



4 dalis.
GAMYBA IR TAIKYMAS INŽINERINĖJE PRAKTIKOJE

TEMA 4.03. SUVIRINIMO ĮTEMPIAI, DEFORMACIJOS IR POSLINKIAI

J. BENDIKAS

Vilnius
2007

IV.4.03	SUVIRINIMO ĮTEMPIAI, DEFORMACIJOS IR POSLINKIAI	IWT
---------	---	-----

Turinys

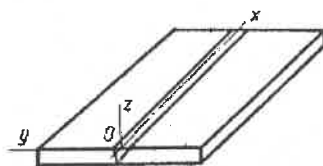
4 dalis.....	1
TEMA 4.03. SUVIRINIMO ĮTEMPIAI, DEFORMACIJOS IR POSLINKIAI	1
Turinys.....	2
1. Suvirinimo įtempių ir deformacijų susidarymas ir nustatymas	3
2. Liekamųjų įtempių pasiskirstymas suvirintuosiuose jungtyse	9
3. Deformacijos ir poslinkiai suvirinamos jungties srityje	11
4. Suvirintų konstrukcijos elementų deformacijos tipai	16
5. Konstrukcijų suvirinimo įtempių, deformacijų ir poslinkių mažinimo metodai.....	19
Literatūros sąrašas.....	20

SUVIRINIMO ĮTEMPIAI, DEFORMACIJOS IR POSLINKIAI

1. Suvirinimo įtempių ir deformacijų susidarymas ir nustatymas

1.1 Bendros žinios

Suvirinimo įtempių ir deformacijų teorijoje naudojamas 1 pav. pateiktas koordinatinių ašių išdėstymas. Ox – ašis nukreipta išilgai virintinei siūlei; Oy – statmenai siūlei plokštėlės plokštumoje; Oz – statmenai siūlei plokštėlės storio kryptimi. Įtempiai ir deformacijos žymimi pagal koordinatinių ašių kryptis: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$; deformacijos $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ ir poslinkių taškai Ox ašimi – u, Oy – v, Oz – w.



1 pav. Koordinatinių ašių išdėstymas suvirintojoje jungtyje

Suvirinamo metalo plėtimasis ir susitraukimas dėl kaitimo arba aušimo, taip pat dėl struktūrinių virsmų sudaro savąsias arba vidines deformacijas ir įtampius. Skirtingai nei dėl apkrovų atsiradusios deformacijos ir įtempiai, savieji įtempiai ir deformacijos egzistuoja medžiagoje ir kai nėra jokių apkrovų.

Savieji įtempimai – tai tokie įtempiai, kurie egzistuoja medžiagoje kai prie jos nėra pridėta jėga.

Deformacijos gali būti tokios:

1. Temperatūrinė deformacija ϵ_a :

$$\epsilon_a = \alpha T, \quad (1)$$

čia α – linijinio plėtimosi koeficientas, kuris keičiasi temperatūros intervale nuo 0 iki T . Jis apima ir struktūrinių virsmų įtaką;

T – temperatūros pasikeitimas bet kokiame medžiagos taške.

2. Stebimos deformacijos ϵ , ir γ , charakterizuoja kūno matmenų pasikeitimą – linijinių ir kampinių, kurie registruojami matavimo priemonėmis.

3. Savosios (vidinės) deformacijos susideda iš tampriųjų ϵ_{tamp} , γ_{tamp} ir plastinių ϵ_{plast} , γ_{plast} .

Išvardinti deformacijų tipai tarpusavyje susiję šiomis lygybėmis:

$$\epsilon_s = \epsilon_{tamp} + \epsilon_{plast} + \epsilon_a, \quad (2)$$

$$\gamma_s = \gamma_{tamp} + \gamma_{plast}. \quad (3)$$

Jei prieš kaitinimą arba aušinimą metalas buvo plastiškai deformuotas, tai formulės (2) ir (3) papildomos pradinėmis deformacijomis ϵ_0 ir γ_0 :

$$\epsilon_s = \epsilon_{tamp} + \Delta\epsilon_{plast} + \epsilon_a + \epsilon_0, \quad (4)$$

$$\gamma_s = \gamma_{tamp} + \Delta\gamma_{plast} + \gamma_0. \quad (5)$$

čia $\Delta\epsilon_{plast}$ ir $\Delta\gamma_{plast}$ – plastinių deformacijų prieaugis nagrinėjamo proceso metu.

Savieji įtempimai klasifikuojami pagal įvairius požymius. Pagal atsiradimo priežastį įtempiai skirstomi į atsiradusius: dėl tampriojo arba plastinio deformacijos mechanizmo surenkant, montuojant, remontuojant; dėl tampriųjų arba plastinių deformacijų netolygaus detalių įkaitimo metu; dėl netolygaus kūno tūrio pasikeitimo fazinių virsmų metu. Pagal egzistavimo trukmę jie gali būti laikini, egzistuojantys tik technologinės operacijos ar proceso metu, ir liekamieji, kurie išlieka ilgą laiko tarpą. Savieji įtempimai būna vienašiai (linijiniai), dviašiai (plokštieji) ir triašiai (erdviniai). Priklausomai nuo tūrio, kuriame jie veikia ir

nuo dydžio, įtempimai gali būti pirmos rūšies (veikiantys makrotūryje), antros rūšies (apimantys grūdėlius) ir trečios rūšies (veikiantys kristalinėse gardelėse).

