

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

TVIRTINU
Katedros vedėjas
_____ Z.Ramonas

2006 06

**TEMPIAMŲ SANDŪRINIŲ SUVIRINTŲJŲ JUNGČIŲ, SU
REALIA
PLOKŠČIA SIŪLE, ĮTEMPIMŲ DEFORMACIJŲ BŪVIS ESANT
PLOKŠTUMINEI DEFORMACIJAI**

MAGISTRO DARBAS

Recenzentas
_____Prof. habil.dr. J. Bareišis
A.Bražėnas

Darbo vadovas
_____Prof. habil.dr.

Darbą atliko
MM-4 gr. Magistrantas
_____ R. Lukošius

ŠIAULIAI 2006
ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Rolandas Lukošius

TEMPIAMŲ SANDŪRINIŲ SUVIRINTŲJŲ JUNGČIŲ, SU
REALIA
PLOKŠČIA SIŪLE, ĮTEMPIMŲ DEFORMACIJŲ BŪVIS ESANT
PLOKŠTUMINEI DEFORMACIJAI

MAGISTRO DARBAS

Darbo vadovas
Prof. habil.dr. A.Bražėnas

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	2
ĮVADAS.....	4
1. MINKŠTŲ IR KIETŲ TARPSLUOKSNIŲ ĮTAKOS SUVIRINTŲJŲ KONSTRUKCINIŲ ELEMENTŲ STIPRUMUI LITERATŪROS APŽVALGA.....	5
1.1. Sujungimų su minkštu tarpsluoksniu	5
1.2. Mechaninio nevienalytiškumo atsiradimo priežastys suvirintuose sujungimuose.....	5
1.3. Mechanškai nevienalyčių suvirintųjų sujungimų su plokščia siūle stiprumas	5
2. SUVIRINTOJO SUJUNGIMO SU SUPAPRASTINTU MINKŠTU TARPSLUOKSNIU ĮTEMPIMŲ IR DEFORMACIJŲ NUSTATYMAS.....	8
3. DEFORMACIJŲ BŪVIS SUVIRINTOSE JUNGTYSE SU PLOKŠČIA REALIA SIŪLE.....	13
4. ĮTEMPIMŲ IR DEFORMACIJŲ BŪVIO TYRIMAS.....	16
IŠVADOS IR PASIŪLIMAI.....	28
SUMMARY.....	29
LITERATŪROS SĄRAŠAS.....	30

PAVEIKSLU SAŽAŠAS

1	1.1 pav. Suvirintojo sujungimo su plokščiu minkštu tarp sluoksniu skaičiavimo schema esant plokščiai deformacijai ir įtempimų būvis kontakto plokštumoje. [2].....	7
2	2.1 pav. Suvirintojo sujungimo su plokščiu minkštu tarp sluoksniu įtempimų ir deformacijų skaičiavimo schema. [1].....	8
3	3.1 pav. Suvirintojo sujungimo su plokščia realia siūle skaičiavimo schema. [4].....	13
4	3.2 pav. Teorinio koncentracijos koeficiento α_{σ_i} priklausomybės nuo \bar{h}_{rfc} ir \bar{b}_{rf} . [4].....	16
5	3.3 pav. Deformacijų intensyvumo pasiskirstymas išilgai suvirintojo sujungimo su minkšta realia siūle.....	17
6	4.1 pav. Įtempimų $\bar{\tau}_{xy}^*$ pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle nuo nevienalytiškumo koeficiento γ_N	19
7	4.2 pav. Įtempimų $\bar{\tau}_{xy}^*$ pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle nuo santykinio siūlės aukščio a	20
8	4.3 pav. Įtempimų $\bar{\sigma}_x^M ir \sigma_x^H / \sigma_e^M$ pasiskirstymas (suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle) nuo nevienalytiškumo koeficiento γ_N	20
9	4.4 pav. Įtempimų $\bar{\sigma}_x^M ir \sigma_x^H / \sigma_e^M$ pasiskirstymas (suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle) nuo santykinio siūlės aukščio a	21
10	4.5 pav. Įtempimų $\bar{\sigma}_y^M ir \sigma_y^H / \sigma_e^M$ pasiskirstymas (suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle) nuo nevienalytiškumo koeficiento γ_N	22
11	4.6 pav. Įtempimų $\bar{\sigma}_y^M ir \sigma_y^H / \sigma_e^M$ pasiskirstymas (suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle) nuo santykinio siūlės aukščio a	22
12	4.7 pav. Deformacijų $\varepsilon_y^M / \varepsilon_e^M$ pasiskirstymas (suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle) nuo nevienalytiškumo koeficiento γ_N	23
13	4.8 pav. . Deformacijų $\varepsilon_i^H / \varepsilon_e^M$ pasiskirstymas (suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle) nuo nevienalytiškumo koeficiento γ_N	24
14	4.9 pav. . Deformacijų $\bar{\varepsilon}_i^M$ pasiskirstymas (suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle) nuo nevienalytiškumo koeficiento γ_N	24
15	4.10 pav. Įtempimų intensyvumo $\sigma_i^{H*} / \sigma_e^M$ pasiskirstymas (suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle) nuo nevienalytiškumo koeficiento γ_N	25

16	4.11 pav. Deformacijų $\varepsilon_i^M / \varepsilon_e^M$ pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle išilgai y ašies, nuo santykinio siūlės aukščio a	26
17	4.12 pav. Deformacijų $\varepsilon_i^M / \varepsilon_e^M$ pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle išilgai y ašies, nuo minkštos medžiagos sustiprėjimo charakteristikos m_0^M	26
18	4.13 pav. Deformacijų ε_y pasiskirstymas išilgai suvirinto sujungimo su minkšta realia siūle nuo rumbelės aukščio \bar{h}_{rfc}	27
19	4.14 pav. Deformacijų intensyvumo $\varepsilon_i^M / \varepsilon_e^M$ pasiskirstymas išilgai suvirintojo sujungimo su minkšta siūle nuo deformacijos bazės ilgio L	28
20	4.15 pav. Deformacijų $\varepsilon_y^M / \varepsilon_e^M$ pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle išilgai y ašies, kai $\xi = 0, 0.5, 1$	28

SUMMARY

Lukošiūnas R. State of strains in stretched joint weldments with real plain joint, when deformation is planar : 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.

At present in the production of machines, energetic, building, ship industry welded joints are widely used. They are mostly in the concentration zones of the important constructions, where frequently during the work the proportional limits of materials are exceeded and there static or cyclic elasto-plastic strain appears. Therefore the research of welded joints, as constructional elements, estimating its constructional, technological and exploitation characteristics, has a particular importance. This work is devoted to analyse stress strain state of mechanically heterogeneous welded joints with mild plane weld in case of plain strain.

In the first chapter there is a review of works about mechanically heterogeneous welded joints. It describes peculiarities of various welded joint's forms, unsymmetrical heterogeneously and differences between mild and hard welds.

The second chapter presents analysis of stress strain state in mild weld (interlayer). The analysis showed, when the thickness of mild weld (interlayer) X increases, then the spatial character of stress and strain state also increases. Accordingly decreases the statically strength of the welded joint. Besides, when the coefficient of mechanical heterogeneity increases, then the spatial character of stress and strain state increases too. When the thickness of mild weld (interlayer) α is small, then the maximum intensity of stresses is on the side ($\xi = 1$) of contact plane of welded joint. The maximum intensity of stresses is in the centre of mild weld (interlayer) for $\alpha > 0.3$

Dependencies for the calculation of strain intensity in the most heavily loaded zones of welded joint with the real mild and hard weld are obtained in this paper. The optimum relative height of mild weld reinforcement is obtained from equality of strain intensities in central cross-section and stress concentration zone (initial point of reinforcement). The hard weld reinforcement increase strain intensity in the most heavily loaded zones of welded joint.

IVADAS

Šiuo metu mašinų gamyboje, energetikoje, metalurgijoje, statyboje, laivų pramonėje plačiai taikomi suvirintieji sujungimai, kurie daugeliu atvejų yra atsakingų konstrukcijų koncentracijos zonose, kuriose labai dažnai darbo metu yra viršijamos medžiagų proporcingumo ribos ir prasideda statinis arba ciklinis tampriai plastinis deformavimas. Todėl suvirintojo sujungimo, kaip konstrukcinio elemento (įvertinant jo konstrukcinius, technologinius ir eksploatacinius ypatumus) tyrimas turi išskirtinę reikšmę.

Daugumai suvirintųjų sujungimų atskirų zonų (pagrindinio ir siūlės metalų) deformavimo diagramos skiriasi, todėl suvirintiesiems sujungimams charakteringas didesnis ar mažesnis mechaninis nevienalytiškumas, t.y. suvirintajame sujungime yra zonos su mažesnėmis arba didesnėmis stiprumo mechaninėmis charakteristikomis palyginus su pagrindiniu metalu ir silpnesnėje zonoje pradeda kauptis plastinės deformacijos. Mechaninis nevienalytiškumas gaunamas naudojant atitinkamą suvirinimo technologiją, o taip pat gali atsirasti eksploataavimo metu, dėl skirtingų suvirintojo sujungimo metalų atskirų zonų ciklinių savybių (pavyzdžiui, cikliškai silpnėjant siūlės metalui ir cikliškai stiprėjant pagrindiniam metalui arba atvirkščiai). Dažnai mechaninis nevienalytiškumas atsiranda dėl skirtingų suvirintojo sujungimo atskirų metalų zonų ciklinių savybių priklausomybės nuo temperatūros, o taip pat nuo deformacinio senėjimo ir kitų faktorių. Norint jį sumažinti būtina taip parinkti pagrindinio ir siūlės metalų medžiagas, suvirinimo technologiją ir terminį apdirbimą, kad suvirintojo sujungimo medžiagų deformavimo diagramos mažai skirtųsi esant mažacikliam apkrovimui. Šis uždavinys labai sunkiai įvykdomas, todėl didesnis ar mažesnis mechaninis nevienalytiškumas suvirintajame sujungime visada bus ir turės nemažą įtaką sujungimo stiprumui ir ilgaamžiškumui. Ši problema yra palyginus nauja, nes atsirado kartu su suvirintųjų sujungimų įvertinimu esant mažacikliam apkrovimui.

Mechaniškai nevienalyčiuose suvirintuosiuose sujungimuose, dėl atskirų zonų tarpusavio sąveikos ties kieto H (hard) ir minkšto M (mild) metalų kontakto plokštuma (susilydymo linija), minkšto metalo tampriai plastinės deformacijos yra varžomos metalo H, todėl šioje zonoje susidaro erdvinis įtempimų būvis. Tolstant nuo kontakto plokštumos, įtempimų būvio erdviškumas abiejose medžiagose mažėja. Todėl deformacijų pasiskirstymas atskirose suvirintojo sujungimo zonose esti nevienodas. Nuo sujungimo mechaninio nevienalytiškumo laipsnio, minkšto tarp sluoksnio storio, ciklinių medžiagų savybių priklauso suvirintojo sujungimo statinis ir ciklinis stiprumas. Minkštų ir kietų tarp sluoksnių įtaka suvirintųjų sujungimų statiniam ir cikliniam stiprumui nagrinėta A. Bražėno, M. Daunio, L. Kačianovo, O. Bakši, N. Machutovo, G. Neiberio, B. Timofejevo, A. Šatovo, A. Gurjevo, J. Abitkovskio, ir kituose darbuose.

Teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad, esant statiniam ir mažacikliniam deformavimui, minkšti tarp sluoksniai turi didesnę įtaką suvirintojo sujungimo stiprumui negu kieti.

Taigi, labai yra aktualu nustatyti mechaniškai nevienalyčių suvirintųjų sujungimų įtempimų ir deformacijų būvį bei stiprumą atsižvelgiant į atskirų zonų metalų tarpusavio sąveiką.

Šiame darbe įtempimų ir deformacijų būvis suvirintajame sujungime su minkšta plokščia reale siūle nagrinėjamas pagal plastiškumo teoriją. Taip pat analizuojama įtempimų ir deformacijų būvio priklausomybė nuo suvirintojo sujungimo medžiagų mechaninių charakteristikų, siūlės (tarp sluoksnio) storio ir mechaninio nevienalytiškumo koeficiento, rumbelės dydžio, jos užapvalinimo spindulio.

1. MINKŠTŲ IR KIETŲ TARPSLUOKSNIŲ ĮTAKOS SUVIRINTŲJŲ KONSTRUKCINIŲ ELEMENTŲ STIPRUMUI LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Sujungimai su minkštu tarp sluoksniu

Suvirintųjų sujungimų mechaninio nevienalytiškumo teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai pateikti darbuose [3, 5, 6]. Šiais tyrimais nustatyta, kad sritys su sumažintomis stiprumo charakteristikomis (minkštas tarp sluoksniu) turi didelę įtaką suvirinto sujungimo stiprumui ir priklauso nuo mechaninio nevienalytiškumo laipsnio ir tarp sluoksnio storio. Tokiais tarp sluoksniais gali būti siūlė su sumažinta takumo riba, palyginus su pagrindiniu metalu, difuziniai tarp sluoksniai ir pan..

1.2. Mechaninio nevienalytiškumo atsiradimo priežastys suvirintuosiuose sujungimuose

Dažnai mechaninis nevienalytiškumas atsiranda dėl pagrindinio metalo zonų, esančių ties susilydymo linija intensyvaus temperatūrinio poveikio (suvirinimo metu susidaro terminio poveikio zonos). Suvirinant termiškai sustiprintus metalus terminio poveikio zonos yra minkštesnės už pagrindinį metalą. Suvirinant didesnio anglingumo legiruotus plienus - dėl intensyvaus šilumos nuvedimo metalo struktūra artima grūdintai. Todėl šios zonos metalas yra kietesnis už pagrindinį. Reikia pažymėti, kad terminio poveikio zonoje metalo struktūra dėl jo perkaitinimo yra stambiagrūdė ir pasižymi blogesnėmis mechaninėmis savybėmis.

Dažnai technologiniais sumetimais naudojami austenitinių ir perlitinių plienų arba perlitinio pagrindinio metalo su austenitine siūle suvirintieji sujungimai. Termiškai sustiprinto plieno sujungime su austenitine siūle susidaro kelios skirtingos stiprumo zonos.

Aukštesnėse temperatūrose mechaninis nevienalytiškumas gali atsirasti dėl atskirų sujungimo zonų skirtingos mechaninių savybių priklausomybės nuo temperatūros arba senėjimo reiškinių.

Įtempimų koncentracijos zonose, vykstant tampriai plastiniam deformavimui, mechaninis nevienalytiškumas gali atsirasti dėl atskirų suvirintojo sujungimo zonų metalų skirtingų ciklinių savybių, pvz., cikliška stiprėjant vienos zonos medžiagai, o kitos - silpnėjant. Naudojant suvirinimo medžiagas, pagamintas iš lydinių su dideliu nikelio ir molibdeno kiekiu (Cb-04X4H70MI2r6T), esant tampriai plastiniam deformavimui ir intensyviai stiprėjant siūlės medžiagai, siūlė iš minkštos pradinėje deformavimo stadijoje po tam tikro apkrovimo pusciklių skaičiaus tampa kieta.

