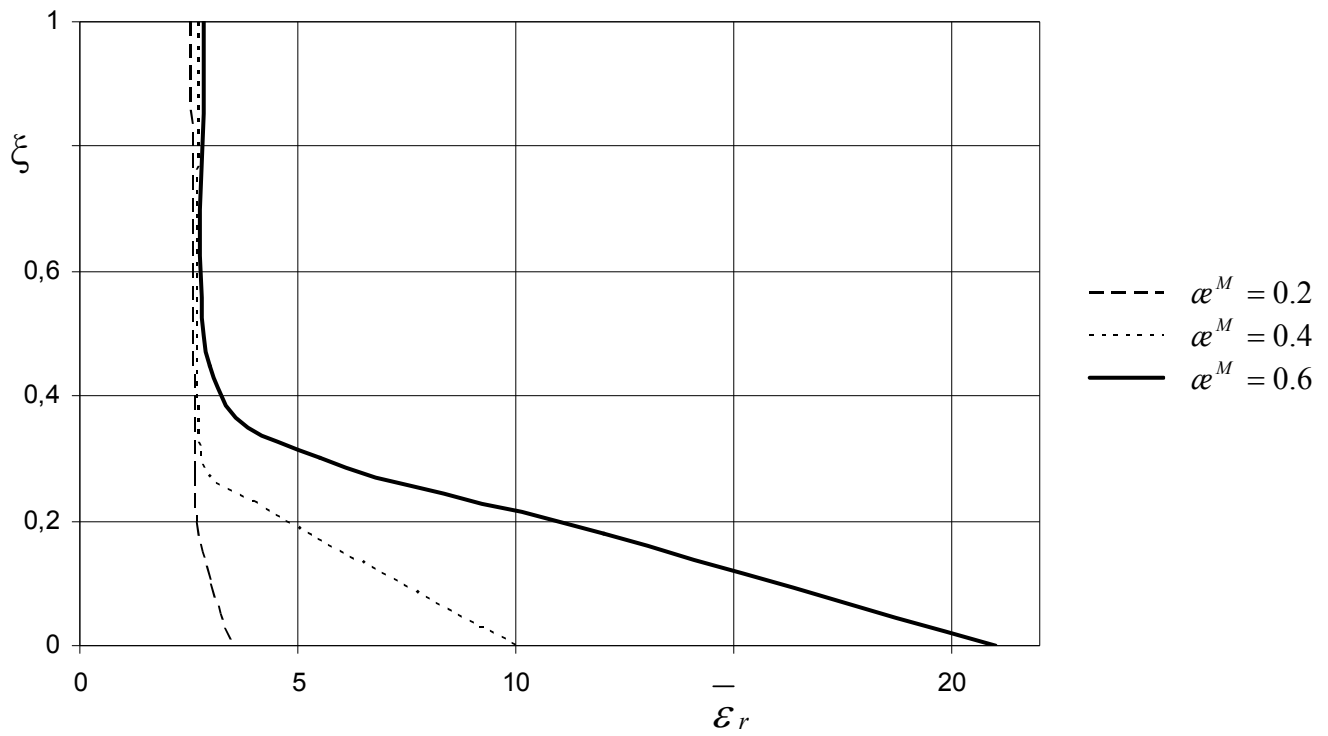


a

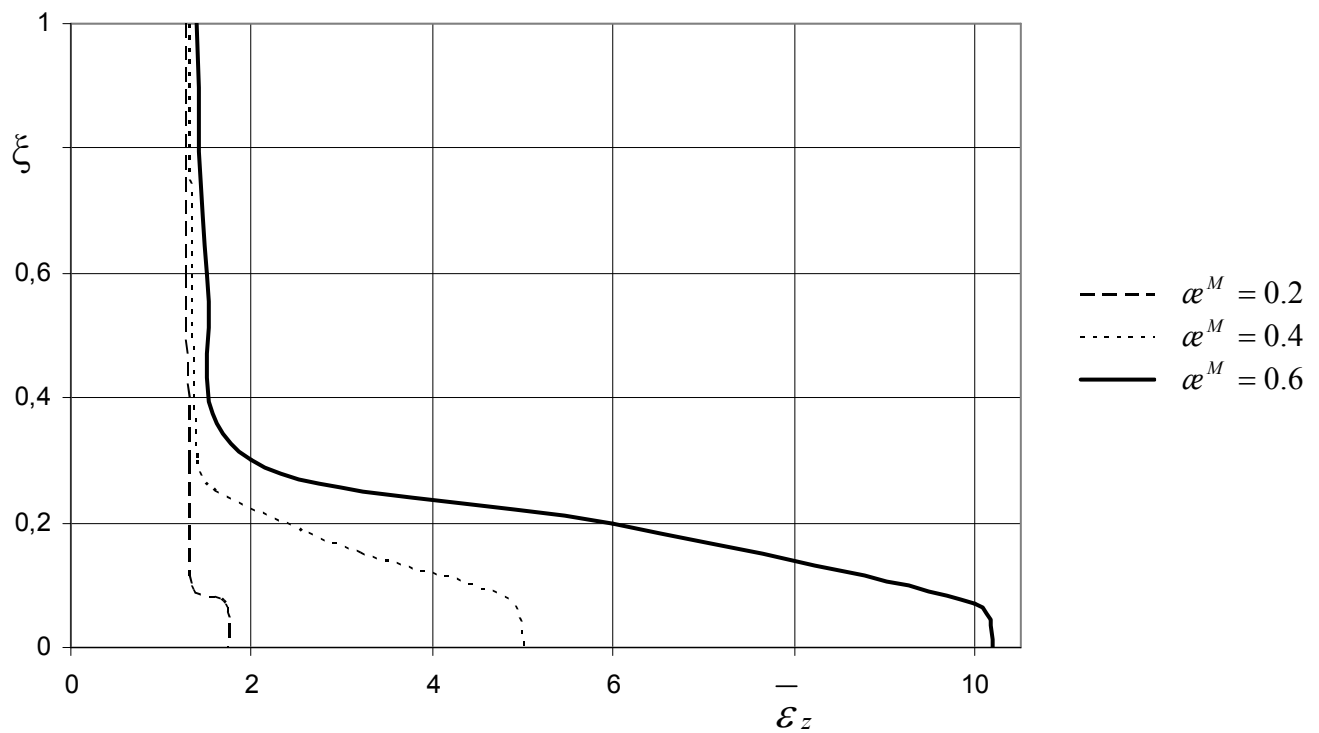
b

2.1 pav. Įtempimų pasiskirstymo priklausomybės nuo  $\alpha^M$ , kai  $\bar{L} = 5$ ,  $\rho_{in} = 10$ ,  $\gamma_N = 1.35$ .