Pirmos rūšies savieji įtempimai gali būti išreikšti per tampriąsias deformacijas:

$$\sigma_x = 2G \left(\epsilon_{xtamp} + \frac{3\mu}{1-2\mu} \epsilon_0 \right); \sigma_y = 2G \left(\epsilon_{ytamp} + \frac{3\mu}{1-2\mu} \epsilon_0 \right); \sigma_z = 2G \left(\epsilon_{ztamp} + \frac{3\mu}{1-2\mu} \epsilon_0 \right);$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy,tamp}; \tau_{yz} = G\gamma_{yz,tamp}; \tau_{zx} = G\gamma_{zx,tamp}; \quad (6)$$

$$\text{čia: } G = \frac{E}{2(1+\mu)}; \epsilon_0 = \frac{\epsilon_{xtamp} + \epsilon_{ytamp} + \epsilon_{ztamp}}{3}$$

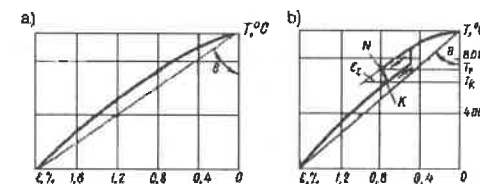
1.2 Metalų savybės esant aukštai temperatūrai

Skaičiuojant savuosius įtempimus dažnai tenka naudotis metalo, esančio aukštoje temperatūroje, savybių charakteristikomis (1 lentelė).

1 lentelė. Šilumos fizikinės kai kurių metalų savybės

Medžiaga	$\alpha \cdot 10^{-6}, K^{-1}$	$T_{vid}, ^\circ C$ ($\lambda, c\lambda$)	$\lambda, W/(mK)$	$c\gamma, MJ/m^3K$
Mažaaanglis ir mažai legiruotas plienas	12...16	500...600	38...42	4,9...5,2
Austenitiniai chromnikeliniai plienai	16...20	600	25...33	4,4...4,8
Aliuminis	23...27	300	270	2,7
Techninis titanas	8,5	700	17	2,8

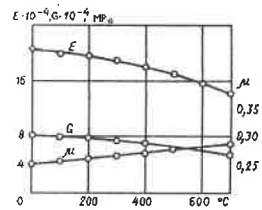
α – linijinis plėtimosi koeficientas;
 λ – šiluminis laidumas;
 $c\lambda$ – tūrinis šilumos imlumas.



2 pav. Metalų be struktūrinių virsmų (a) ir su struktūriniais virsmais (b) dilatogramos

Metalų, kuriame nevyksta struktūriniai virsmai, bandinio ilgis keičiasi monotoniškai, todėl nebūtina naudoti momentinės reikšmės $\alpha = d\epsilon/dT$, o imama $\alpha = \epsilon/T = tg(\Theta)$ (2 pav., a). Angliniame ir legiruotame pliene vyksta struktūriniai virsmai ir jų grafikas turi sudėtingą charakterį (2, b pav.). Aušinant metalą nuo aukščiausios temperatūros iki taško N – struktūrinių virsmų pradžios – vyksta monotoniškas bandinio susitraukimas, o vėliau, nežiūrint, kad metalas toliau aušinamas, gaunamas bandinio pailgėjimas. Pasibaigus struktūriniams virsmams (taškas K), bandinys toliau traukiasi. Struktūrinių virsmų pradžios ir pabaigos temperatūrų padėtis dilatogramoje priklauso nuo metalo cheminės sudėties ir aušimo greičio. Kuo didesnis aušimo greitis, tuo struktūriniai virsmai vyksta žemesnėse temperatūrose. Nuo metalo sudėties ir aušimo greičio taip pat ir priklauso struktūrinio virsmo deformacija ϵ_s (2 pav., b).

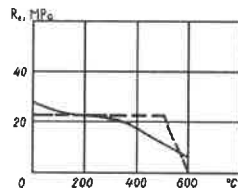
Mechaninės metalo savybės taip pat priklauso nuo temperatūros. Tamprumo E ir šlyties G modulių reikšmės mažėja didėjant temperatūrai, kai tuo metu Puasono koeficientas μ didėja (3 pav.).



3 pav. Anglinio plieno (0,25 % C) tamprumo modulių E , G ir puasono koeficiento μ priklausomybė nuo temperatūros

Tempimo įtempių priklausomybė nuo deformacijos kylant temperatūrai sudėtinga. Jei priimama, kad medžiaga yra idealiai tampriai plastiška (4 pav.), tuomet diagrama gali būti aprašyta tik dviem charakteristikomis – tamprumo moduliui E ir takumo riba R_e : $\epsilon_e = R_e/E$.

5 pav. pavaizduoti kai kurių metalų R_e priklausomybės nuo temperatūros grafikai (išsitiesinė linija). Kartais šias sudėtingas kreives tikslinga supaprastinti (punktyrinės linijos). Mažaanglio plieno takumo riba keičiantis temperatūrai nuo 0 iki 500°C išlieka pastovi, o toliau nukrenta iki 0, kai $T = 600^\circ\text{C}$. Tačiau realiai net temperatūrose $T > 600^\circ\text{C}$, takumo riba nėra lygi nuliui.