1.3. Mechaniškai nevienalyčių suvirintųjų sujungimų su plokščia siūle stiprumas

Sandūrinė siūlė naudojama kontaktinio, elektrošlakinio ir kitais suvirinimo atvejais, kai siūlės metalas užpildo plokščią plyšį tarp dviejų sujungiamų elementų.

Pirmieji mechaniškai nevienalyčių suvirintųjų sujungimų analitiniai tyrimai buvo atlikti slydimo linijų metodu. Suvirintojo sujungimo su minkštu tarp sluoksniu įtempimų įvertinimui buvo panaudotas L. Prandtlis (L. Prandtl) uždavinys apie begalinės plokštės susodinimą tarp dviejų šiurkščių absoliučiai standžių plytų [6].

Daug teorinių ir eksperimentinių tyrimų atliko Čeliabinsko politechnikos instituto kolektyvas, vadovaujamas A. Bakši [6]. Pirmieji analitiniai sprendimai buvo gauti inžinerinės plastiškumo teorijos metodais laikant, kad suvirintasis sujungimas su minkštu tarp sluoksniu suyra, kai kieto metalo H ir minkšto metalo M kontakto plokštumoje tangentiniai įtempimai pasiekia takumo ribą τ_{yt} . Šiuo atveju metalas H

laikomas absoliučiai standžiu, 0 metalas M idealiai tampriai plastišku [5]. Minkštame metalė normaliniai įtempimai yra tempimo, o kietame gniuždymo (1.1 pav.).

Tiksliu šį uždavinį esant plokščiai deformacijai, santykinėse koordinatėse $\xi = x/l$ ir $\eta=y/l$ (1.1 pav.) išsprendė L. Kačianovas [10], išnagrinėjęs plono tarp sluoksnio $a^M \ll 1$

($a^M = h/l$ - tarp sluoksnio santykinis aukštis) įtempimų ir deformacijų būvį, kai pagrindinis metalas

yra idealiai tamprus. Sprendžiant šį uždavinį buvo priimta:

· medžiagos nesuspaudžiamos nei esant tampriam, nei tampriai plastiniam deformavimui ($v^M = v^H = 0.5$);

· abiejų medžiagų tamprumo moduliai yra lygūs $E^M = E^H = E$;

· nėra liekamųjų suvirinimo įtempimų;

· galioja plokščiųjų pjūvių hipotezė;

· minkštas metalas M neveikia kieto metalo H ($\sigma^H = 0$)

Priėmus aukščiau išvardintas prielaidas gautos šios minkšto metalo įtempimų išraiškos:

$$\tau_{xy}^{M*} = \pm \left[\frac{\sigma_y^b}{\sqrt{3}} \frac{1 - \bar{E}_T^M}{\sqrt{1 + C^{M*2} \xi^2}} \xi + \frac{2}{3} E_T^M \frac{v'(a^M)}{l} C^{M*} \xi \right] \quad (1.1)$$

$$\sigma_x^M = \frac{1}{a} \int_{\xi}^1 \tau_{xy}^{M*}(\xi) d\xi + \beta, \quad (1.2)$$

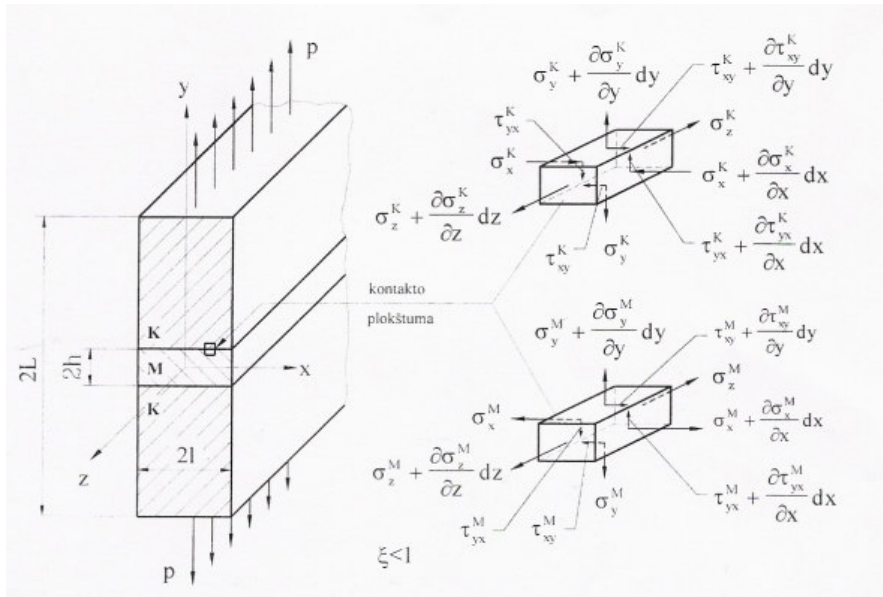
$$\sigma_y^M = \sigma_x^M + \frac{2\tau_{xy}^M(\xi)}{C^{M*} \xi}. \quad (1.3)$$

Esant linijinei deformavimo diagramos aproksimacijai, kai įvertinamas minkšto metalo sustiprėjimo modulis tampriai plastinėje zonoje, t.y. $E^M > 0$, nustatyti įtempimų būvį yra sudėtinga. Suvirintojo sujungimo su minkštu tarp sluoksniu stiprumas

$$P_{ut} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{yt}^M \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{4a^M} \right) \quad (1.4)$$

buvo nustatytas priimant $E_T^M = 0$ [10]. Analogiškai minkšto tarp sluoksnio įtempimų būvį ašiai simetrinei deformacijai nustatė O.A. Bakši [3]. Šiame sprendime, priėmus $\sigma_\phi = \sigma_r$ ir $E_T^M = 0$, gautas minkšto tarp sluoksnio stiprumas

$$P_{ut} = \sigma_{yt}^M \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{3\sqrt{3}a^M} \right) \quad (1.5)$$



1.1 pav. Suvirintojo sujungimo su plokščiu minkštu tarp sluoksniu skaičiavimo schema esant plokščiai deformacijai ir įtempimų būvis kontakto plokštumos srityje.

Tyrimai parodė, kad priklausomybė (1.4), kai suvirinto lakšto B ir storio 2l santykis $B/(2l) > 5-6$ ir $\sigma^M > \sigma_{\min}^M$, žymėi geriau atitinka eksperimentinius duomenis, nei (1.5).

Bet šios formulės yra gautos neįvertinant minkštos medžiagos sustiprėjimo tampriai plastinėje zonoje.

Patikslinimai buvo padaryti M.Daunio ir A.Bražėno [11] darbe, kuriame suirimo įtempimai (esant plokščiajai deformacijai) išreikšti priklausomybe:

$$p_{ut} = \frac{\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{ut}^M}{1 - \frac{f_2(0)[\gamma_N - 1]}{f_2(\alpha_K) + \gamma_N \left[f_2(\alpha) - \frac{1}{2} D \right]}} \quad (1.6)$$

čia $p_{ut} = \sigma_{ut}^M K_f K_a$

čia K_f – formos koeficientas, įvertinantis stiprumo padidėjimą dėl įtempimų krūvio erdviškumo pagrindiniame metalo H. Plokštuminei deformacijai $K_f = \frac{2}{\sqrt{3}}$.

K_a – kontaktinio sustiprėjimo koeficientas.

σ_{ut}^M – minkšto metalo stiprumo riba tempiant.

Tyrimais nustatyta, kad K_a priklauso nuo α , γ_N , bet nepriklauso nuo suvirintojo sujungimo skerspjūvio formos.

Priklausomybė (1.6), įvertinanti minkšto tarp sluoksniu medžiagos įtempimų persiskirstymą, geriau tenkina eksperimentinius duomenis ypač, kai $\alpha < 0,2$, nei (1.3), kuri patenkinamai aprašo eksperimentiniu rezultatus tik, kai $0,2 < \alpha < 0,8$.

2. SUVIRINTOJO SUJUNGIMO SU SUPAPRASTINTU MINKŠTU TARPSLUOKSNIU ĮTEMPIMŲ IR DEFORMACIJŲ NUSTATYMAS

Minkštą tarp sluoksniu įtempimų būvį inžinerinės plastiškumo teorijos metodais nagrinėjo B. Bakši ir R. Šron. Šiame sprendinyje pagrindinis metalas laikomas absoliučiai standžiu, o sujungimas suyra, kai tangentiniai įtempimai kontakto plokštumoje pasiekia takumo ribą. Tiksliau šį uždavinį plonam minkštam tarp sluoksniui išsprendė L. Kačanov. Šiame sprendime pagrindinis metalas H laikomas idealiai tampriu, abiejų medžiagų tamprumo moduliai yra lygūs $E^H = E^M = E$, medžiaga yra nesuspaudžiama nei esant tampriai, nei tampriai plastinei deformacijai ($\nu^M = \nu^H = 0.5$).

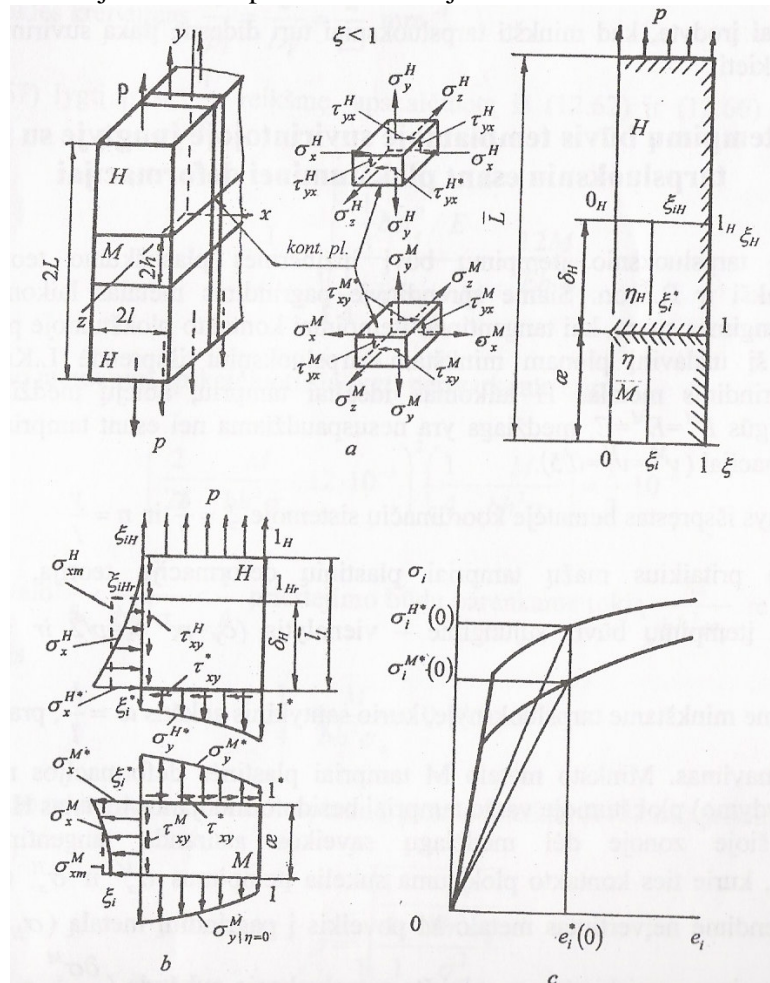
Uždavinys išspręstas bematėje koordinatinių sistemoje $\xi = \frac{x}{l}$ ir $\eta = \frac{y}{l}$ (2.1. pav., a)

pritaikius mažų tampriai plastinių deformacijų teoriją. Kai $\nu = 0.5$ ir $p = \frac{F}{A} \leq 2 \frac{\sigma_e^H}{\sqrt{3}}$; įtempimų

būvis sujungime – vienalytis ($\sigma_y = p; \sigma_z = p/2; \tau_{xy} = \sigma_x = 0$). Kai $p > 2 \frac{\sigma_e^M}{\sqrt{3}}$ visame

minkštame tarp sluoksnyje, kurio santykinis aukštis $\alpha = \frac{h}{l}$, prasideda tampriai pastinis

deformavimas. Minkšto metalo M tampriai plastinės deformacijos metalų M ir H kontakto (susilydimo) plokštumoje varžo tampriai besiformuojantis metalas H.



2.1 pav.

Žvaigždute „*“ pažymėti dydžiai esantys metalų M ir K kontakto plokštumoje. Todėl šioje zonoje dėl medžiagų sąveikos atsiranda tangentiniai įtempimai $\tau_{xy}^* = \tau_{xy}^{H*} = \tau_{xy}^{M*}$, kurie ties kontakto plokštuma sukelia įtempimus σ_x^M ir σ_x^H (2.1 pav., a). L. Kačianov sprendime neįvertinamas metalo M poveikis į pagrindinį metalą ($\sigma_H = 0$). Ši prielaida yra priimta plonam tarp sluoksniui, tačiau visai netinka realioms siūlėms ($\alpha > 0.6 \dots 0.75$). Šiose siūlėse, tolstant nuo kontakto plokštumos, mažėja metalų M ir H tarpusavio sąveika, o kartu ir įtempimai σ_x^M ir σ_x^H .

Be to, minkštas metalas tampriai plastinėje zonoje priimtas idealiai plastiškas. Todėl šis sprendimas tinka apytikriam sujungimų stiprumui įvertinti. Vidutinis įtempimas, atitinkantis sujungimo su minkštu tarp sluoksniu stiprumą

$$p_{ut} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e^M \left(\frac{\pi}{4} + \frac{1}{4\alpha^M} \right). \quad (2.1)$$

Kadangi (2.1) gauta iš pagrindinio metalo H idealaus tamprumo prielaidos, $p = \infty$, kai $\alpha = 0$. realioms sujungimams su minkštu tarp sluoksniu ją galima taikyti tarp sluoksniams, kurių α_{\min} nustatomas iš sąlygos, kad $p_{\max} \leq 2 \frac{\sigma_{ut}^H}{\sqrt{3}}$.