Įtempimai siūlės medžiagoje M ir pagrindinėje medžiagoje H

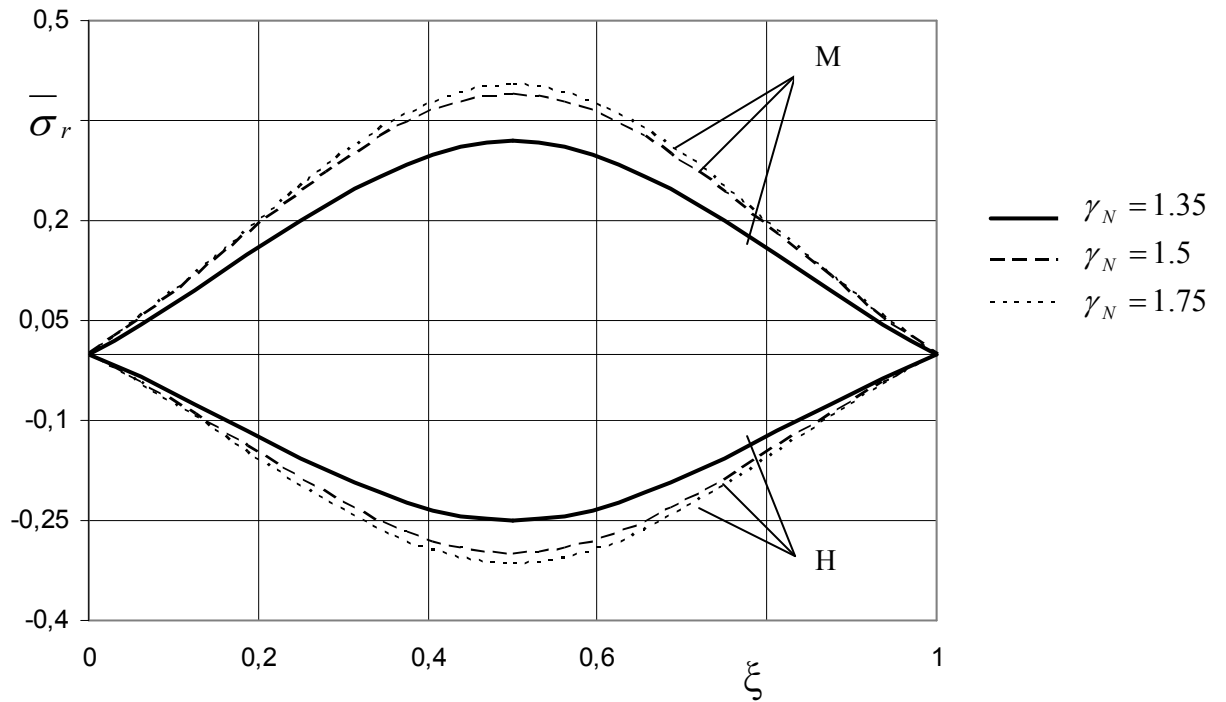


a

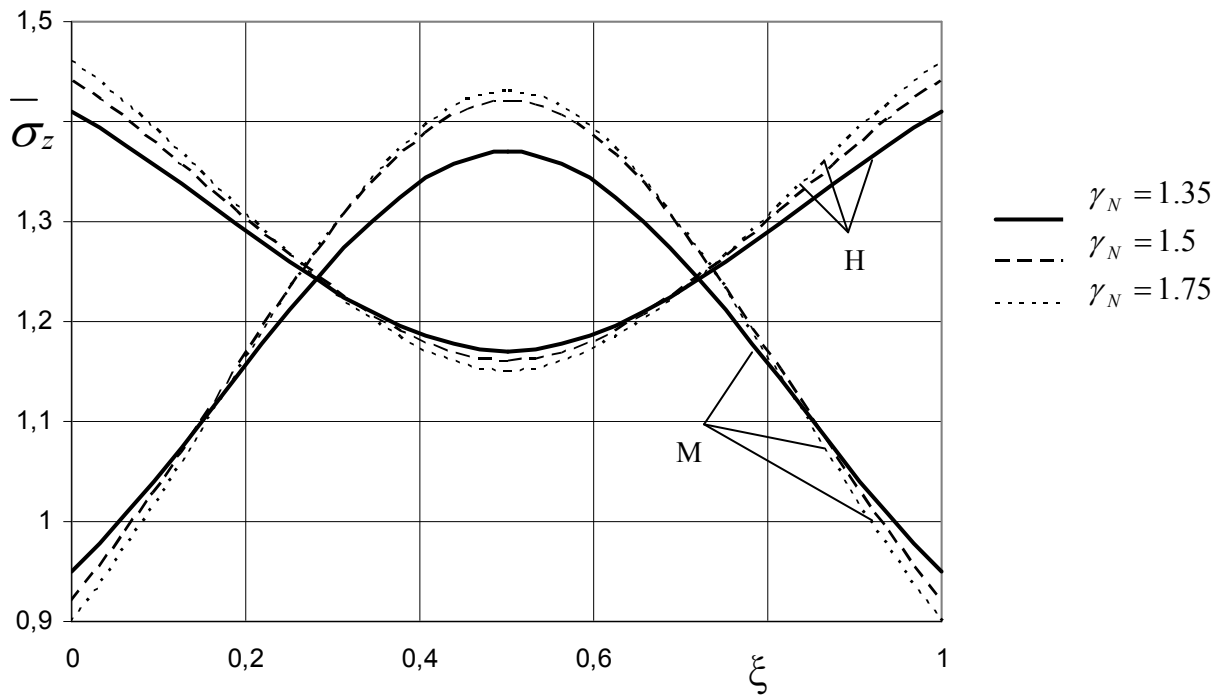


b

2.2 pav. Deformacijų pasiskirstymo priklausomybė nuo  $\alpha^M$ , kai  $\bar{L} = 5$ ,  $\rho_{in} = 10$ ,  $\gamma_N = 1.35$