5 pav. Metalų takumo ribos priklausomybė nuo temperatūros: 1-mažaanglis plienas, 2-titano lydinys

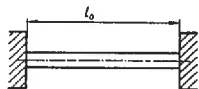
1.3 Įtempių ir deformacijų susidarymas kaistant ir auštant

Išnagrinėsime galuose įtvirtinto strypo (6 pav., a) įtempių pasikeitimus jį įkaitinant iki 500°C ir po to ataušinant. Priimame, kad mažanglio plieno tamprumo modulis E ir takumo riba R_e kinta keičiantis temperatūrai. Deformacijų dydžiui nustatyti naudosime 2 formulę, o įtempiams:

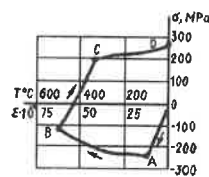
$$\sigma = E\epsilon_{\text{tampr}} \quad (7)$$

Galuose įtvirtinto strypo deformacija ϵ_s lygi nuliui. Tuomet visa savoji deformacija:

$$\epsilon = \epsilon_{\text{tampr}} + \epsilon_{\text{plast}} = -\epsilon_{\text{tr}}, \quad (8)$$



a)



b)

6 pav. Įtempių susidarymas standžiai galuose įtaisytame strype: a – bandymo schema, b – įtempių ir deformacijos strype iš mažanglio plieno

Kaitinant $\epsilon_{\alpha} > 0$, tai pagal (8) $\epsilon = \epsilon_{\text{tampr}} + \epsilon_{\text{plast}} < 0$. Todėl kreivė iš taško 0 eina į kairę į žemyn. Skaičiavimuose naudojama reali R_e priklausomybė nuo temperatūros, o tamprumo modulis keičiasi kaip pavaizduota 3 pav., linijinį plėtimosi koeficientą priimame kaip nepriklausantį nuo temperatūros diapazone nuo 0... 600°C ir lygų $12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; temperatūra matuojama nuo 0°C. Kol įtempių σ nepasiekia takumo ribos taške A, kuris atitinka maždaug 100°C, plastinių deformacijų nebus. Atkarpa OA nėra tiesinė linija todėl, kad didėjant temperatūrai tamprumo modulis E šiek tiek sumažėja ir tarp įtempių ir ϵ_{tampr} nėra tiesinės priklausomybės. Taške A įtempių pasiekia takumo ribą. Toliau didėjant temperatūrai, įtempių R_e , nors ir visa deformacija $\epsilon = -\epsilon_{\alpha}$, didėja. Intervale AB mažėjant R_e , įtempių sumažėja. Taške B strypo kaitinimas sustabdoma ir strypo plastinė deformacija ϵ_{plast} bus:

$$\epsilon_{\text{plast B}} = -\epsilon_{\alpha B} - \epsilon_{\text{tampr B}}, \quad (9)$$

čia: $\epsilon_{\text{plast B}} = -R_{eB}/E_B$; R_{eB} ir E_B – metalo takumo riba ir tamprumo modulis temperatūroje T_B .

Pradėjus aušinti, plastinių deformacijų atskaitą strype reikia pradėti iš naujo. Plastinė deformacija $\epsilon_{\text{plast B}}$ 4 formulėje taps pradine deformacija $\epsilon_{0 \text{ plast}}$. Stebimoji deformacija lygi nuliui, todėl:

$$\epsilon_{\text{tampr}} + \Delta\epsilon_{\text{plast}} = -\epsilon_{\alpha} - \epsilon_{0 \text{ plast}} = \epsilon. \quad (10)$$

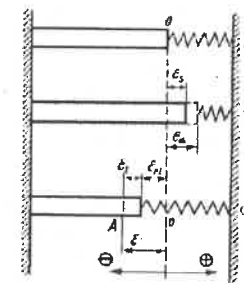
Atkarpoje BC įtempių keičia ženklą ir, kol visa deformacija $\epsilon < R_e/E$, plastinių deformacijų nebus, t.y. $\Delta\epsilon_{\text{plast}} = 0$. Taške C pradeda atsirasti plastinės deformacijos ir, iki visiško ataušimo (taškas D), įtempimai lieka lygūs metalo takumo ribai, kurios dydis kinta priklausomai nuo temperatūros (žr. 5 pav.). Visiškai ataušus $\epsilon_{\alpha} = 0$. Liekamoji plastinė deformacija bus lygi kaitinimo metu gautos plastinės deformacijos ir ataušimo metu gauto plastinės deformacijos prieaugio algebrinei sumai.

$$\epsilon_{0 \text{ plast}} + \Delta\epsilon_{\text{plast D}} = -\epsilon_{\text{plast D}} = -R_{eD}/E_D. \quad (11)$$

Liekamoji plastinė deformacija neigiama (sutrumpėjimo deformacija). Jei ištempto strypo galą atlaisvinti nuo įtvirtinimo, tai strypo ilgis sutrumpės dydžiu R_{eD}/E_D .

6 paveiksle, b horizontalioje ašyje yra atidėta temperatūrinė deformacija $\epsilon_{\alpha} = \alpha T$. Jei α reikšmę, kuriame nors temperatūros intervale, priimti pastovia, tuomet ant horizontalios ašies galima atidėti ir temperatūras.

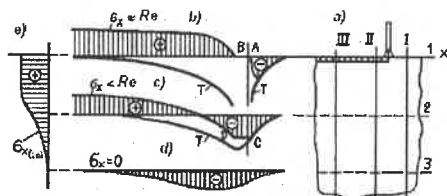
Suvirintų plokštelių metalo sluoksniai nėra standžiai įtvirtinti, nes jungties gretimi metalo sluoksniai gali deformuotis. Realiausiai tai atitinka strypo, kurio vienas galas pritvirtintas prie spyruoklės ir kuri remiasi į standžią sienelę, modelis. 7 pav., a spyruoklė neįtempta. Strypą pakaitinus (7 pav., b), jis pailgės, bet stebimoji deformacija ϵ_s bus mažesnė už temperatūrinę deformaciją ϵ_{α} , nes spyruoklė priešinas strypo pailgėjimui. Savoji deformacija ($\epsilon_s - \epsilon_{\alpha}$) bus neigiama, ir todėl strype bus gniuždymo įtempimai. Jei šie įtempimai pasiekia takumo ribą, tai strypas bus susodinamas. Visiškai ataušus strypas bus trumpesnis nei buvo iš pradžių (7 pav., c). Tačiau spyruoklė neleis sutrumpėti strypui iki taško A. Lyginant su pradiniu strypo ilgiu, dabar bus: plastinė sutrumpėjimo deformacija $\epsilon_{\text{plast } \alpha}$, atsiradusi kaitinant su neigiamu ženklu; neigiama stebimoji deformacija ϵ_s ; teigiama tamproji deformacija ϵ_{tampr} , kuri strype sudarys liekamuosius tempimo įtempius $\sigma = E\epsilon_{\text{tampr}}$.