Kadangi minkšto metalo deformacijos kontakto plokštumoje lemia kietas metalas, pradžioje nagrinėsime jo įtempimų krūvį ties kontakto plokštuma. Kieto metalo H koordinatinių sistemos $\eta_H, 0_H, \xi$ pradžia O_H pasirenkame pjūvyje nuo kontakto plokštumos nutolusiame dydžiu δ_H (2.1 pav., b). Šiame pjūvyje išnyksta metalų M ir H tarpusavio sąveika $\sigma_x^H = \tau_{xy}^H = 0$. Metalo H tampruosius įtempimus kontakto plokštumoje galima apskaičiuoti iš sąlygos, kad įtempimų ir deformacijų vektoriai išlieka tie patys, išreiškiamos priklausomybe:

$$\frac{\sigma_y - \sigma_x}{\varepsilon_y - \varepsilon_x} = 2 \frac{\tau_{xy}}{\gamma_{xy}}. \quad (2.1)$$

Į ją įtašę iš [] knygos (4.16), (4.19) ir (4.20) ir pritaikę plokščią hipotezę, gauname:

$$\tau_{xy}^{H*} = \frac{2}{3} E \varepsilon_y^* C_H^* \xi = p C_p^* \xi \quad (2.2)$$

Čia $p C_p^*$ – tangentinių įtempimų parametras.

Vidutinis kieto metalo skersinis įtempimas ties kontakto plokštuma gali būti apskaičiuotas iš integralinės pusiausvyros sąlygos (2.1 pav., b)

$$\sigma_{xm}^H = -\frac{1}{\delta_H} \int_0^{\xi} \tau_{xy}^* d\xi = -\frac{1}{2} p C_p^* (1 - \xi^2). \quad (2.3)$$

Įtempimų σ_x^H bet kuriame skerspjūvyje $\eta = \text{const}$ patogiau apskaičiuoti įvertinus jo pasiskirstymo funkciją $f_1(\eta_H)$ ir σ_x^{H*} reikšmę kontakto plokštumoje: $\sigma_x^H = f_1(\eta_H) \sigma_x^{H*}$. (2.4)

Įvertinus funkcijai keliamus reikalavimus A. Bražėno darbe [1], buvo parinkta ši jos išraiška:

$$f_1(\eta_H) = 1 - \left[1 - \frac{1}{F(\delta_H)} \right] \left(1 - \frac{\eta_H^2}{\delta_H^2} \right). \quad (2.5)$$

Iš eksperimentinių ir teorinių tyrimų nustatyta, kad

$$F(\delta_H) = 1 + M_1 \delta^{n_1} \quad (2.6)$$

Čia $M_1 = 6.23 + 0.758(\gamma_N - 1)$, $n_1 = 2.53 + 0.15(\gamma_N - 1)$.

Mechaninio nevienalytiškumo koeficientui $\gamma_N = \frac{\sigma_i^{H*}(0)}{\sigma_i^{M*}(0)}$ nustatyti reikia žinoti

deformacijų intensyvumo reikšmę $\varepsilon_i^*(0)$ kontakto plokštumos centre.

Iš (2.3)-(2.5) įvertinus, kad

$$\delta_{xm}^H = \int_0^{\delta_H} \sigma_x^H d\eta_H = \frac{1}{\delta_H} \int_{\xi}^1 \tau_{xy}^* d\xi, \quad (2.7)$$

$$\text{Galima išreikšti } \sigma_x^H = -\frac{1}{2} f_2(\eta_H) p C_p^* (1 - \xi^2), \quad (2.7a)$$

čia

$$f_2(\eta_H) = 3 \frac{1 - \left[1 - \frac{1}{F(\delta_H)} \right] \left(1 - \frac{\eta_H^2}{\delta_H^2} \right)}{\delta_H \left[1 + \frac{2}{F(\delta_H)} \right]}. \quad (2.8)$$

integravimo konstanta $C_1 = 0$, nes $\sigma_x^H|_{\xi=0} = 0$

Tangentinius įtempimus kietajame metalė galime apskaičiuoti iš [2] (6.01) lygčių sistemos pirmos lygties:

$$\tau_{xy}^H = - \int_0^{\eta_H} \frac{\partial \sigma_x^H}{\partial \xi} d\eta_H + C_2. \quad (2.9)$$

Iš [2] (6.09) pirmos lygties galima apskaičiuoti $C_2 = 0$.

Pažymėję tangentinius įtempimų pasiskirstymo funkciją

$$\Phi(\eta_H) = \int_0^{\eta_H} f_2(\eta_H) d\eta_H = \frac{3\eta_H}{\delta_H} \frac{1 - \left[1 - \frac{1}{F(\delta_H)} \right] \left(1 - \frac{\eta_H^2}{3\delta_H^2} \right)}{1 + \frac{2}{F(\delta_H)}} \quad (2.10)$$

Iš (2.9) priklausomybių, įvertinę (2.7a), (2.8) ir (2.10), galime parašyti :

$$\tau_{xy}^H = \Phi(\eta_H) \tau_{xy}^*. \quad (2.11)$$

Iš plokščių pjūvių hipotezės galima apskaičiuoti deformacijas kontakto plokštumoje esant tampriam metalo H deformavimui

$$\varepsilon_y^{H*} = \frac{3}{4E} (\sigma_y^{H*} - \sigma_x^{H*}) = const. \quad (2.12)$$

Įvertinus, kad $\tau_{xy}^H|_{\xi=0} = \tau_{xy}^H(0) = 0$ iš [] (12.39), apskaičiuojamas

$$\sigma_i^{H*}(0) = \frac{\sqrt{3}}{2} (\sigma_y^{H*} - \sigma_x^{H*}). \quad (2.13)$$

Iš (2.12) ir (2.13) gaunama išraiška įtempimams σ_y^{H*} kontakto plokštumoje apskaičiuoti, kai metalas H yra deformuojamas tampriai

$$\sigma_y^{H*} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\sigma_i^{H*}(0) + \sigma_x^{H*} \right] \quad (2.14)$$

Analogiškai apskaičiuojamas σ_y^H kituose pjūviuose $\eta_H = const$:

$$\sigma_y^H = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i^H(0) + \sigma_x^H. \quad (2.15)$$

Įtempimų intensyvumas $\sigma_i^H(0)$ šiuo atveju nustatomos ir integralinės pusiausvyros sąlygos

$$p = \int_0^1 \sigma_y d\xi. \quad (2.16)$$

Įvertinę (2.7a), (2.15) ir (2.16) priklausomybes, gauname:

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i^H(0) = p + \frac{1}{3} f_2(\eta_H) p C_p^*. \quad (2.17)$$

Minkšto metalo įtempimai $\tau_{xy}^M, \sigma_x^{M*}$ ir σ_x^M apskaičiuojami koordinatinių sistemoje $\eta\theta\xi$ analogiškai kaip $\tau_{xy}^H, \sigma_x^{H*}$ ir σ_x^H (2.6) – (2.10) priklausomybėse pakeitus η_H į η ir įvertinus, kad ženklas σ_x^M yra teigiamas. Tuomet

$$\tau_{xy}^M = \Phi(\eta) p C_p^* \xi; \quad (2.18)$$

$$\sigma_x^M = \frac{1}{2} f_2(\eta) p C_p^* (1 - \xi^2). \quad (2.19)$$

Įtempimai σ_y^{M*} turėtų būti apskaičiuoti iš minkšto ir kieto metalų deformacijų ε_x^{M*} ir ε_x^{H*} lygybės kontakto plokštumoje. Kadangi esant plokštuminei deformacijai $\varepsilon_y^{M*} = -\varepsilon_x^{M*}$ ir $\varepsilon_y^{H*} = -\varepsilon_x^{H*}$, patogiau σ_y^M apskaičiuoti iš sąlygos $\varepsilon_y^{M*} = -\varepsilon_x^{M*}$ ir $\varepsilon_y^{H*} = -\varepsilon_x^{H*}$, patogiau σ_y^M apskaičiuoti iš sąlygos ε_y^{M*} ir ε_y^{H*} .

Tiksliai patenkinti šią sąlyga yra sudėtinga, todėl parinkta priklausomybė

$$\sigma_y^{M*} = \sigma_x^{M*} + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i^{M*}(0) - D^M p C_p^* \xi^n, \quad (2.20)$$

Tenkinanti integralinės pusiausvyros sąlygą (2.16) ir minėtų deformacijų lygybę taškuose $\xi^* = 0; 0.5$ ir 1.

Laipsnio rodiklis n nustatomas iš deformacijų lygybės $\varepsilon_{y|\xi=0.5}^{M*} = \varepsilon_{y|\xi=0.5}^{H*}$.

Parametras D^M apskaičiuojamas kiekviename skaičiavimo cikle iš sąlygos

$$\varepsilon_{y|\xi=1}^{M*} = \varepsilon_{y|\xi=1}^* \left(\varepsilon_{yl}^{M*} = \varepsilon_{yl}^{H*} \right). \text{ Pirmam priartėjimui galima priimti } n=2.$$

Kituose pjūviuose $\eta = const$ σ_y^M nustatoma įvertinant σ_x^M ir $\sigma_i^M(0)$ kitimą:

$$\sigma_y^M = \sigma_x^M + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i^M(0) - \Phi(\eta) D^M p C_p^* \xi^n, \quad (2.21)$$

$$\text{čia } \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i^M(0) = p - \frac{1}{3} p C_p^* \left[f_2(\eta) - \Phi(\eta) C_1^M D^M \right]$$

apskaičiuojamas iš integralinės pusiausvyros sąlygos (2.16).

Parametras

$$C_1^M = 3 \int_0^1 \xi^n d\xi = \frac{3}{(n+1)}. \quad (2.22)$$

Esant tampriai plastiniam metalo H deformavimui taške $\xi^* = 1 (\sigma_{il}^{H*} > \sigma_e^H)$, įtempimas

$$\sigma_y^H = \sigma_x^H + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i^H(0) - p C_p^* D^H \xi^2. \quad (2.23)$$

Kituose pjūviuose

$$\sigma_y^H = \sigma_x^H + \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i^H(0) - \Phi(\eta_H) D^H p C_p^* \xi^2, \quad (2.24)$$

čia

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i^H(0) = p + \frac{1}{3} p C_p^* [f_2(\eta_H) - \Phi(\eta_H) D^H]$$

Pritaikius integralinės pusiausvyros sąlygą įtempimams σ_y^{M*} ir σ_y^{H*} iš (2.16), (2.20) ir (2.23) apskaičiuojamas tangentinių įtempimų parametras

$$p C_p^* = \frac{2\sqrt{3}(\gamma_N - 1)\sigma_i^{M*}(0)}{f_2(\delta_H) + f_2(\alpha) - (C_1^M D^M - D^H)}. \quad (2.25)$$

Kai $\sigma_{i \xi=1}^{H*} \leq \sigma_e^H$, parametras $D^H = 0$.

Vidutinis įtempimas, atitinka $\varepsilon_i^*(0)$, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_i^{M*}(0) + \frac{1}{3} p C_p^* [f_2(\alpha) - C_1^M D^M]. \quad (2.26)$$

Esant tampriai plastiniam kieto metalo deformavimui taške $\xi^* = 1 (\sigma_i^{H*} > \sigma_e^H)$, įtempimų intensyvumas šiame taške apskaičiuojamas iš prielaidos, naudojamos įtempimų koncentracijos zonoje: $\sigma_{if_1}^{H*} \varepsilon_{if_1}^{H*} = \sigma_i^{H*} \varepsilon_{il}^{H*}$. Tuomet įtempimų intensyvumas taške $\xi^* = 1$ esant laipsninei kieto metalo deformavimo diagramos aproksimacijai tampriai plastinėje zonoje:

$$\sigma_{il}^{H*} = \sigma_e^{H*} \left(\frac{\sigma_i^{H*}}{\sigma_e^{H*}} \right)^{\frac{2m_0^H}{m_0^H + 1}} \quad (2.27)$$

Fiktyvių tamprųjų įtempimų intensyvumas šiame taške:

$$\sigma_{if_1}^{H*} = \sqrt{\sigma_i^{H*}(0)_f^2 + 3(p_f C_{pf}^*)^2}, \quad (2.28)$$

čia $\sigma_i^{H*}(0)_f = \gamma_{Nf} \sigma_i^{M*}(0)$ yra fiktyvių tamprųjų įtempimų intensyvumas kontakto plokštumos

centre. Fiktyvus mechaninio nevienalytiškumo koeficientas $\gamma_N = \gamma_e = \frac{\sigma_e^H}{\sigma_e^M}$, kad $\sigma_i^{H*}(0) \leq \sigma_e^H$

ir $\gamma_{Nf} = \varepsilon_i^{M*}(0) / \varepsilon_e^H$, kai $\sigma_i^{H*}(0) \geq \sigma_e^H$. Parametras pfC_{pf}^* apskaičiuojamas iš (2.23)

priklausomybės vietoj γ_N išraišius γ_{Nf} .

Deformacijos atskiruose suvirintosios jungties taškuose apskaičiuojamos pagal (12.28a) formules:

$$\varepsilon_y = \frac{3}{4E'} (\sigma_y - \sigma_x), \quad \varepsilon_x = \frac{3}{4E'} (\sigma_x - \sigma_y) \quad \text{ir} \quad \varepsilon_z = 0 \quad (2.28a)$$

. Kai $\sigma_{il}^{H*} \leq \sigma_e^H$ (2.28a), formulėse E'^H reikia pakeisti į E . Kai $\sigma_{il}^{H*} > \sigma_e^H$, parametras D^H apskaičiuojamas iš (2.23), (2.11), (2.7a) priklausomybių, į jas išraišius $\xi = 1$.

Iš pateiktų priklausomybių matyti kad, norint apskaičiuoti įtempimus ir deformacijas atskiruose suvirintosios jungties taškuose, reikia pasirinkti deformacijų intensyvumą kontakto plokštumos centre $\varepsilon_i^*(0)$ ir nustatyti mechaninio nevienalytiškumo koeficientą γ_N .