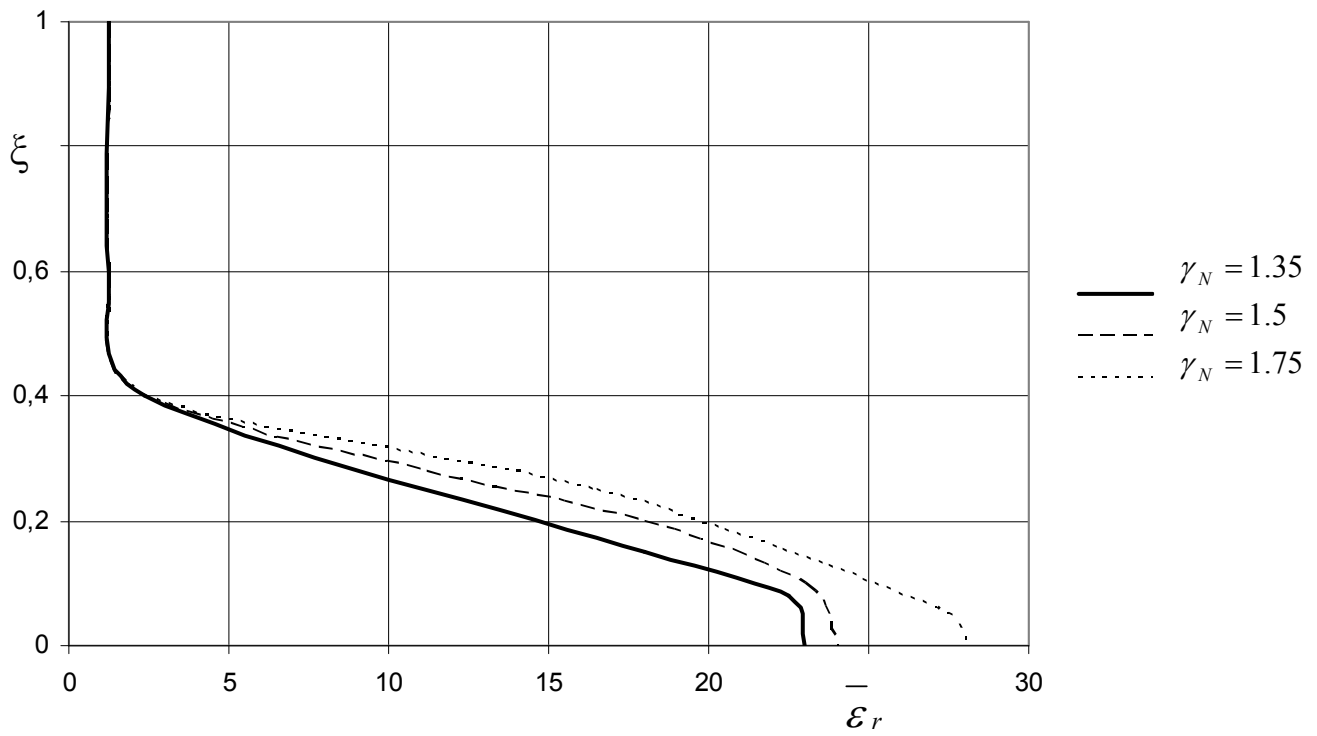
a



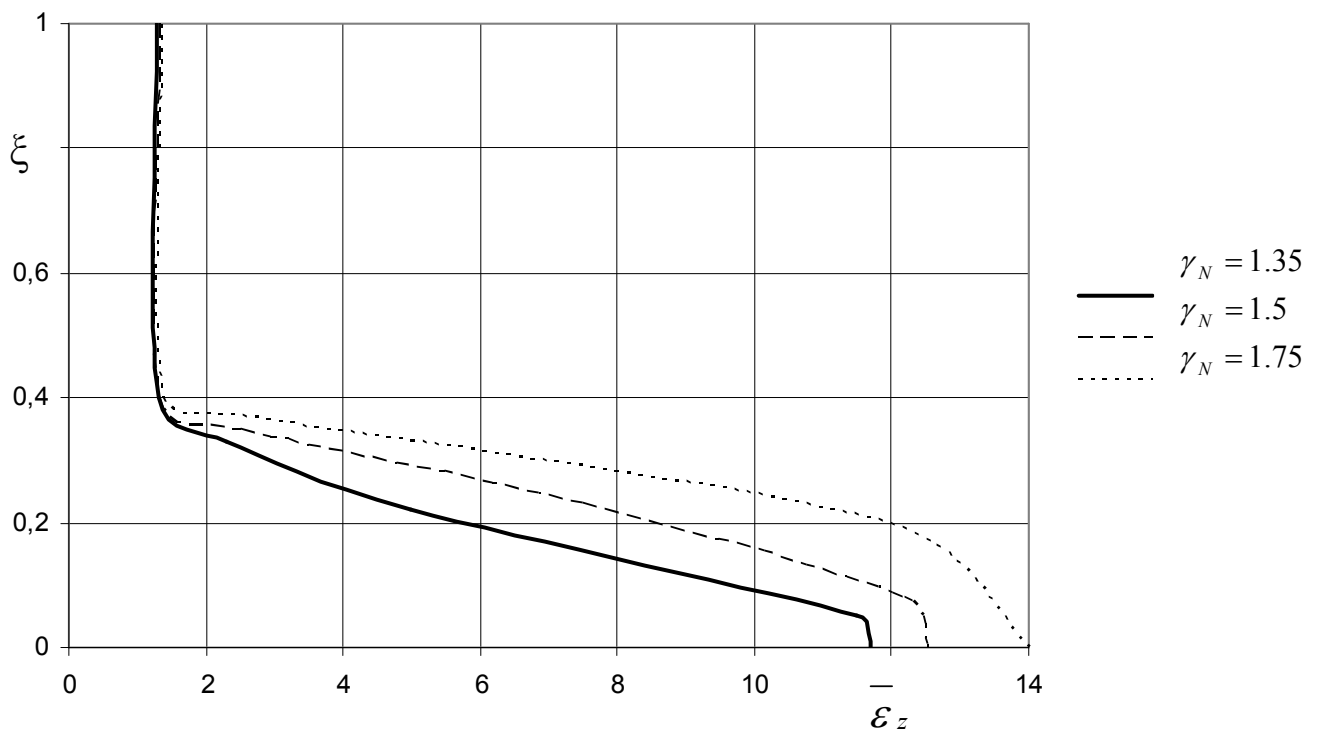
b

2.3 pav. Įtempimų pasiskirstymo priklausomybė nuo  $\gamma_N$ , kai  $\bar{L} = 5$ ,  $\rho_{in} = 10$ ,  $\alpha^M = 0.75$ .  
 Įtempimai siūlės medžiagoje M ir pagrindinėje medžiagoje H