7 pav. Su spyruokle įtvirtinto strypo deformacija

Naudojanti plokščių pjūvių hipoteze galima nustatyti įtempius labai plačioje plokštėlėje, kurios briauna juda šilumos šaltinis (8 pav., a). Susitarta, kad pjūviai I, II, III nesikraipo ir nejuda vienas kito atžvilgiu. Tiriami tik σ_x įtempiai. Išilginiuose pjūviuose 1, 2 ir 3 bus skirtingi šiluminių ciklai (8 pav., b, c). Laikinieji

įtempiai σ_x priklausys nuo temperatūros ir jos keitimosi pobūdžio. 8, b paveiksle aukštų temperatūrų srityje, kuomet takumo riba artima nuliui, atkarpoje AB įtempių nėra, o toliau atsiranda įtempiai artimi takumo ribai. 8 pav., c 2 pjūvyje CD atkarpoje gniuždymo įtempiai lygūs takumo ribai, kurie vėliau keičia savo ženklą, bet aušimo metu takumo ribos jie nebesiekia. 3 pjūvyje temperatūra nėra aukšta ir įtempiai nepasiekia plastinių deformacijų (8 pav., d), ir visiškai ataušus įtempių šiame taške nėra. Liekamųjų įtempių skerspjūvyje epiūra pavaizduota 8 pav., e



8 pav. Laikinių ir liekamųjų įtempių susidarymas judant šilumos šaltiniui plačios juostos briauna

1.4 Savųjų įtempių nustatymas

Nustatant suvirintų jungčių įtempius, priimama visa eilė prielaidų.

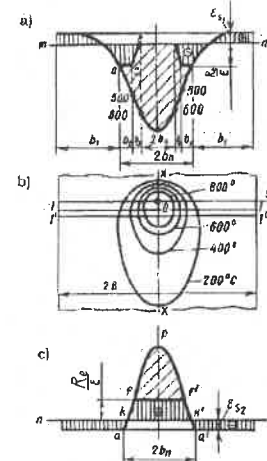
1. Skačiuojami tik išilginiai įtempiai σ_x . Skersiniai σ_y ir tangentiniai τ_{xy} laikomi lygiais nuliui.
2. Skerspjūviai plokšti, bet gali vienas kito atžvilgiu persislinkti.
3. Mažaanglio plieno takumo ribos priklausomybė nuo temperatūros idealizuota kaip 1 punktyrinę liniją 5 pav.
4. Medžiaga yra idealiai tampriai plastiška (žr. 4 pav.).
5. Tamprumo modulis E išlieka pastovus visame temperatūros intervale.
6. Suvirinamos plokštės, kurių kiekvienos plotis B , yra labai ilgos. Temperatūra plokštės storyje pasiskirsto tolygiai.

9 pav., b pavaizduotas kvazistacionarus temperatūrų pasiskirstymas, virinant ilgą plokštę x-x kryptimi. Deformacijos ir įtempiai tiriami tik dviejuose pjūviuose: didžiausiam 600°C izotermos plotyje 1-1 pjūvyje ir 2-2 pjūvyje, kuriame metalas visiškai ataušęs (pjūvis 2-2 paveikslėlyje neparodytas). Prieš suvirinimą plokštės sukabinamos todėl negali pasisukti viena kitos atžvilgiu.

Savųjų įtempimų ir deformacijų pasiskirstymui 1-1 pjūvyje nagrinėti naudojama 4 formulė. Pradinė deformacija $\epsilon_{0\text{plast}}$ prieš suvirinimą buvo lygi nuliui, o temperatūrinė deformacija nagrinėjame pjūvyje $\epsilon_{\alpha} = \alpha T$. Tuomet pertvarkius (4) formulę, gauname:

$$\epsilon_{\text{tamp1}} + \Delta\epsilon_{\text{plast1}} = \epsilon_{S1} - \epsilon_{\alpha1} = \epsilon_{S1} - \alpha T, \quad (12)$$