3. Deformacijų būvis suvirintose jungtyse su plokščia realia siūle

Įtempimų deformacijų būvio apskaičiavimui naudotos santykinės koordinatės $\xi = x/l$ ir $\eta = y/l$ (3.1 pav.) Skaičiuojant mechaniškai nevienalytį suvirintą sujungimą su plokščia realia siūle rumbelės profilis buvo priimtas lanko formos. Norint apskaičiuoti įtempimų deformacijų būvį būtina žinoti šiuos siūlės rumbelės santykinius parametrus (žr. 3.1 pav.):

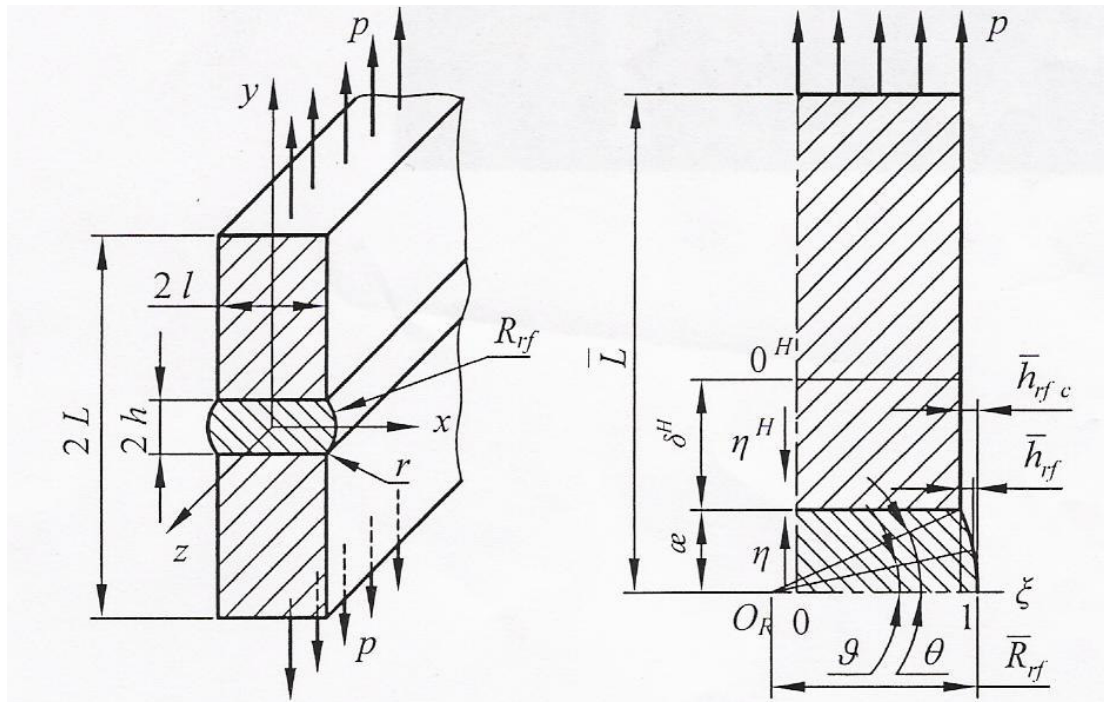
· plotį $b_{rf} = 2 \square$; čia $\square = h/l$ - yra santykinis siūlės aukštis;

· spindulį $\bar{R}_{rf} = R_{rf}/l = (h_{rfe}^2 + \chi^2)/(2h_{rfe})$; $p = \int_0^{1+\bar{h}_{rfe}} \sigma_y d\xi$

· aukštį, atitinkantį santykinę koordinatę $\eta = y/l$: $\bar{h}_{rf} = h_{rf}/l = \bar{R}_{rf}(\sqrt{1-\sin^2 \vartheta} - \sqrt{1-\sin^2 \theta})$;

čia

$$\sin \theta = \alpha / \bar{R}_{rf} \text{ ir } \sin \vartheta = \eta / \bar{R}_{rf}.$$



3.1 pav. Suvirintojo sujungimo su plokščia realia siūle skaičiavimo schema

Kiekviename skersiniame realios siūlės pjūvyje turi būti tenkinama ši integralinė

pusiausvyros sąlyga: $p = \int_0^{1+\bar{h}_{rfe}} \sigma_y d\xi$. Tačiau šio integralo apskaičiavimas yra komplikotas (nežinome kaip kinta σ_y rumbelėje, t.y. kaip $\xi > 1$). Todėl šiuo atveju integralinė pusiausvyros sąlyga:

$$\frac{p}{1+\bar{h}_{rfe}} = \int_0^1 \sigma_y d\xi; \quad (3.1)$$

Čia $h_{rfe} = h_{rf}/l$ - santykinis siūlės rumbelės aukštis .

Supaprastintoje siūlės įtempimų intensyvumas išilginėje sujungimo simetrijos ašyje

yra $\sigma_{ie}(0) = \sqrt{3}[p - pC_p^* f_2(0)/3]/2$, o realioje siūlėje:

$$\sigma_{ie}(0) = \frac{\sqrt{3}}{2} \left[\frac{p}{1+h_{rfe}} - \frac{1}{3} p C_p^* f_2(0) \right]. \quad (3.2)$$

Įtempimai ir deformacijų intensyvumas išoriniuose kontakto plokštumos taškuose:

$$\bar{\sigma}_{\max} = \bar{\sigma}_{in} K_{\sigma} \quad (3.3)$$

ir

$$\varepsilon_{i\max}^* = \varepsilon_{in} K_{\varepsilon}.$$

čia ε_{in} - sujungimo su supaprastinta siūle išorinių kontakto plokštumos taškų deformacijų intensyvumas; K_{ε} - deformacijų koncentracijos koeficientas esant tampriai plastiniam deformavimui. K_{σ} - įtempimų koncentracijos koeficientas; σ_{in} -

įtempimams ir deformacijoms apskaičiuoti, kai įtempimų koncentracijos zonoje vyksta tampriai plastinis deformavimas, G. Neuberis [3] pasiūlė priklausomybę

$$\frac{K_{\sigma} K_{\varepsilon}}{\alpha_{\sigma}^2} = 1 \quad (3.4)$$

Čia $\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_{ie\max}}{\sigma_{in}}$ -- įtempimų koncentracijos koeficientas, kai įtempimų

koncentracijos zonoje vyksta tamprus deformavimas ($\sigma_{ie\max} < \sigma_e$). $K_{\sigma} = \sigma_{i\max} / \sigma_{in}$ - deformacijų koncentracijos koeficientas, kai įtempimų koncentracijos zonoje medžiaga deformuota tampriai plastiškai.

Į (3.4) įrašę K_{σ} ir K_{ε} reikšmes ir pažymėję $\sigma_{i\max} = \sigma_i, \varepsilon_{i\max} = \varepsilon_i$, gauname

$$\alpha_{\sigma}^2 = \frac{\sigma_i \varepsilon_i}{\sigma_{in} \varepsilon_{in}} \quad (3.5)$$

Įvertinę, kad medžiagų deformavimo diagramas patogiau aproksimuoti santykinėse koordinatėse $\bar{\sigma} = \sigma / \sigma_e$ ir $\bar{\varepsilon} = \varepsilon / \varepsilon_e$ (3.5), išraišką galime užrašyti taip:

$$\alpha_{\sigma}^2 = \frac{\bar{\sigma}_i \bar{\varepsilon}_i}{\bar{\sigma}_{in} \bar{\varepsilon}_{in}}. \quad (3.6)$$

Kai tempimo diagrama aproksimuota laipsnine funkcija $\bar{\varepsilon} = \bar{\sigma}^{\frac{1}{m_0}}$, iš (3.6) priklausomybės gauname:

$$\alpha_{\sigma}^2 = \frac{\bar{\sigma}_i^{\frac{1+m_0}{m_0}}}{\bar{\sigma}_{in} \bar{\varepsilon}_{in}^{\frac{1+m_0}{m_0}}} \quad (3.7)$$

Iš (3.7) priklausomybės gali būti apskaičiuotas įtempimų koncentracijos koeficientas esant tampriai plastiniam deformavimui

$$K_{\sigma} = \frac{\bar{\sigma}_i}{\bar{\sigma}_{in}} = \alpha_{\sigma}^{\frac{2m_0}{m_0+1}} \cdot \frac{(\bar{\sigma}_{in} \bar{\varepsilon}_{in})^{\frac{m_0}{m_0+1}}}{\bar{\sigma}_{in}} \quad (3.8)$$

Kai normaliniam skerspjūvyje metalas deformuotas tampriai plastiškai ($\bar{\sigma}_{in} > 1$),

iš (3.8) priklausomybės, įvertinus kad, $\bar{\varepsilon} = \bar{\sigma}^{\frac{1}{m_0}}$, gauname:

$$K_{\sigma} = \alpha_{\sigma}^{\frac{2m_0}{m_0+1}} \quad (3.9)$$

Atlikus patikinimą (3.9) priklausomybei, pasirodė, kad kai kuriais atvejais, pavyzdžiui, esant nedideliame medžiagos sustiprėjimo laipsniui, rezultatai būna nepatenkinami.

Dėl šios priežasties N.Machutov pasiūlė patobulinti H. Neuberio priklausomybę: (3.4) lygybės dešinėje pusėje vietoj 1 priimti $F[\alpha_\sigma, \bar{\sigma}_{in}, f(\bar{\sigma}_i, \bar{e}_i)]$. Remiantis eksperimentiniais duomenimis buvo nustatyta, kad esant laipsninei deformavimo diagramos aproksimacijai:

$$F = \frac{1}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_{in})^{n(1-m_0)[1-(\bar{\sigma}_{in}-1/\alpha_\sigma)]}} \quad (3.10)$$

Čia konstanta $n = 0,5$.

Tuomet analogiškai (3.8) priklausomybei buvo apskaičiuotas įtempimų koncentracijos koeficientas esant tampriai plastinei deformavimui

$$K_\sigma = \frac{\alpha_\sigma^{\frac{2m_0}{1+m_0}} \cdot \bar{\sigma}_{in}^{\frac{m_0-1}{m_0+1}}}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_{in})^{\frac{1-m_0}{1+m_0}[1-(\bar{\sigma}_{in}-1/\alpha_\sigma)m_0]}} \quad (3.11)$$

$$K_e = \frac{\alpha_\sigma^{\frac{2}{1+m_0}} \cdot \bar{\sigma}_{in}^{\frac{1-m_0}{1+m_0}}}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_{in})^{\frac{1-m_0}{1+m_0}[1-(\bar{\sigma}_{in}-1/\alpha_\sigma)]}} \quad (3.12)$$

Kai $\bar{\sigma}_{in} \leq 1$;

$$K_\sigma = \frac{\alpha_\sigma^{\frac{2}{1+m_0}}}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_{in})^{\frac{1-m_0}{1+m_0}[1-(\bar{\sigma}_{in}-1/\alpha_\sigma)]m_0}} \quad (3.13)$$

$$K_e = \frac{\alpha_\sigma^{\frac{2}{1+m_0}}}{(\alpha_\sigma \bar{\sigma}_{in})^{\frac{1-m_0}{1+m_0}[1-(\bar{\sigma}_{in}-1/\alpha_\sigma)]}} \quad (3.14)$$

Kai $\bar{\sigma}_{in} > 1$

Čia n – medžiagos charakteristika (daugumai plienų $n \approx 0,5$).

Įtempimų intensyvumas įtempimų koncentracijos zonoje, kai Kai $\bar{\sigma}_i > 1$ apskaičiuojamas pagal formulę

$$\sigma_{i_i} = \sigma_e \bar{\sigma}_{in} K_\sigma \quad (3.15)$$

čia $\bar{\sigma}_{in}$ - įtempimų intensyvumas kraštiniame kontakto plokštumos taške siūlėje be rumbelės.

O deformacijų intensyvumas

$$\varepsilon_i = \varepsilon_e (\bar{\sigma}_{in} K_\sigma)^{\frac{1}{m_0}} \quad (3.16)$$

Koeficientas K_e priklauso nuo teorinio koncentracijos koeficiento α_{σ_i} – įtempimų koncentracijos koeficientas esant tampriai plastiniam deformavimui.

Optimalus rumbelės aukštis nustatomas iš sąlygos, kad įtempimų intensyvumas rumbelės pradiniame taške ir siūlės centre turi būti lygus, t.y. :

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \left[\frac{p}{1 + \bar{h}_{rfc}} - \frac{1}{3} p C_p^* f_2(0) \right] = \sigma_e \bar{\sigma}_{in} K_\sigma \quad (3.16a)$$

Darbuose [1, 4] pasiūlyta teorinio koncentracijos koeficiento reikšmė

$$\alpha_{\sigma_i} = (1.25 - 0.083 \lg 4r) \exp \left[(7.22 - 4.75 \lg 4r) \left(\frac{\bar{h}_{rfc}}{\bar{b}_{rf}} - 0.026 \right) \right] \quad (3.17)$$

Čia $r \geq 0,25$, mm- rumbelės pradžios užapvalinimo spindulys.

(3.17) išraiškoje neįvertinamas mastelio faktorius (priklausomybė nuo suvirinamų lakštų storio) ir jos galiojimo ribos yra iki $\bar{h}_{rfc} / \bar{b}_{rf} \approx 0,1$. Šiame darbe pateiktuose tyrimuose buvo patikslinta teorinio koncentracijos koeficiento išraiška:

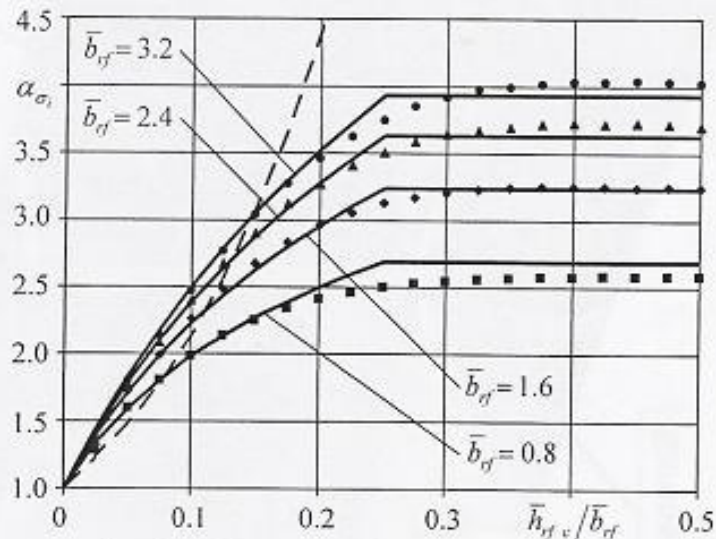
$$\alpha_\sigma = 1 + C_l C_r (1 + 2\bar{b}_{rf}) \lg \left[1 + \frac{\bar{h}_{rfc}}{\bar{b}_{rf}} \left(\frac{25}{1 + \bar{b}_{rf}} \right) \right], \text{ kai } \frac{\bar{h}_{rfc}}{\bar{b}_{rf}} < 0.25;$$

$$\alpha_\sigma = 1 + C_l C_r (1 + 2\bar{b}_{rf}) \lg \left(1 + \frac{6.25}{1 + \bar{b}_{rf}} \right), \text{ kai } \frac{\bar{h}_{rfc}}{\bar{b}_{rf}} \geq 0.25; \quad (3.18)$$

Čia $C_r = \frac{1 + (10\bar{h}_{rfc})^2}{1 + (10\bar{h}_{rfc})^2 \sqrt{r}/0.48}$ -- parametras įvertinantis rumbelės pradžios užapvalinimo

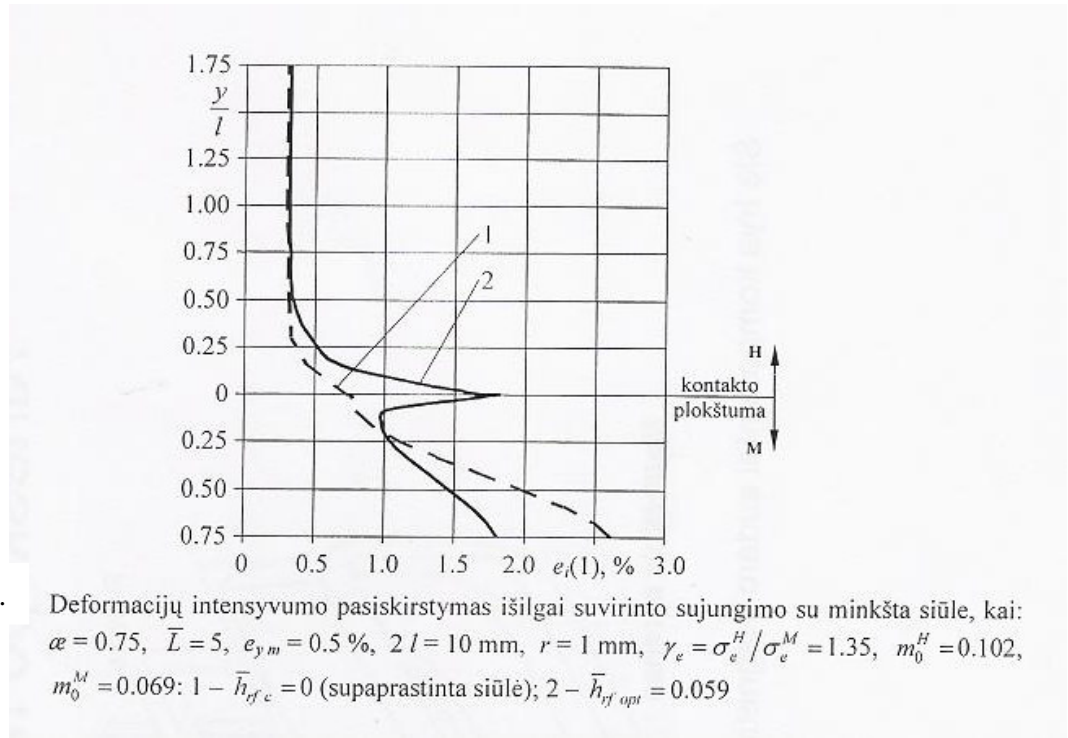
spindulį $r \geq 0,48$, mm; $C_l = (2l/20)^{(0.9\bar{h}_{rfc} + 0.1)}$ - parametras įvertinantis suvirintų lakštų stori $2l$, mm.