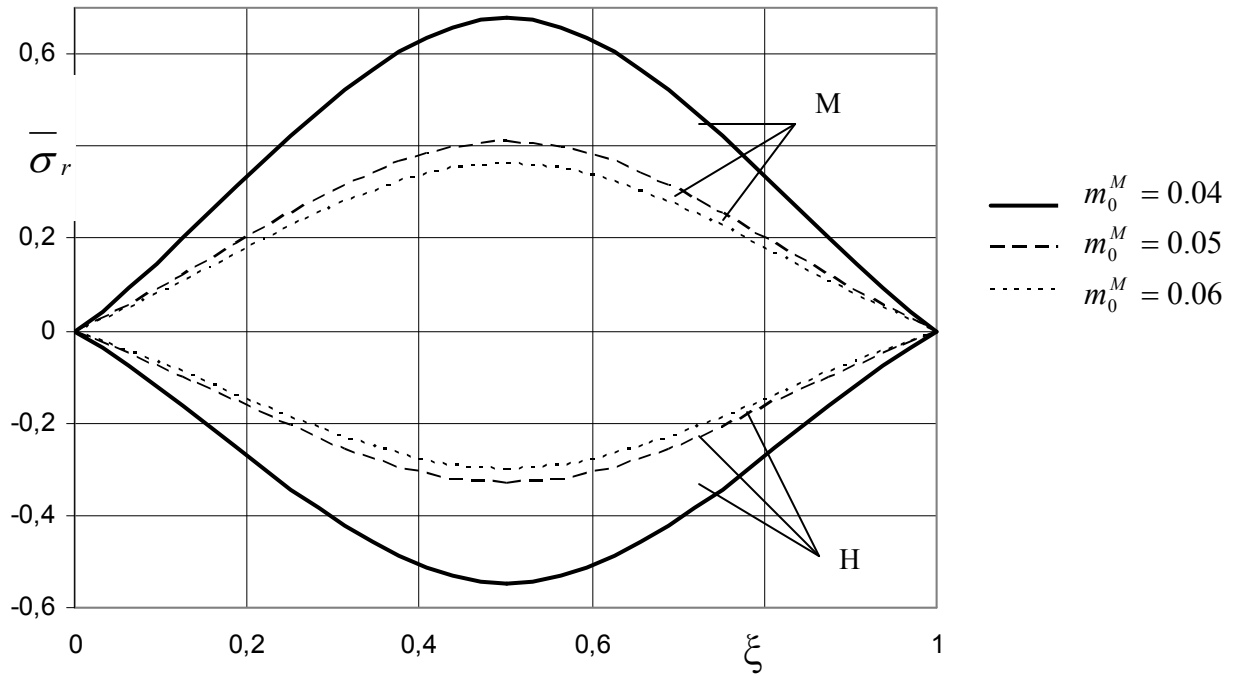


a

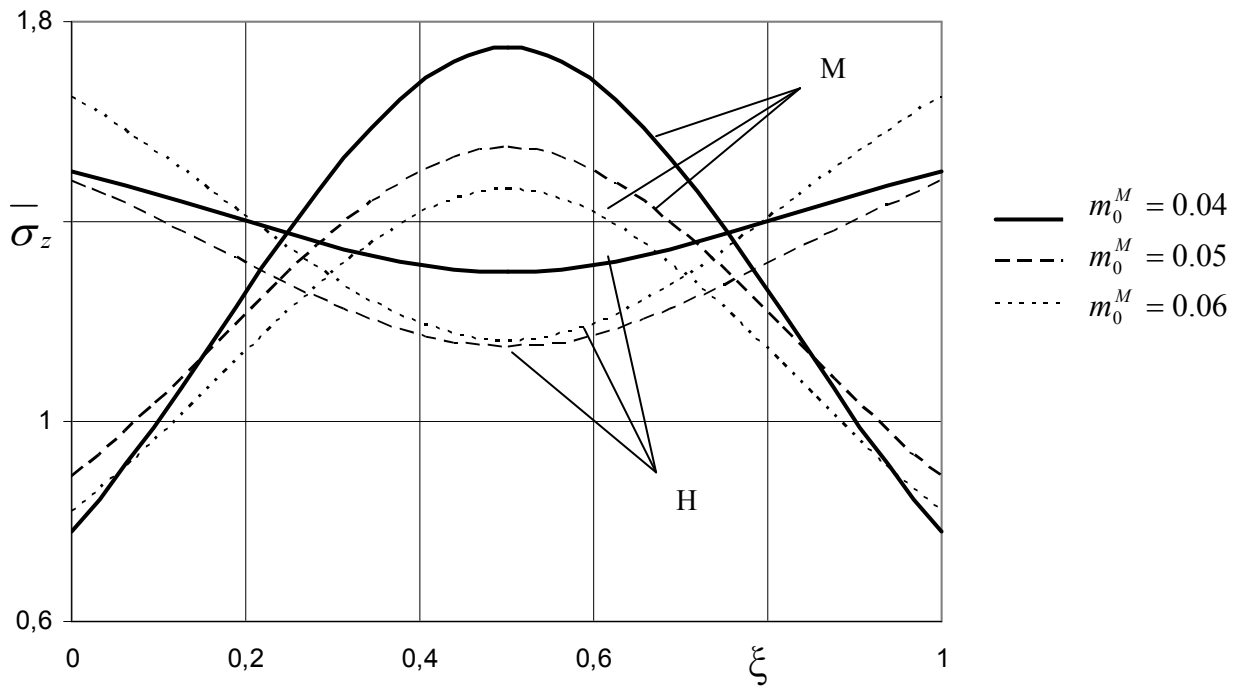


b

2.4 pav. Deformacijų pasiskirstymo priklausomybė nuo  $\gamma_N$ , kai  $\bar{L} = 5$ ,  $\rho_{in} = 10$ ,  $\alpha^M = 0.75$