Grafiškai sprendžiame lygybę 12. Šalia 1-1 pjūvio paimkime kitą pjūvį 1'-1', kuris vienietiniu atstumu būtų nutolęs nuo pirmojo. Išskirtos juostelės temperatūrinė deformacija αT ašies kryptimi yra αT . Lygybės 12 kairėje pusėje esančias $-\alpha T$ reikšmes (neigiamas) atidedame žemyn ir nubrėžiame storą kreivę (9 pav., a). Dabar būtina nustatyti ϵ_{S1} . Pagal 2 sąlygą skerspjūviai neišsikraipo, todėl juostelės tarp 1-1 ir 1'-1' stebimoji deformacija bus ta pati visame plokštės $2B$ plotyje. Linijos m-m', nustatančios ϵ_{S1} reikšmę, padėtis gali būti nustatyta nuoseklaus artėjimo būdu, laikantis sąlygos, kad savieji įtempiai turi būti pusiausvyroje. Žinoma, kad esant vienašiam įtemptam būviui, savieji įtempimai yra proporcingi tampriai deformacijai $\sigma = \epsilon_{\text{tamp}} E$. Todėl pakanka gauti subalansuotą tampriųjų deformacijų epiūrą, kad turėtume subalansuotus savuosius įtempimus. Po to, kai jau turime m-m' liniją, rodančią spėjamą ϵ_{S1} reikšmę, žemiau atidedame tampriąsias deformacijas $\epsilon_{\text{tamp}} = \sigma/E = \sigma_T/E$ ir nubrėžiame horizontalią liniją ac ($\sigma_T = \text{const.}$) iki $T = 500^\circ\text{C}$ (5 pav.). Intervale $500 \dots 600^\circ\text{C}$ takumo riba kinta pagal linijinę priklausomybę, todėl atkarpoje ce tamprioji deformacija sumažėja iki nulio ir esant $T \geq 600^\circ\text{C}$ lieka lygi nuliui.



9 pav. Vienašį suvirinimo įtempių nustatymas: a - išilginių deformacijų pjūvyje 1-1 epiūra, b - temperatūrų pasiskirstymas suvirinimo metu, c - išilginių deformacijų, atsiradusių aušimo metu, epiūra

Kaitinamo metalo sluoksnių sutrumpėjimo deformacija ir turėjo neigiamą ženklą, tai $-\epsilon_{0\text{plast2}} = -\epsilon_{0\text{plast1}}$ bus teigiama ir atidėta į viršų. Ieškoma deformacija ϵ_{S2} bus vienoda visame plokštės plotyje, kadangi remiamės plokščių skerspjūvių hipoteze. Toliau, nukėlus koordinatų pradžią ant linijos n-n', būtina užsiduoti kokį nors neigiamą dydį ϵ_{α} . Kreivės $kfp'k'$ ordinatės išreiškia 13 lygybės kairiąją pusę, t.y. tampriųjų ir priaugusių plastinių deformacijų sumą aušimo metu. Tampriosioms ir plastiniams deformacijoms atskirti atidėkime $\epsilon_T = R_w/E$. Tuomet įstrižai užstrichuota kfp' dalis reikš pailgėjimo plastinių deformacijų padidėjimą $\Delta\epsilon_{\text{plast2}}$ aušimo metu, o vertikaliai užstrichuota epiūros dalis – tampriąsias deformacijas. Jei paaiškės, kad $\int_{-B}^B \epsilon_{\text{tamp2}} dy = 0$, tai linijos n-n' padėtis parinkta gerai. Jei liekamiesiems įtempius proporcinga tampriųjų deformacijų epiūra nėra subalansuota, tai reikia užsiduoti naują linijos n-n' padėtį t.y. naują ϵ_{S2} . Liekamosios plastinės deformacijos lygios plastinių deformacijų įkaitinimo metu $\epsilon_{\text{plast liek}}$ ir plastinių deformacijų priaugio aušimo metu $\Delta\epsilon_{\text{plast1}}$ algebrinei sumai (aff'a") epiūra):

$$\epsilon_{\text{plast liek}} = \Delta\epsilon_{\text{plast1}} + \Delta\epsilon_{\text{plast2}}, \quad (14)$$

Kadangi nagrinėjame atveįje $\Delta\epsilon_{\text{plast1}}$ modulio reikšmė didesnė nei $\Delta\epsilon_{\text{plast2}}$, tai $\epsilon_{\text{plast liek}}$ ženklas sutaps su $\Delta\epsilon_{\text{tamp1}}$ ženklu. Tai reiškia, kad plastinė liekamoji deformacija yra sutrumpėjimo deformacija.

Naudojantis šiuo metodu, galima nustatyti liekamųjų įtempių pasiskirstymą $\sigma_{\text{liek}} = \epsilon_{\text{tamp2}} E$ ir virinamos plokštės santykinį sutrumpėjimą ϵ_{S2} . Kaip rodo skaičiavimai, mažaaangliame pliene liekamieji įtempiai yra tempimo įtempiai ir lygūs takumo ribai. Jie esti siūlės ir terminio poveikio zonos, kurios įkaista iki, palyginti, aukštų temperatūrų. Pagrindiniame metalo, kur temperatūra buvo mažesnė ($200 \dots 300^\circ\text{C}$), liekamieji įtempiai – gniuždymo.

Naudojantis kitais įtempių ir deformacijų nustatymo būdais tiriami keli šalia esantys pjūviai. Tai leidžia sekti tamprių ir plastinių deformacijų keitimąsi suvirinimo proceso metu. Pirmame pjūvyje pradinės deformacijos prilyginamos nuliui. Sekančiuose pjūviuose pradinėmis deformacijomis tampa prieš tai buvusiam pjūvyje gautos deformacijos. 12 lygybė n-tajam pjūviui atrodys taip:

$$\epsilon_{\text{tamp n}} + \Delta\epsilon_{\text{plast n}} = \epsilon_{S n} - \epsilon_{\alpha n} - \epsilon_{0\text{plast n}} \quad (15)$$

9, a pav. tampriųjų deformacijų epiūra užstrichuota vertikaliai, plastinių deformacijų – įstrižai. Jei tampriųjų

deformacijų epiūra subalansuota, t.y. $\int_{-B}^B \epsilon_{\text{tamp}} dy = 0$, tai ϵ_{S1}

parinkta sėkmingai. Jei ne, tai reikia parinkti naują m-m' padėtį ir iš naujo sudaryti epiūrą.