Teorinio koncentracijos koeficiento α_{σ_i} reikšmės apskaičiuojame pagal (3.17), (3.18) lygtis ir nustatomos BEM, pateiktos 3.2 pav.



3.2 pav. Teorinio koncentracijos koeficiento α_{σ_i} priklausomybės nuo \bar{h}_{rfc} ir \bar{b}_{rf} apskaičiuotos pagal (2.10) formulę (---), pagal (2.11) formulę (—), ir nustatytos BEM (taškai), kai $2l = 20$ mm; $r = 0.48$ mm: ■ - $\bar{b}_{rf} = 0.8$ ($\alpha = 0.4$); ♦ - $\bar{b}_{rf} = 1.6$ ($\alpha = 0.8$); ▲ - $\bar{b}_{rf} = 2.4$ ($\alpha = 1.2$); • - $\bar{b}_{rf} = 3.2$ ($\alpha = 1.6$)

Didėjant siūlės rumbelės aukščiui deformacijų intensyvumas siūlės centre mažėja, 0 ties rumbelių pradžia didėja. Todėl galima apskaičiuoti optimalų minkštos siūlės rumbelės aukštį, nustatomą iš sąlygos, kad minėtose zonose deformacijų intensyvumas būtų vienodas (3.3 pav.).



Sujungimuose su kietomis siūlėmis rumbelės turi neigiamą efektą, nes padidėjęs siūlės standumas sujungimo stiprumui įtakos neturi, 0 rumbelių pradžios gali tapti pavojingiausia sujungimo zona. Tokio sujungimo pavojingiausia zona gali tapti ne pagrindinis minkštas metalas, bet kontakto plokštumos išorinės zonos. Todėl rekomenduojama kietos siūlės rumbeles nušlifuoti.

4. ĮTEMPIMŲ IR DEFORMACIJŲ BŪVIO TYRIMAS

Įtempimų ir deformacijų būviui apskaičiuoti pagal ankščiau aprašytą metodiką naudoju prof.habil.dr. Algio Braženo ir doc. Dainiaus Vaičiulio sukurta programą „Plokštė“ versija 1.0 beta, parašyta FORTRAN-73 kalba.

Uždavinys bus sprendžiamas naudojant santykinius įtempimus ir santykinės deformacijas. Šiuo atveju įtempimai ir deformacijos išreiškiami santykiniais minkštais vienetais, kurie parodo, kiek proporcingumo ribos įtempimų ar deformacijų sudaro skaičiuojamieji dydžiai:

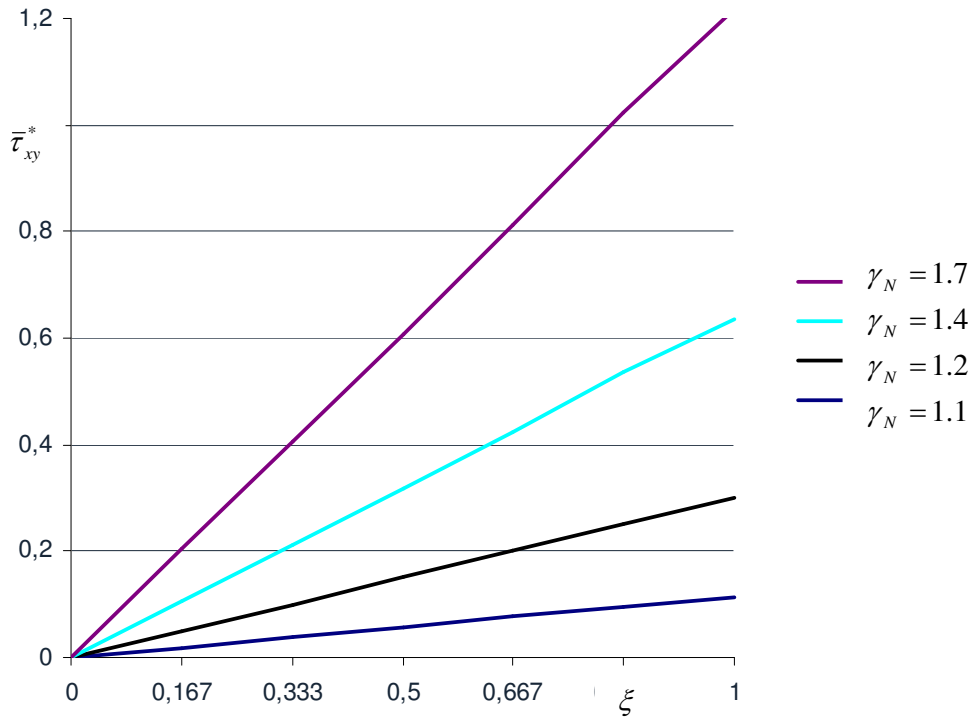
$$\bar{\sigma}_e^M = 1, \bar{\sigma}_i^M = \frac{\sigma_i^M}{\sigma_e^M}, \bar{p} = \frac{p}{\sigma_e} \bar{\sigma}_x^M = \frac{\sigma_x^M}{\sigma_e^M}; \bar{\sigma}_y^M = \frac{\sigma_y^M}{\sigma_e^M}; \bar{\tau}_{xy}^M = \frac{\tau_{xy}^M}{\sigma_e^M}$$

$$\bar{\varepsilon}_e = 1, \bar{\varepsilon}_i^M = \frac{\varepsilon_i^M}{\varepsilon_e^M}, \bar{\varepsilon}_y^M = \frac{\varepsilon_y^M}{\varepsilon_e^M}; \bar{\varepsilon}_x = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_e}; \bar{\gamma}_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_e}$$

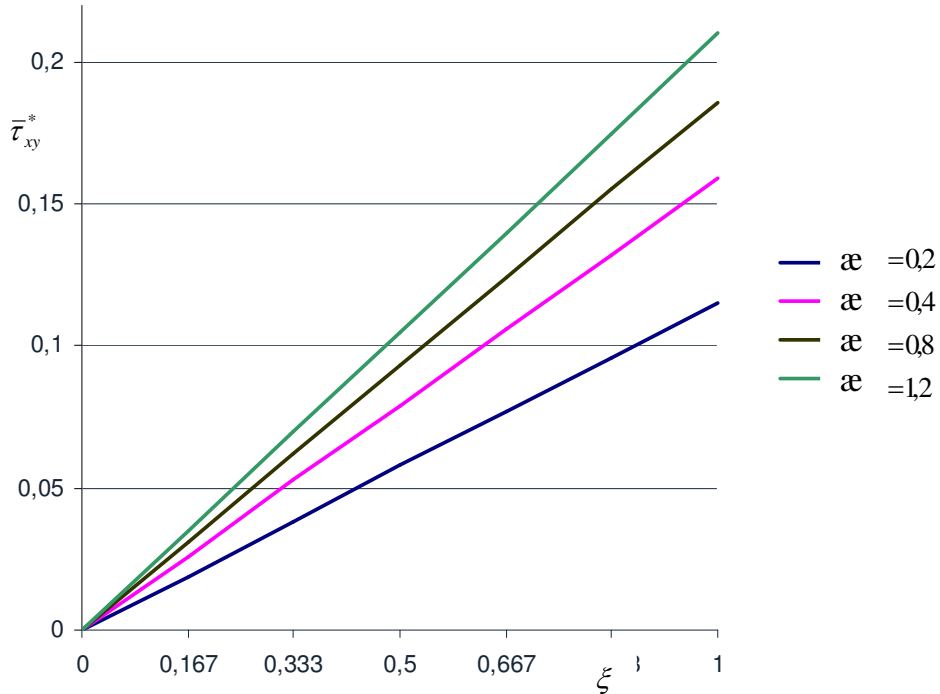
Priklausomybes įtempimams ir deformacijoms santykiniais vienetais apskaičiuoti gauname 3 skyriaus formulėse pakeitus santykinėmis jų reikšmėmis. Be to įtempimų būvio komponentai išreiškiami minkštos medžiagos santykiniais vienetais.

Nagrinėsiu įtempimų ir deformacijų būvio komponentų priklausomybę nuo minkšto tarpsluoksniu storio \square , sujungimo mechaniško nevienalytiškumo koeficiento γ .

Tangentinių įtempimų pasiskirstymo priklausomybė nuo γ ir \square parodytos (4.1) ir (4.2) pav. Kai tangentiniai įtempimai auga einant suvirintojo sujungimo krašto link ($\xi \rightarrow 1$). Be to, tangentiniai įtempimai didėja didėjant mechaninio nevienalytiškumo koeficiento γ ir minkšto tarpsluoksniu santykinio storio \square reikšmėms. Esant nedidelėms γ reikšmėms ($\gamma < 1,2$), įtempimas $\bar{\tau}_{xy}^*$ išilgai x ašies beveik nekinta.

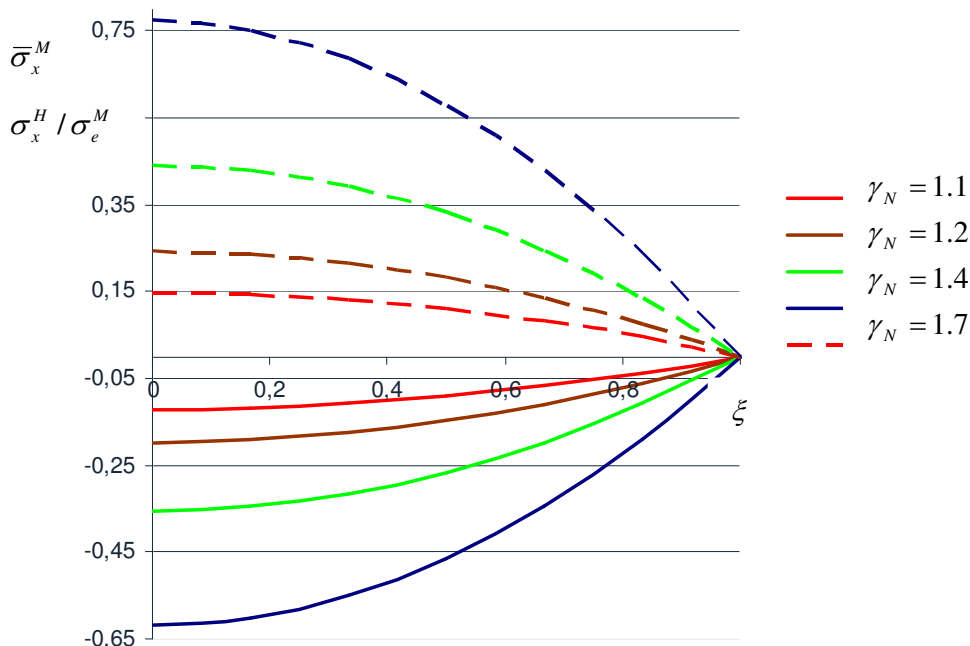


4.1 pav. Įtempimų pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle (tarpsluoksniu) išilgai x (ξ) ašies, kai $\square = 0.8$; $L = 5$;



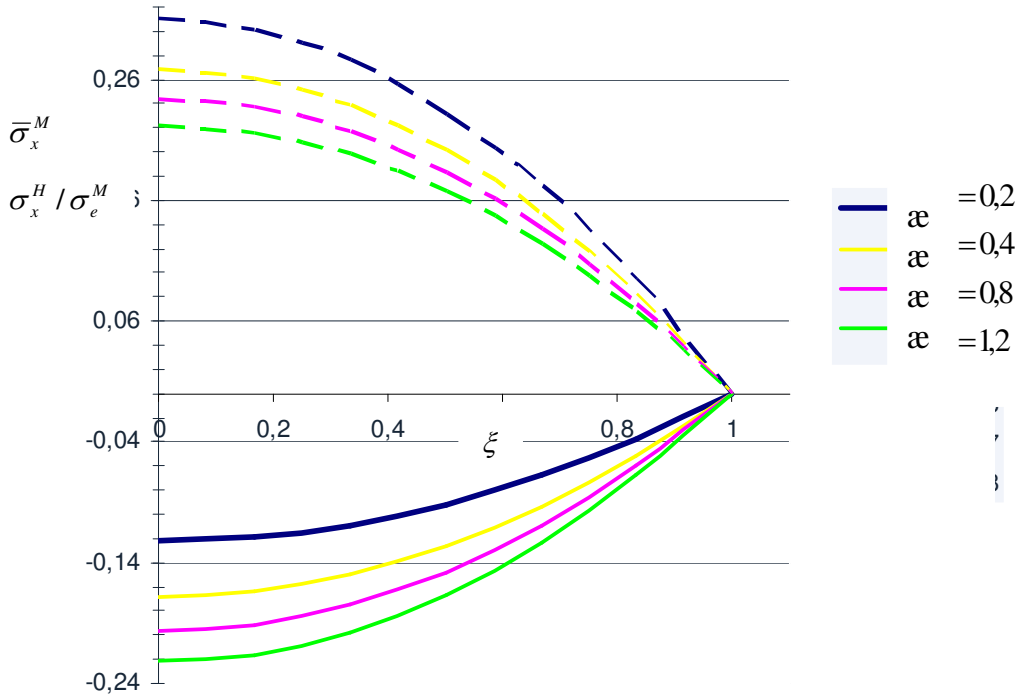
4.2 pav. Įtempimų pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle (tarpsluoksniu) išilgai x (ξ) ašies, kai $\gamma = 1.2$; $L = 5$.