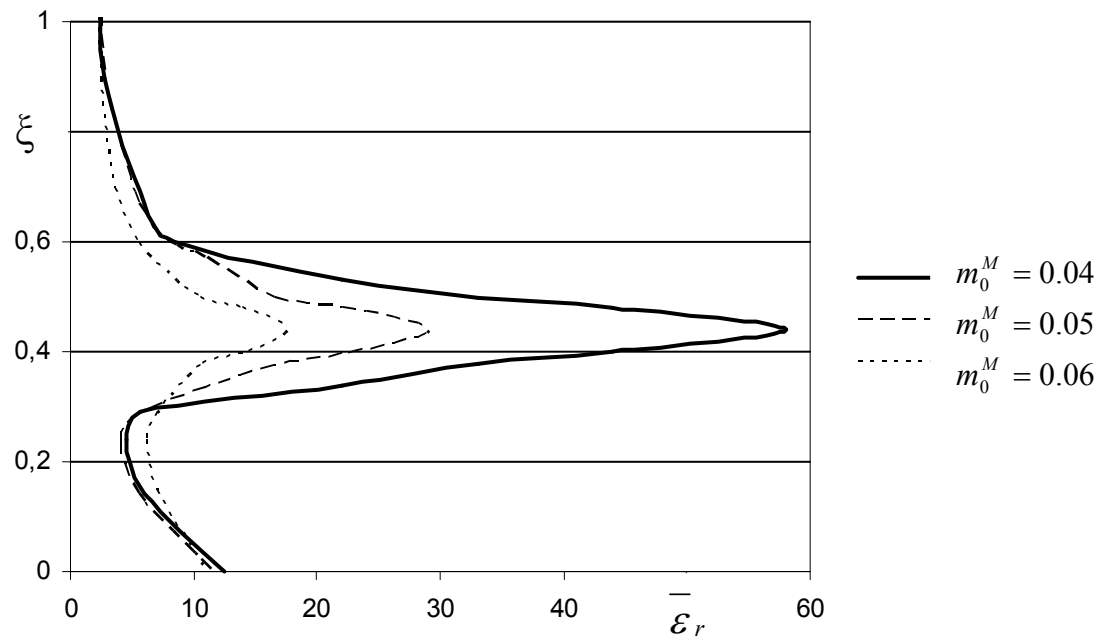


a

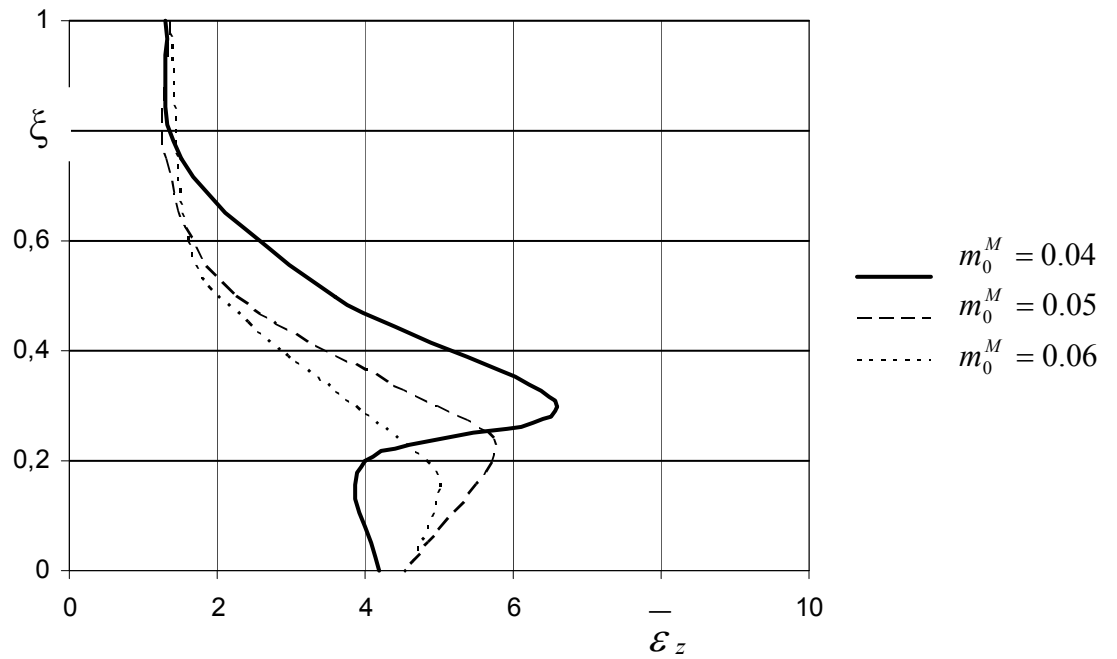


b

2.5 pav. Įtempimų pasiskirstymo priklausomybė nuo  $m_0^M$ , kai  $\bar{L} = 5$ ,  $\rho_{in} = 10$ ,  $\alpha^M = 0.75$ .  
 Įtempimai siūlės medžiagoje M ir pagrindinėje medžiagoje H