Stebimoji deformacija ϵ_{S1} 9, a pav. yra teigiama, ir tai reiškia, kad suvirinimo metu metalui kaistant plokštė pailgėjo. Tampriosios pailgėjimo deformacijos pateiktos su teigiamu ženklu, o sutrumpėjimo deformacijos – su neigiamu. b_1 pločio zonos yra tik tampriosios deformacijos, b_2 ir b_3 – tampriosios ir plastinės, b_4 – tik plastinės deformacijos. b_2, b_3 ir b_4 zonos sudaro taip vadinamą plastinės deformacijos zoną $2b_n$.

Tam, kad nustatyti liekamąsias deformacijas ir įtempius, reikia panagrinėti ataušusią iki 0°C plokštę, t.y. išsiaiškinti deformacijų pasiskirstymą pjūvyje 2-2. Tam reikia panaudoti 4 lygybę.

Į 4 lygybę įstačius nagrinėjamo būvio indeksus, gauname:

$$\epsilon_{\text{tamp2}} + \Delta\epsilon_{\text{plast2}} = \epsilon_{S2} - \epsilon_{\alpha2} - \epsilon_{0\text{plast2}}, \quad (15)$$

Visiškai ataušus plokštei iki $T = 0^\circ\text{C}$, tuomet $\epsilon_{\alpha2} = 0$.

Kad būtų nustatyti liekamąsias deformacijas ir plastinės deformacijos $\Delta\epsilon_{\text{plast2}}$, naudosisime grafinį metodą. 9, c paveiksle stora linija atidėsimė $-\epsilon_{0\text{plast2}}$ epiūrą. Pradinės deformacijos $\epsilon_{0\text{plast2}} = \Delta\epsilon_{\text{plast1}}$ 1-1 pjūvyje. Kadangi plastinė deformacija $\Delta\epsilon_{\text{plast1}}$ buvo

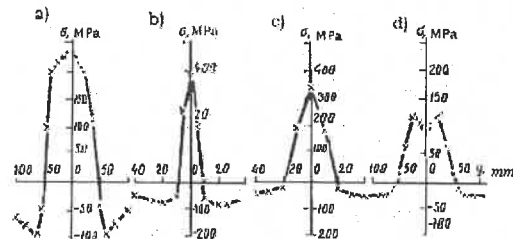
Čia pradinė deformacija gali būti pateikta kaip plastinė deformacija, atsiradusi praėjus etape:

$$\varepsilon_{0,plast,n} = \varepsilon_{plast,(n-1)} + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta \varepsilon_{plast,i} \quad (16)$$

Einant nuo pjūvio prie pjūvio, kiekviename galima gauti tampriųjų deformacijų ir įtempių pasiskirstymą, taip pat regimus deformacijas.

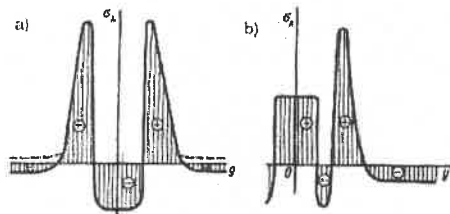
2. Liekamųjų įtempių pasiskirstymas suvirintuosiuose jungtyse

Liekamųjų įtempių pasiskirstymas suvirintuosiuose jungtyse yra labai netolygus. Stabiliausias įtempių pasiskirstymas yra siūlės ašies kryptimi σ_x . Gaminių, virintų 1–3 ėjimais, kurių storis 15–20 mm ir kurių struktūriniai virsmai baigiasi aukštoje temperatūroje, įtempių pasiskirstymas pateiktas 10 pav. Mažaanglių ir austenitinių plienų didžiausi įtempiai yra siūlėje ir priesiūlės srityje. Jie apytiksliai yra lygūs takumo ribai. Titano ir aliuminio lydinų maksimalūs įtempiai gali siekti $(0,5-0,8)R_e$. Didesni įtempiai atsiranda virinant galingais šaltiniais ir dideliais greičiais. Plastinės deformacijos srityje veikia tempimo įtempiai. Už šios zonos ribų veikia gniuždymo įtempiai, kurie mažai keičiasi plokštės plotyje. Dėl plokštės išsitraipymo suvirinimo metu arba dėl linkio, toliau nuo siūlės ašies esantys įtempiai σ_x gali būti lygūs nuliui, ar net pereiti į tempimo įtempius.



10 pav. Liekamųjų įtempių pasiskirstymas virintinės siūlės srityje: a – mažanglis plienas S275 ($t = 8$ mm); b – austenitinis plienas X12CrNiTi 18-9 ($t = 2$ mm); c – titano lydinys ($t = 1,5$ mm); d – legiruotas magnio aliuminio lydinys ($t = 10$ mm)

300...400°C temperatūroje vykstantys struktūriniai virsmai iš esmės keičia įtempių charakterį plastinės deformacijos srityje. Centrinėje jungties dalyje, t. y. – siūlėje ir terminio poveikio srityje, kaitimo ir aušimo metu vyko struktūriniai virsmai, dėl kurių, visiškai ataušus jungčiai, turėjo būti gautas tos srities pailgėjimas. Dėl šios priežasties susidarė gniuždymo įtempiai (11 pav., a). Tokį plieną virinant austenitiniu elektrodu, siūlėje susidaro tempimo įtempiai (11 pav., b); terminio poveikio srityje, kurioje įvyko struktūriniai virsmai, susidaro gniuždymo įtempiai. Plastinės deformacijos srityje, kur struktūriniai virsmai nevyko, veikia tik tempimo įtempiai. Už plastinės deformacijos srities ribų pagrindiniame tokio plieno metalo išilginiai įtempiai σ_x yra gniuždymo, bet gali būti ir tempimo (11 pav., a pavaizduota punktyrine linija), jei gniuždymo srities įnašas į centrinę sritį yra žymus.