Artėjant prie suvirintojo krašto ($\xi \rightarrow 1$), įtempimai $\bar{\sigma}_x^M$ ir σ_x^H / σ_e^M mažėja ir pasiekia nulinę reikšmę pačiame suvirintojo sujungimo krašte ($\xi = 1$). Didėjant mechaninio nevienalytiškumo koeficiento γ reikšmei, normalinei įtempimai $\bar{\sigma}_x^M$ ir σ_x^H / σ_e^M didėja. Esant nedidelėms γ reikšmėms ($\gamma < 1.2$), įtempimas $\bar{\sigma}_x^M$ ir σ_x^H / σ_e^M išilgai x ašies beveik nekinta. (4.3) pav.



4.3 pav. Įtempimų pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle (tarpsluoksniu) išilgai x (ξ) ašies, kai $\alpha = 0.8$; $L = 5$. (----) pažymėta $\bar{\sigma}_x^M$, (—) σ_x^H / σ_e^M

Tolstant nuo suvirintojo sujungimo krašto, normalinei įtempimai $\bar{\sigma}_x^M$ ir σ_x^H / σ_e^M didėja (4.4) pav. Didinant minkšto tarp sluoksnio santykinį storį α , normalinei įtempimai $\bar{\sigma}_x^M$ ir σ_x^H / σ_e^M mažėja.

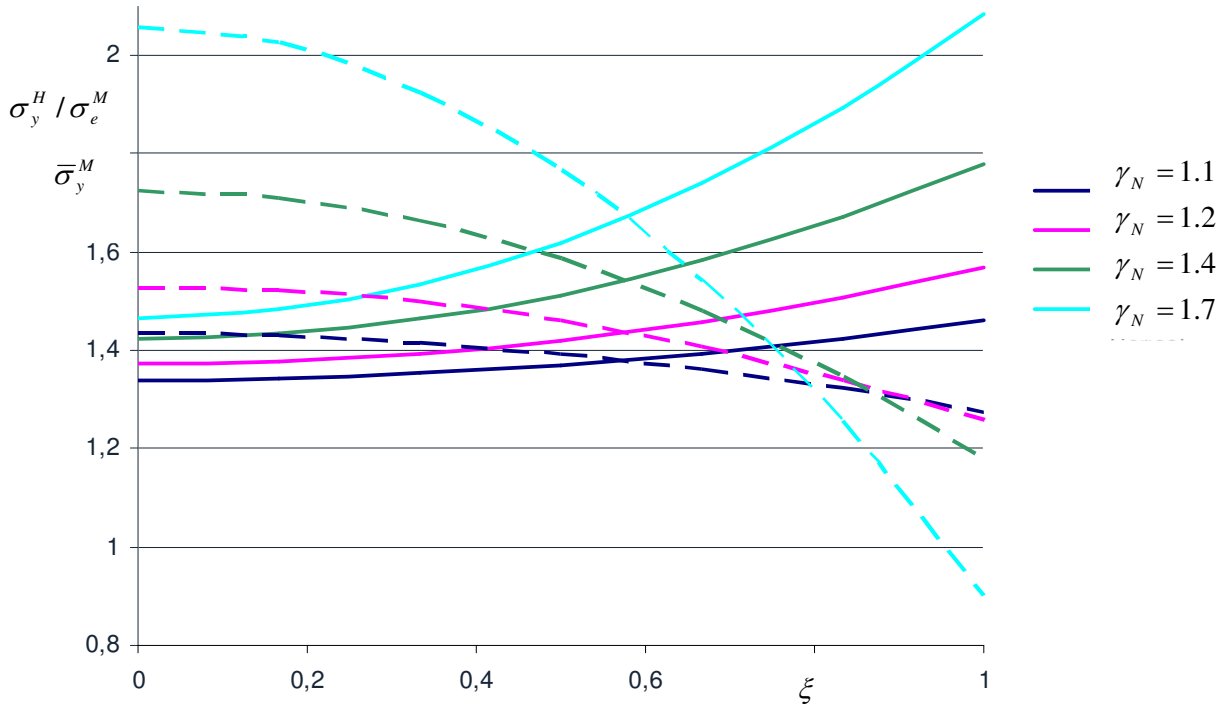


4.4 pav. Įtempimų pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle (tarp sluoksniu) išilgai x (ξ) ašies, kai $\gamma = 1.2$; $L = 5$. (----) pažymėta $\bar{\sigma}_x^M$, (—) σ_x^H / σ_e^M

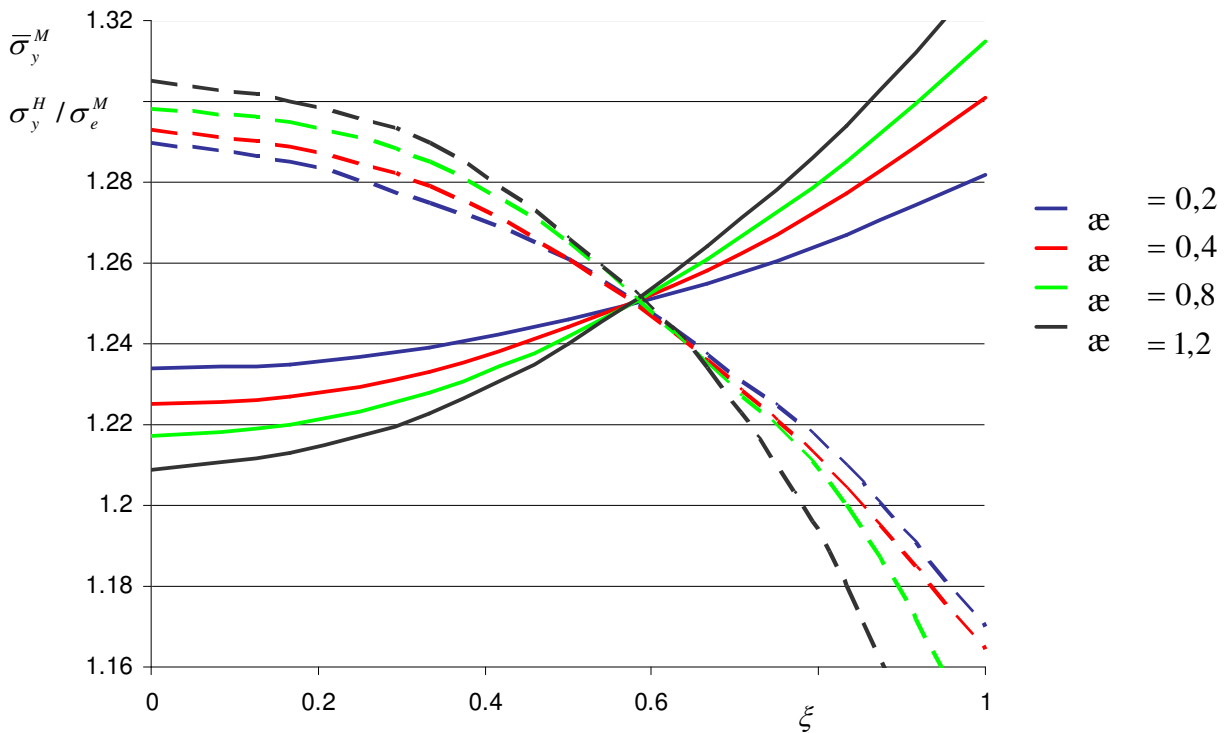
Artėjant prie suvirintojo sujungimo krašto ($\xi \rightarrow 1$), normalinei įtempimai $\bar{\sigma}_y^M$ mažėja ir pasiekus suvirintojo sujungimo kraštą ($\xi = 1$), įtempimai $\bar{\sigma}_y^M$ įgauna minimalias reikšmes (4.4) pav. Didėjant mechaninio nevienalytiškumo koeficientui γ , įtempimų $\bar{\sigma}_y^M$ reikšmės atitinkamai išauga. Esant nedidelėms γ reikšmėms ($\gamma \leq 1.2$) normaliniai įtempimai $\bar{\sigma}_y^M$ išilgai x(ξ) ašies beveik nekinta.

Tuo tarpu (4.5 pav) matome, kad artėjant prie suvirintojo sujungimo krašto ($\xi \rightarrow 1$), normalinei įtempimai σ_y^H / σ_e^M didėja ir pasiekus suvirintojo sujungimo kraštą ($\xi = 1$), įtempimai σ_y^H / σ_e^M įgauna maksimalias reikšmes. Normaliniai įtempimai σ_y^H / σ_e^M auga, didėjant mechaninio nevienalytiškumo koeficientui γ . Esant nedidelėms γ reikšmėms ($\gamma \leq 1.2$) normaliniai įtempimai σ_y^H / σ_e^M išilgai x(ξ) ašies beveik nekinta.

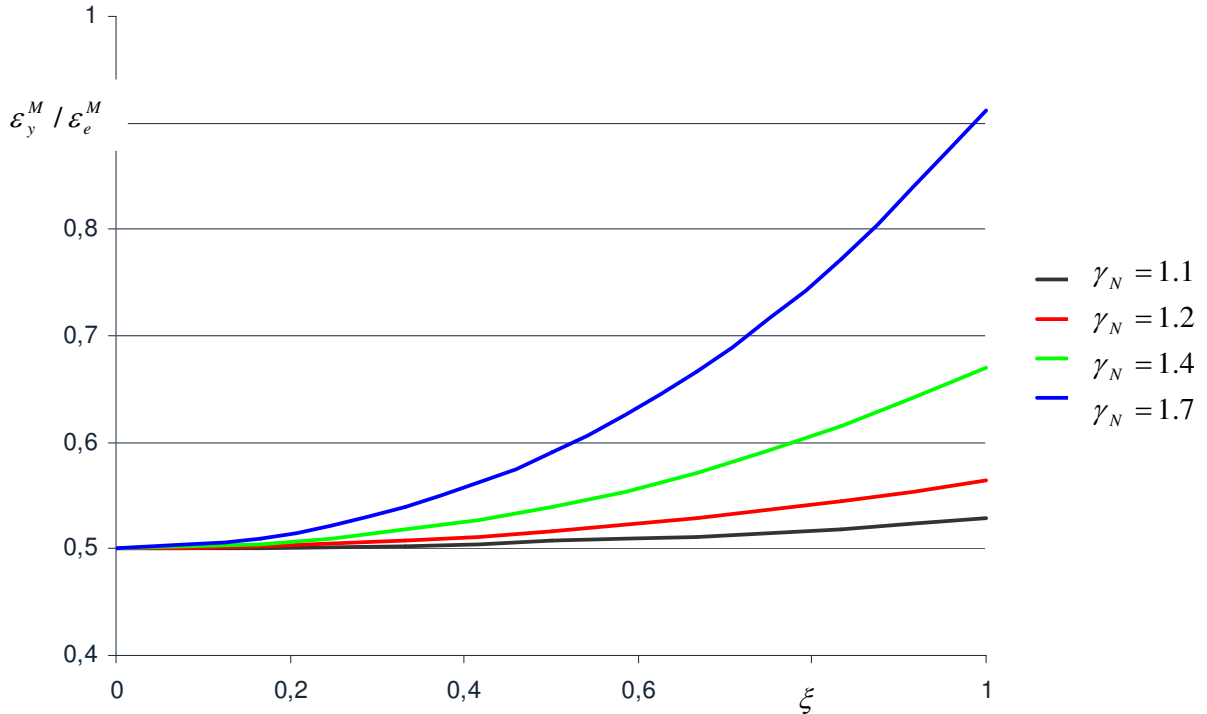
Artėjant prie suvirintojo sujungimo krašto ($\xi \rightarrow 1$), normaliniai įtempimai $\bar{\sigma}_y^M$ mažėja (4.6 pav), o σ_y^H / σ_e^M didėja. pasiekus sujungimo kraštą ($\xi = 1$), įtempimai $\bar{\sigma}_y^M$ įgauna minimalias, o σ_y^H / σ_e^M įgauna maksimalias reikšmes. Didėjant minkšto tarp sluoksnio storiui α , normaliniai įtempimai $\bar{\sigma}_y^M$ ir σ_y^H / σ_e^M mažėja.



4.5 pav. Įtempimų pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle (tarpsluoksniu) išilgai x (ξ) ašies, kai $\alpha = 0,8$; $L = 5$. (----) pažymėta $\bar{\sigma}_x^M$, (—) σ_x^H / σ_e^M



4.6 pav. Įtempimų pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle (tarpsluoksniu) išilgai x (ξ) ašies, kai $\gamma = 1,2$; $L = 5$. pažymėta $\bar{\sigma}_x^M$, (—) σ_x^H / σ_e^M

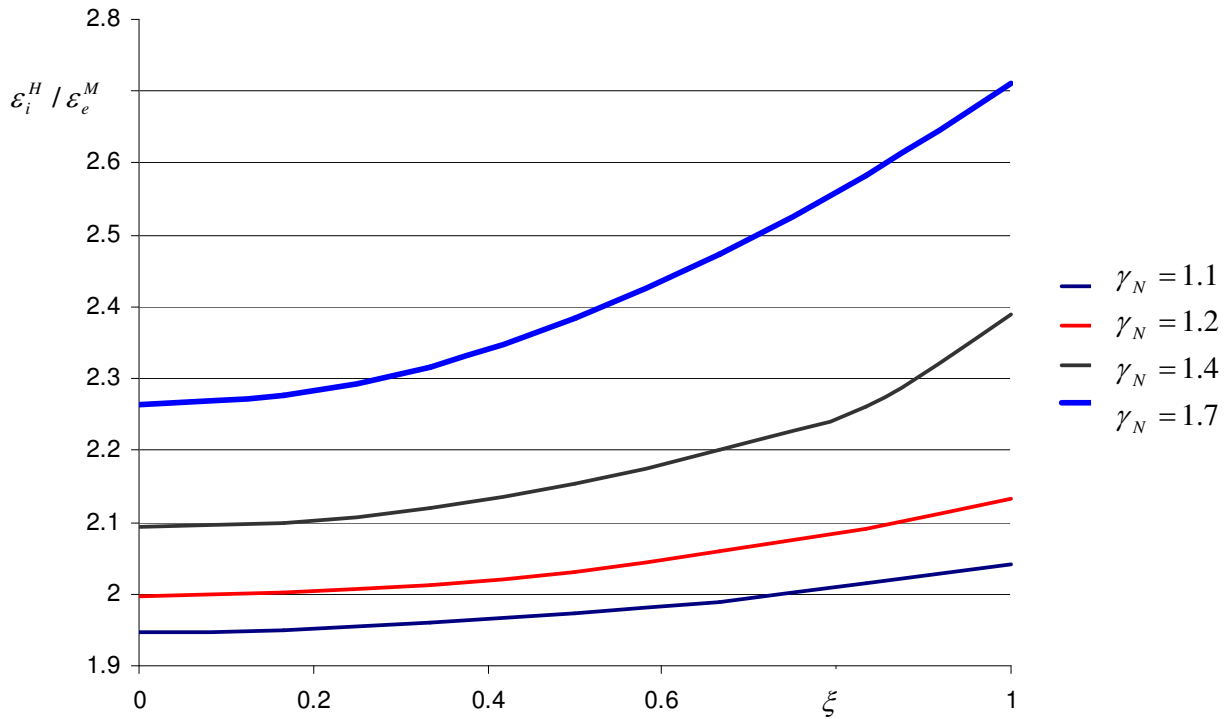


4.7 pav. Įtempimų pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle (tarpsluoksniu) išilgai x (ξ) ašies, kai $\alpha = 0,8$; $L = 5$.