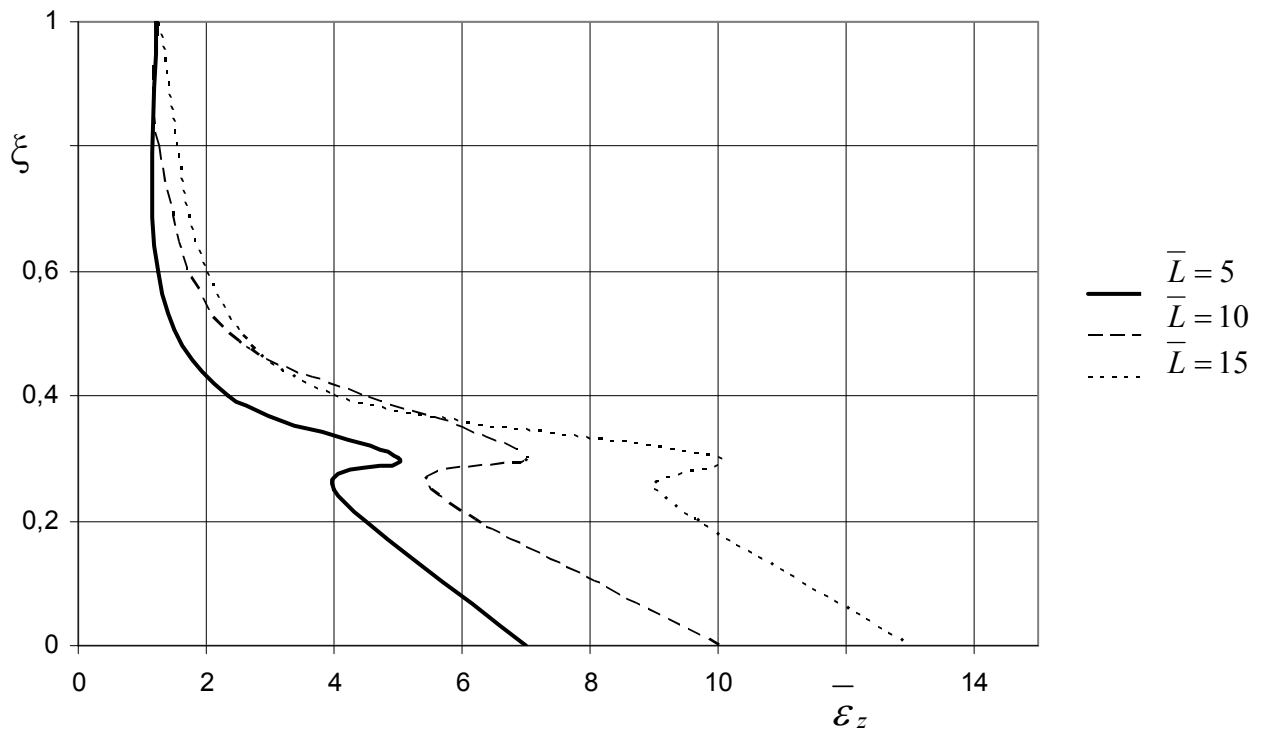


a



b

2.6 pav. Deformacijų pasiskirstymo priklausomybės nuo  $m_0^M$ , kai  $\bar{L} = 5$ ,  $\rho_{in} = 10$ ,  $\alpha^M = 0.75$



2.7 pav. Deformacijų pasiskirstymo priklausomybės nuo  $\bar{L}$ , kai  $\alpha^M = 0.75$ ,  $\rho_{in} = 10$ ,  $\alpha^M = 0.75$ ,  $\gamma_N = 1.35$

Iš 2.7 pav. matyti, jog didžiausios deformacijos kietoje medžiagoje H kyla ties kontakto plokštuma, o minkštoje medžiagoje M ties siūlės viduriu.

## IŠVADOS

1. Mechaniškai nevienalyčiuose suvirintuose sujungimuose su minkšta siūle tampriai plastškai deformuojantis minkštesniam metalui M, jo deformacijas varžo kietesnis metalas H. Dėl šių metalų tarpusavio sąveikos ties jų kontakto plokštuma realizuojasi erdvinis įtempimų būvis. Šioje zonoje metale M veikia tempimo, o metale H – gniuždymo įtempimai.
2. Tolstant nuo kontakto plokštumos įtempimų būvio erdviškumas mažėja.
3. Didėjant suvirintojo sujungimo siūlės aukščiui  $a^M$  deformacijos taip pat didėja, bet įtempimai mažėja. Norint sumažinti kylančius įtempimus, reikia siūlės aukštį didinti iki artimos realiai, kuri yra lygi 0,7 – 0,8. Renkantis siūlę plonesnę nei reali, įtempimai stipriai išauga ir pasiskirsto beveik tolygiai visame tarpsluoknyje.
4. Didėjant suvirintojo sujungimo mechaniniam nevienalytiškumui įtempimai bei deformacijos taip pat didėja. Kuo skirtingesni suvirintojo sujungimo metalai tuo pasireškia didenis mechaninis nevienalytiškumo koeficientas, kuris neigiamai įtakoja sujungimo stipruminius parametrus ir mažina ilgaamžiškumą.