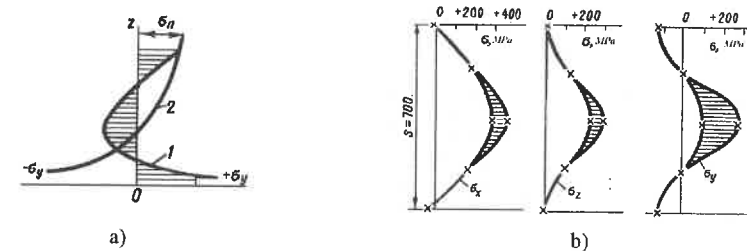


11 pav. Liekamųjų įtempių pasiskirstymo charakteris vidutiniškai legiruotų plienų jungtyse, kuriuose vyksta struktūriniai virsmai: a – pridėtinis metalas toks pat kaip ir pagrindinis; b – pridėtinis metalas – austenitinis plienas

Vienų ėjimų suvirintojoje jungtyje bei išilginių σ_x susidaro ir skersiniai σ_y bei tangentiniai τ_{xy} įtempiai. Dideli tangentiniai įtempiai susidaro didelių σ_x ir σ_y įtempių gradientų vietose, t. y. siūlių galuose.

Storose siūlėse liekamieji įtempiai priklauso nuo suvirinimo būdo ir sluoksnių virinimo eiliškumo. Mažaanglio plieno daugiasluoksnių siūlėse įtempiai artimi R_e . V sandūrinėje siūlėje, virinant neįtvirtintus elementus, įtempių σ_y pasiskirstymas rodo 1 kreivę 12 pav., a. 40–60 mm storio siūlės šaknyje įtempiai σ_y yra dideli dėl didelės plastinės deformacijos. Dėl kiekvieno sluoksnio didėja užvirtintos dalies skersinis susidėjimas ir išlinkimas, siūlės šaknyje sudarydamas tempimo įtempius. Jei virinama siūlė ant plokštės, kuri yra pritvirtinta ir negali kraipytis, tai nuo kiekvieno naujo užvirtinto sluoksnio siūlės šaknyje didės gniuždymo įtempiai. Galų gale siūlės šaknyje susidarys gniuždymo įtempiai $\sigma_y > R_e$ ir paviršiuje tempimo įtempiai $\sigma_x \approx 0,5R_e$ (12 pav., a, 2 kreivė).

Elektrošlakiniu būdu, vienu ėjimu suvirintuose gaminiuose, storesniuose nei 150...200 mm susidaro tūriniai vidiniai įtempiai (12 pav., b) – vidurinėje dalyje visi trys komponentai yra tempimo įtempiai, o paviršiuje – σ_x ir σ_y yra gniuždymo. Toks įtempių susidarymas aiškinamas pagrindinio metalo pasipriešinimu siūlės srities metalo tūrio susitraukimui auštant, taip pat netolygiu temperatūros pasiskirstymu siūlės srities metalo. Auštant centrinė dalis labiau susitraukia ir joje susidaro triašiai įtempiai.

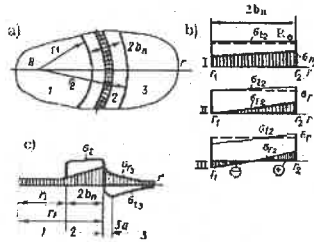


12 pav. Liekamieji įtempiai didelio storio siūlėje: a – daugiasluoksnių siūlėje; b – elektrošlakinio suvirinimo siūlėje

Apskritimines siūles (13 pav., a), kuriomis įvirinami apskritos formos elementai, pasižymi ašiai simetrišku įtempių pasiskirstymu, išskyrus siūlės galo ir pradžios susidūrimo vietas. Tokioje jungtyje išskiriamos trys pagrindinės sritys: vidinė 1, vidurinė 2 ir išorinė 3. 2b₀ pločio 2 sritis, kaip ir tiesių siūlių, yra tempiama, apskritiminių įtempių dydis siekia takumo ribą (13 pav., b). Radialiniai įtempiai srityje 2b₀ nevienodi – σ_{r2} visada bus didesni nei vidinė zona veikiantys įtempiai σ_{r1} . Mažaanglio ir austenitinio plieno 2 zona yra plastiškai deformuota ir atitinka plastiškumo sąlyga:

$$\sigma_{r2}^2 + \sigma_{t2}^2 + \sigma_{r2}\sigma_{t2} = R_e^2 \quad (17)$$

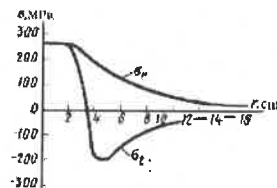
13 pav., b schematiškai pavaizduota keletas galimų įtempių σ_{r2} ir σ_{t2} pasiskirstymo 2 zonoje epiūrų. σ_{r2} ir σ_{t2} visada yra tempimo įtempiai, o σ_{r1} įtempiai gali būti ir tempimo ir gniuždymo. Kokie bus įtempiai priklausys nuo 2 srities skersinio ir apskritiminio susitraukimo santykio. Skersinis susitraukimas sudarys radialinius tempimo įtempius 1 ir 3 srityse (13 pav., c); apskritiminis susitraukimas sudarys 3 srityje tempimo įtempius σ_{r1} ir 1 srityje – gniuždymo. Kai 1 sritis nedidelė, skersinio 2 srities susitraukimo įtaka lyginant su apskritiminiu susitraukimu yra svaresnė, todėl gaunami tempimo įtempiai.