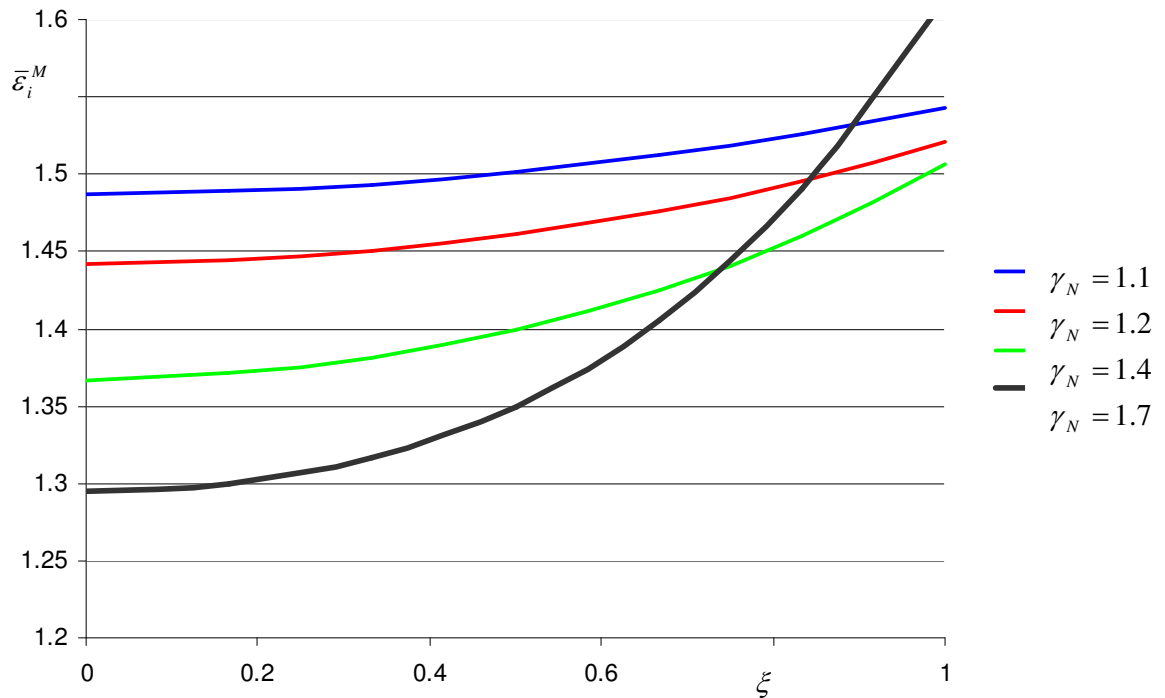
Iš (4.7) pav. Matome, kad suvirintojo sujungimo deformacijos $\varepsilon_y^M / \varepsilon_e^M$ reikšmės didėja artėjant prie suvirintojo sujungimo krašto ($\xi \rightarrow 1$). Be to, didėjant mechaninio nevienalytiškumo koeficientui γ reikšmei, deformacijos $\varepsilon_y^M / \varepsilon_e^M$ irgi didėja. Esant nedidelėms ($\gamma \leq 1.2$) reikšmėms, deformacijos $\varepsilon_y^M / \varepsilon_e^M$ išilgai $x(\xi)$ ašies beveik nekinta.

Iš (4.8) pav. Matome, kad normalinių įtempimų intensyvumas $\varepsilon_i^H / \varepsilon_e^M$ artėjant prie suvirintojo sujungimo ($\xi \rightarrow 1$), didėja. Be to, didėjant mechaninio nevienalytiškumo koeficientui γ reikšmei, normalinių įtempimų intensyvumo reikšmės irgi didėja.

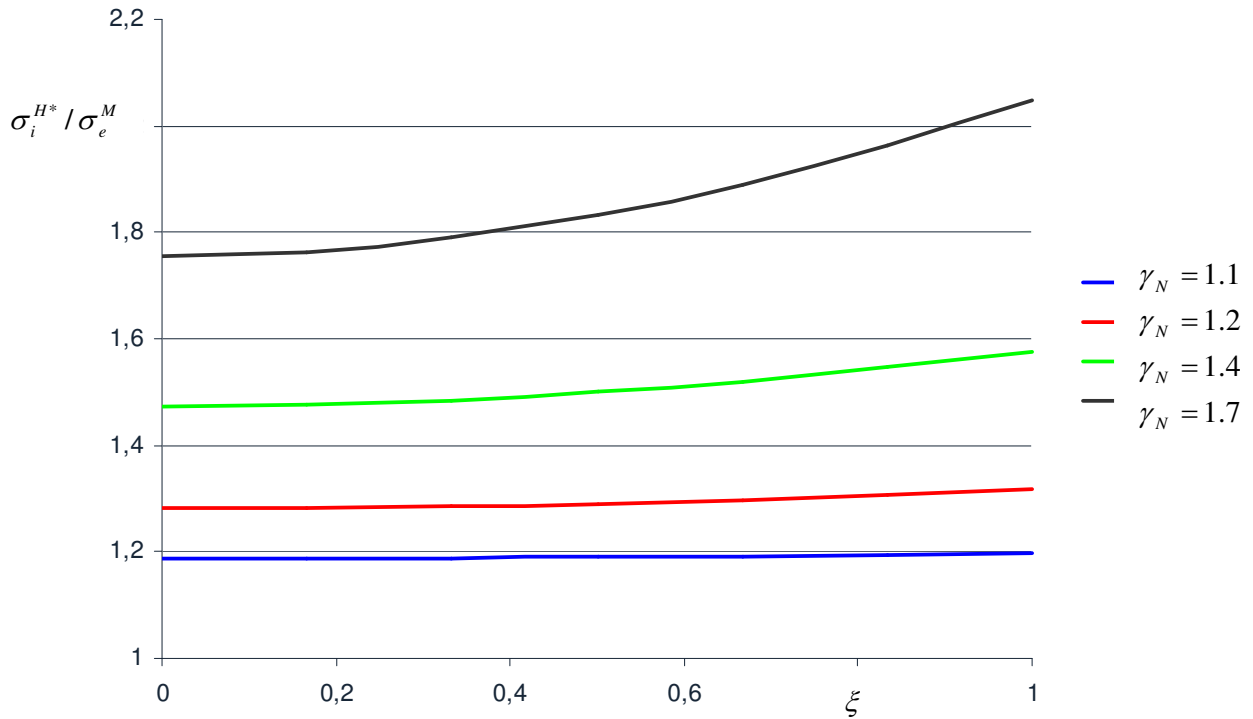
Analogiškai (4.9) pav. Matome, kad deformacijų intensyvumas $\bar{\varepsilon}_i^M$, artėjant prie suvirintojo sujungimo ($\xi \rightarrow 1$), didėja. Be to, didėjant mechaninio nevienalytiškumo koeficientui γ reikšmei, normalinių įtempimų intensyvumo reikšmės irgi didėja.



4.8 pav. Įtempimų pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle (tarpsluoksniu) išilgai x (ξ) ašies, kai $\alpha = 0,8$; $L = 5$.



4.9 pav. Įtempimų pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle (tarpsluoksniu) išilgai x (ξ) ašies, kai $\alpha = 0,8$; $L = 5$.

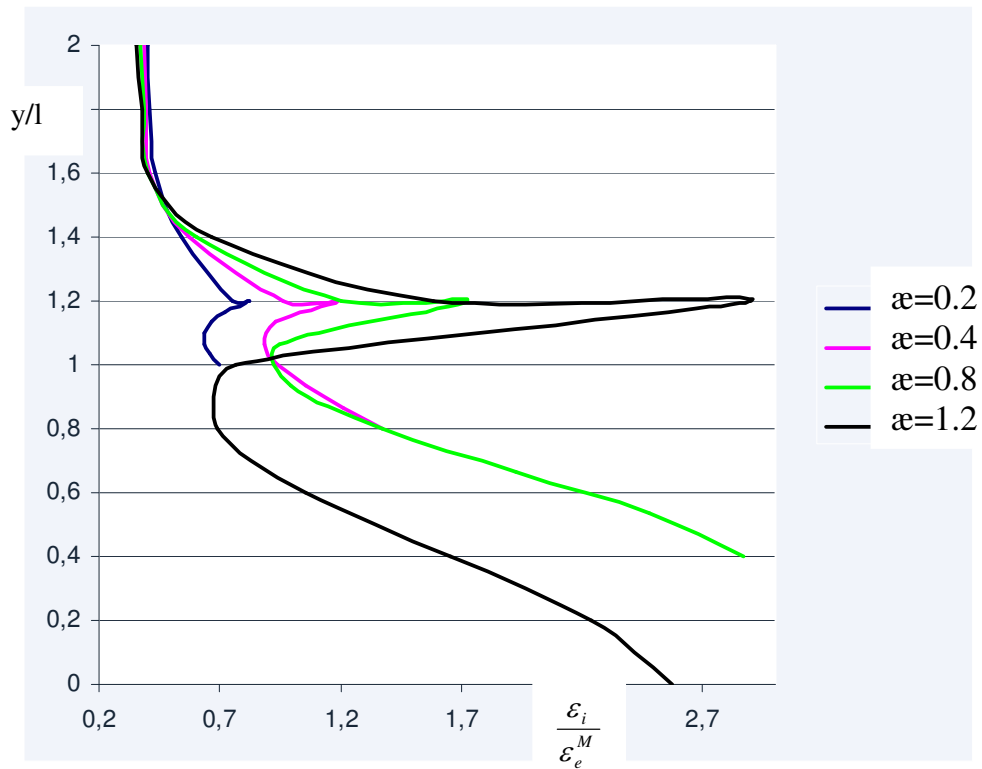


4.10 pav. Įtempimų pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle (tarpsluoksniu) išilgai y (η) ašies, kai $\gamma = 1.2$; $L = 5$.

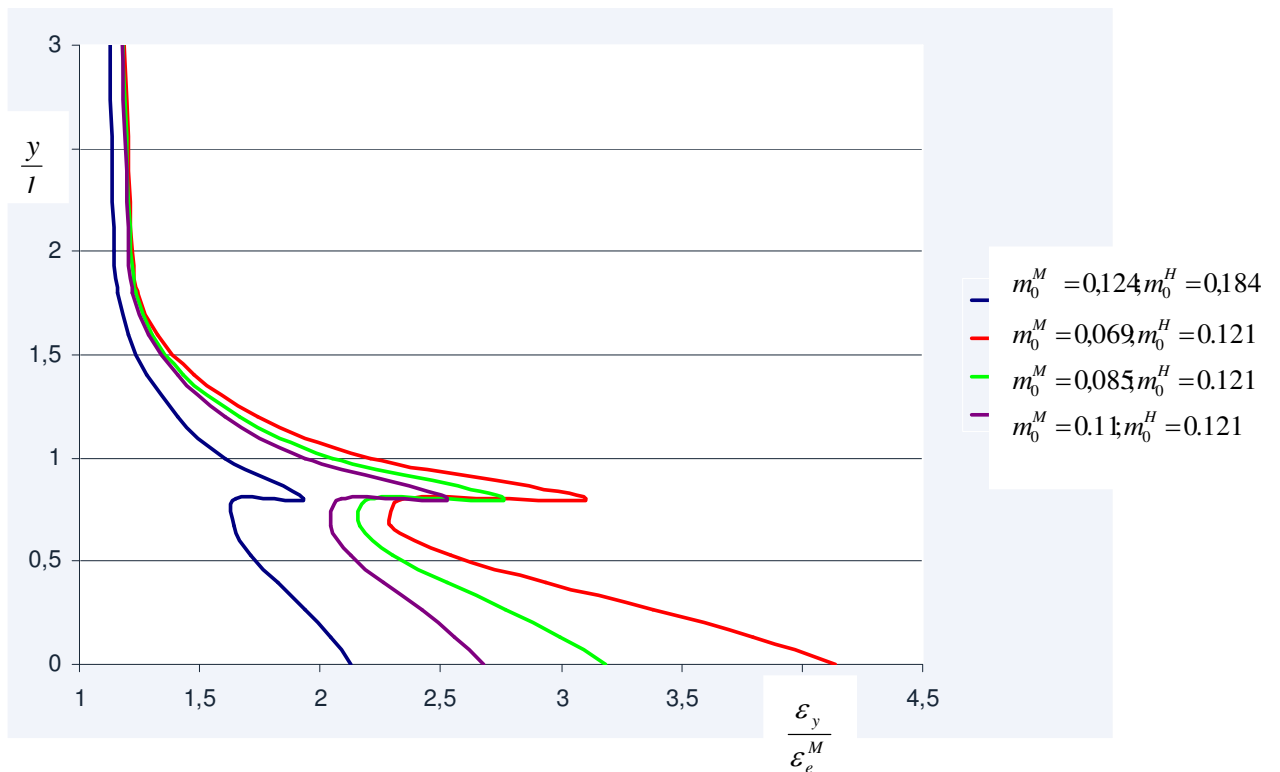
Iš (4.10 pav.) matyti, kad normalinių įtempimų intensyvumas $\bar{\sigma}_i^{K^*}$ artėjant prie suvirintojo krašto ($\xi \rightarrow 1$), didėja. Be to, didėjant mechaniniam nevienalytiškumo koeficiento γ reikšmei, normalinių įtempimų intensyvumo $\bar{\sigma}_i^{K^*}$ reikšmės irgi didėja.