5. Mažėjant medžiagos sustiprėjimo tampriai plastinėje zonoje charakteristikai  $m_0^M$  deformacijos ir įtempimai žymiai padidėja. Didžiausios deformacijos pastebimos kontakto plokštumoje.
6. Kuo didesnis deformacijos bazės ilgis  $\bar{L}$  tuo didesnės deformacijos kyla suvirintajame sujungime.

## LITERATŪRA

- [1] **Бакши О.А., Богомолова А.С.** Работоспособность сварных цилиндрических трок с кольцевой мягкой прослойкой. Механическая технология. Вильнюс, 1974, т. IX. с. 64 – 70.
- [2] **Bražėnas A.** Strength and Low Cycle Fatigue Life of Mechanically Heterogeneous Welded Joints. Summary of Thesis for Degree of dr. Habil. Engineering. Kaunas. 1994. – 50 p.
- [3] **Браженас А.П.** Сопротивление деформированию и разрушению сварных труб с кольцевой мягкой прослойкой. Механическая технология. Вильнюс, 1974, т. IX. с. 64-70.
- [4] **Bražėnas A., Daunys M.** The Stress Strain State and Plasticity of Mechanically Heterogeneous Welded joints with a Flat Interlayer Subjected to Tension (Compression). Mechanika. 1995, Nr. 1, p. 5 – 13.
- [5] **Махутов Н.А.** Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. Москва, 1981. – 272 с.
- [6] **Daunys M.** Ciklinis Konstrukcijų stiprumas ir Ilgaamžiškumas. Kaunas. 2005. 228 – 266 p.
- [7] **Vaičiulis D.,** Tempiamų (gniuždomų) mechaniškai nevienalyčių žiedinio skerspjūvio suvirintųjų sujungimų statinis ir ciklinis tampriai plastinis deformavimas ir suirimas. Daktaro disertacijos santrauka . 2001, Kauno technologijos universitetas.
- [8] **Bražėnas A., Vaičiulis D.,** Programa „Žiedas“. KTU Panevėžio institutas.