(4.11) pav. Parodyti deformacijų intensyvumai $\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_e^M}$. Didžiausias intensyvumas

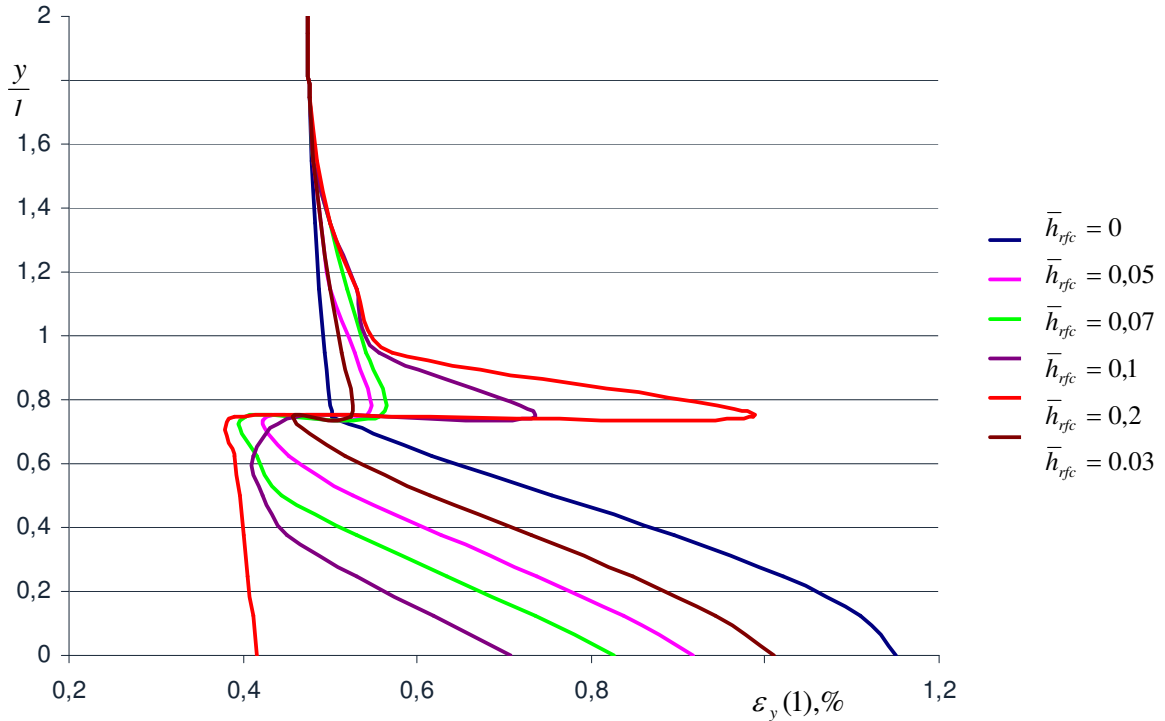
gaunamas priklausomai nuo minkšto tarpsluoksnio storio \square , minkštos tarpsluoksnio centre, arba minkštos ir kietos medžiagos sujungime. Didėjant \square didėja ir intensyvumas.



4.11 pav. Įtempimų pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle (tarpsluoksniu) išilgai y (η) ašies, kai $\gamma = 1.2$; $L = 5$.



4.12 pav. Įtempimų pasiskirstymas suvirintame sujungime su minkšta plokščia siūle (tarpsluoksniu) išilgai y (η) ašies, kai $\gamma_N = 1.2$; $L = 5$.



4.13 pav. Deformacijų intensyvumo pasiskirstymas išilgai suvirinto sujungimo su minkšta siūle, kai : $\alpha = 0.75$, $L = 5$, $2l = 10$, $r = 1$ mm, $\gamma_e = 1.35$

(4.11) pav. Parodyti deformacijų intensyvumai $\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_e^M}$. Didžiausias intensyvumas

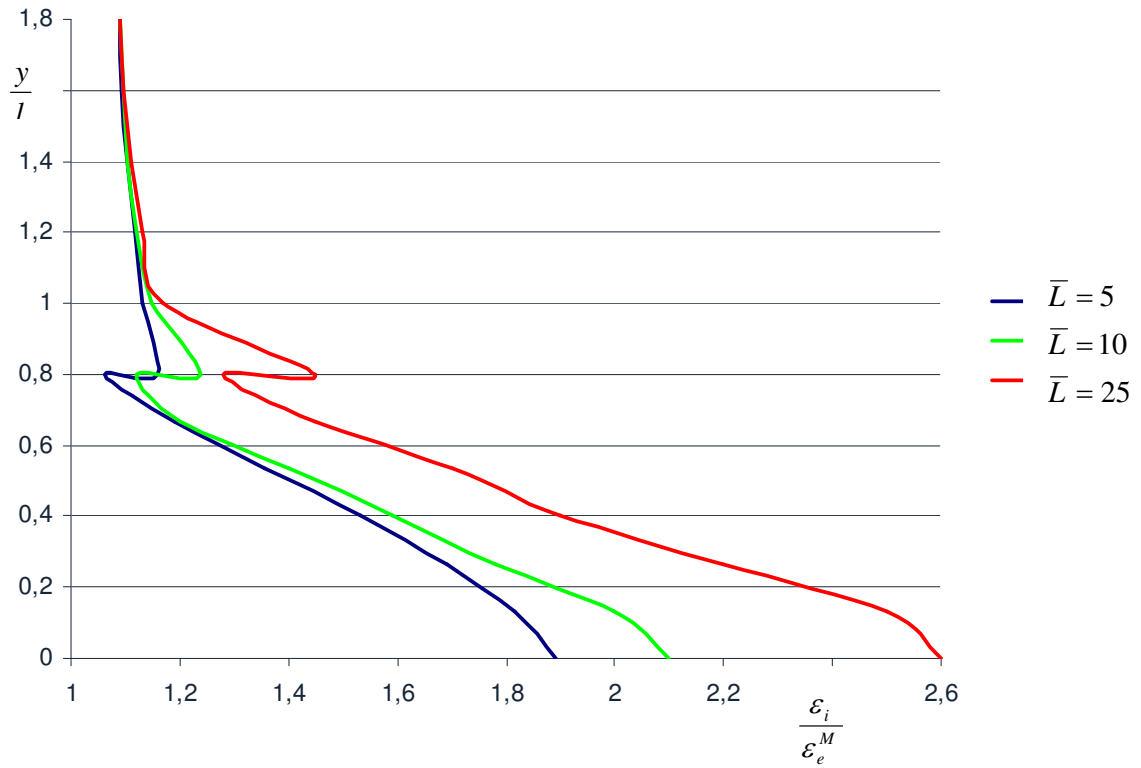
gaunamas priklausomai nuo minkšto tarp sluoksnio storio \square , minkštos tarp sluoksnio centre, arba minkštos ir kietos medžiagos sujungime. Didėjant \square didėja ir intensyvumas.

Deformacijos ε_y , kai rumbelės aukštis $\bar{h}_{rfe} = 0.06$ didžiausios minkšto tarp sluoksnio M centre (4.12 pav.). Be to didėjant nevienalytiškumui įtempimai ε_y taip pat didėja.

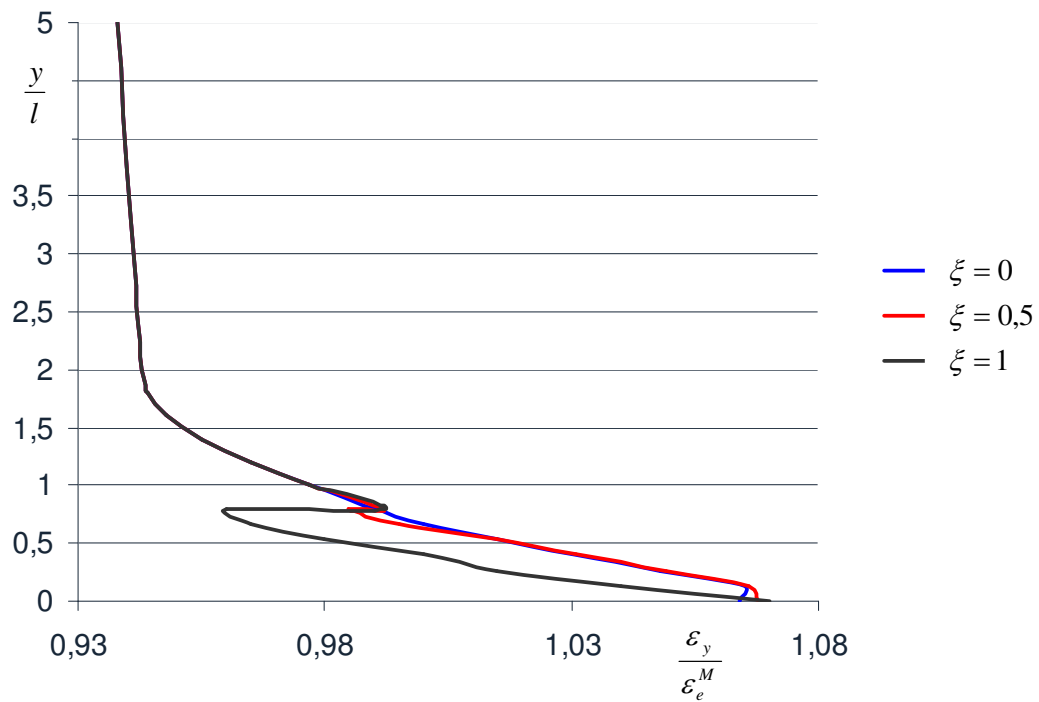
Norint gauti stipriausia sujungimą, reikia parinkit optimalią rumbelę \bar{h}_{rfe} - kad deformacijos pasiskirstytu vienoda M medžiagos centre ir M ir H medžiagos sandūroje. Kai yra supaprastinta siūlė $\bar{h}_{rfe} = 0$, tai didžiausios deformacijos būna M medžiagos centre. Didinant \bar{h}_{rfe} deformacijos M medžiagos centre mažėja, o didėja M ir H medžiagų sandūroje (4.13 pav.).

Didinant deformavimo bazės ilgį \bar{L} (4.14 pav.) deformacijų intensyvumas suvirstame sujungime didėja.

(4.15 pav.) Parodytos deformacijų priklausomybės skirtinguose tarp sluoksnio gyliuose. Deformacijos didėja artėjant prie tarp sluoksnio centro,



4.14 pav. Deformacijų intensyvumo pasiskirstymas išilgai suvirinto sujungimo su minkšta siūle, kai : $\alpha = 0.8$, $2l = 10$, $r = 1$ mm, $\gamma_e = 1.7$



4.15 pav. Deformacijų pasiskirstymas išilgai suvirinto sujungimo su minkšta siūle, kai : $\alpha = 0.8$, $2l = 10$, $r = 0.48$ mm, $\gamma_e = 1.2$

IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

Atlikus suvirintojo sujungimo su minkštu plokščiu realiu tarp sluoksniu įtempimų ir būvio analizę pastebėta, kad:

1. Mechaniskai nevienalyčiuose suvirintuose sujungimuose tampriai plastiškai deformuojantis minkštesniam metalui M , jo deformacijas varžo kietesnis metalas H . Dėl šių medžiagų tarpusavio sąveikos ties jų kontakto plokštuma realizuojasi erdvinis įtempimų būvis.
2. Didėjant mechaninio nevienalytiškumo koeficientui γ , didėja įtempimų deformacijų būvio erdviškumas ir pasireiškia minkštos medžiagos sustiprėjimo efektas. Jis priklauso nuo santykinio siūlės storio ir koeficiento γ_N
3. Priklausomai nuo minkšto tarp sluoksnio storio a , keičiasi įtempimų ir deformacijų būvio erdviškumas. Didėjant minkšto tarp sluoksnio storiui a įtempimų ir deformacijų būvio erdviškumas mažėja. O tuo pačiu mažėja minkštos medžiagos sustiprėjimas. Kai $a \geq 1,2$, sujungimo stiprumas tampa lygus minkšto tarp sluoksnio metalo stiprumui.
4. Labiausiai apkrautos suvirinto sujungimo su minkštu tarp sluoksnio zonos :
 - minkštame metale:
minkšto tarp sluoksnio centre,
kraštiniame kontakto plokštumos taške $\xi^* = 1$;
 - kietame metale:
kraštiniame kontakto plokštumos taške $\xi^* = 1$.
5. Sujungime su realia plokščia siūle (siūle su rumbele) rumbelės pradiniam taške pasireiškia įtempimų koncentracija. Koncentracijos koeficientas didėja, didėjant rumbelės santykiniam aukščiui ir mažėja, mažėjant jos suapvalinimo spinduliui r pradiniam taške.
6. Rekomenduojame pasirinkti tokį santykinį rumbelės aukštį $h_{r/c}$, kuriam esant įtempimų intensyvumas minkštos medžiagos centre ir rumbelės pradiniam taške būtų vienodas.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Bražėnas A. Strength and Low Cycle Fatigue of Mechanically Heterogeneous Butt Welded Joints, Monograph. – Kaunas, 2002. – 284 p.
2. Bražėnas A. Tamprumo ir Plastiškumo Teorijų Pagrindai – Šiauliai, 2003. – 61,66 p.
3. Нейбер Г. Концентрация напряжений – Москва. 1947. – 204 с.
4. Vaičiulis D. Tempriamų (gniuždomų) mechaniškai nevienalyčių žiedinio skerspjūvio suvirintųjų sujungimų statinis ir ciklinis tampriai plastinis deformavimas ir suirimas. Daktaro disertacijos santrauka. – Kaunas: 2001. – 30 psl.
5. Бакши О.А., Кульневич Т.В. Влияние геометрии разделки стыкового шва на несущую способность сварного соединения при растяжении // Сварочное производство – 1970.
6. Бакши О.А. О напряженном состоянии мягких прослоек в сварных соединениях при растяжении // Вопросы сварного производства: Тр. Челбинского политех. Инта. – 1965.
7. Daunys M. Ciklinis Konstrukcijų Stiprumas ir Ilgaamžiškumas, - Kaunas, 2005.
8. Bražėnas A., Daunys M. The stress strain state and plasticity of mechanically heterogeneous joints with a flat interlayer subjected to tension (compression). ISSN 1392 – 1207. – Mechanika. – Kaunas : Technologija, 1995, Nr. 1, p.5-13.
9. Bražėnas A., Vaičiulis D. The strain state of mechanically heterogeneous welded joint with the real square weld subjected to tension at plane deformation. ISSN 1392 – 1207. Mechanika. – Kaunas : Technologija, 2005, Nr. 1, p.12-17.
10. Даунис М.А., Браженас А.П., Сопротивление деформированию и разрушению механически неоднородных сварных соединений при однократном нагружении // Проблемы прочности. – 1979. –No 12. –с. 53-58.
11. Качанов Л.М. О напряженном состоянии пластической прослойки // Известия АН СССР. ОТН. Механика и машиностроение. -1962. –No 5. –с. 63–67.
12. Bražėnas A., Vaičiulis D., Programa „Plokštė“ (versija 1.0 beta) KTU, Panevėžio Institutas, 2005.