13 pav. Įtempių pasiskirstymas jungtyje su žiedinėmis siūlėmis

Analogiška situacija bus, jei 1 srityje įvirinta standi iki 100...200 mm skersmens detalė. Gniuždymo įtempimai σ_r 1 srityje susidaro, jei 3 srityje privirinamas siauras žiedas.

Įtempių pasiskirstymas taškinio suvirinimo taškuose yra simetriškas ašiai (14 pav.). Auštant centrinei taško daliai, joje susidaro tempimo įtempiai su vienodomis komponentėmis $\sigma_r = \sigma_t = R_e$. Tam tikru atstumu nuo taško centro apskritiminiai tempimo įtempiai σ_r pereina į gniuždančiuosius. Radialiniai tempimo įtempiai, tolstant nuo taško centro, mažėja pagal $1/r^2$ dėsnį. Mažaanglio plieno sritis, kuri įkaito iki 150...200°C, veikia dviašiai įtempiai. Sandūrinio kontaktiniu būdu suvirinto strypo paviršiuje veikia išilginiai gniuždymo įtempiai, o strypo viduryje visomis kryptimis – tempimo įtempiai.

14 pav. Liekamieji įtempiai σ_r ir σ_t taškinėje suvirintojoje jungtyje

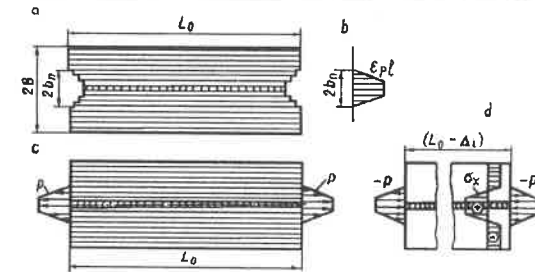
Liekamųjų įtempių tyrimas rodo, kad didžiausi tempimo įtempiai dažnai yra artimi takumo ribai. Kartais jie net viršija R_e (daugiasluoksnių siūlių šaknyje). Kai nėra įtempių koncentratoriaus, plastinės metalo deformacijos virinant sudaro 1...2 %. Kai yra koncentratoriai – šlako intarpai, neįvirinimas, nesulydimas – plastinės deformacijos gali būti labai didelės, viršijančios metalo plastiškumą, todėl toje vietoje gali atsirasti plyšiai. Sudėjus liekamąsias ir darbinės deformacijas gali atsirasti plastinės deformacijos, kurios dažniausiai neturi ženklios įtakos stiprumui.

3. Deformacijos ir poslinkiai suvirinamos jungties srityje

Dėl suvirinimo keičiasi suvirinamų konstrukcijos elementų matmenys ir forma: gali išlinkti, sutrumpėti, prarasti pastovumą, susisukti. Šie iškraipymai pasireiškia poslinkiais, kurie priklauso nuo konstrukcijos formos, siūlių išdėstymo, metalo storio. Įvairūs suvirintų konstrukcijų poslinkiai atsiranda dėl palyginti nedidelio suvirinimo deformacijų tipų skaičiaus. Deformacijos ir poslinkiai suvirintosios jungties srityje priklauso nuo įvedamosios šilumos, temperatūros pasiskirstymo, suvirinamo metalo savybių.

Suvirinimo deformacijas ir poslinkius siūlės srityje galima suskirstyti į penkis tipus.

1. Išilginė liekamoji plastinė deformacija $\epsilon_{pl\ liek}$, sudarančios taip vadinamą susitraukimo jėgą P_{sus} . Nustatant išilginius įtempimus σ_x , buvo gauta liekamųjų plastinių deformacijų $\epsilon_{pl\ liek}$ epiūra. Tam, kad nustatyti P_{sus} priklausomybę nuo $\epsilon_{pl\ liek}$, detaliai išnagrinėsime suvirintos plokštės būseną.

15 pav. Liekamosios plastinės deformacijos $\epsilon_{pl\ liek}$ suvirintoje plokštėje

Supjaustykite $2B$ pločio plokštę išilginėmis juostelėmis tam, kad kiekvieną jų išvaduoti nuo esamų įtempių σ_x (15 pav., a). Juostelių galai išsidėstys taip, kaip pavaizduota paveiksle. Juostelės, esančios už plastinių deformacijos zonos $2b_n$, turės pradinį ilgį L_0 . Šios zonos viduje esančios juostelės bus trumpesnės, nes jose yra liekamoji plastinė deformacija $\epsilon_{pl\ liek}$ su minuso ženklu. Sutrumpėjimas $\Delta L = \epsilon_{pl\ liek} L_0$. Juostelių galai geometriškai atkartos deformacijų epiūrą (15 pav., b). Pridėkime prie sutrumpėjusių juostelių tempimo jėgas p , sudarančias jose įtempius taip, kad visos juostos vėl būtų vienodo ilgio L_0 (15 pav., c):

$$p = -\epsilon_{pl\ liek} E, \quad (18)$$

Juostelės "suklijuokime" tarpusavyje. Tuomet vėl gausime tokios pačios formos plokštę, kurioje plastinės deformacijos srityje veiks įtempiai $\sigma_x = p$. Likusioje plokštės dalyje įtempių nebus. Iš tikro suvirinta plokštė neapkrauta apkrovomis, tačiau suvirintos plokštės ilgis trumpesnis. Todėl galime įsivaizduoti, kad veikia fiktyvi jėga P_{sus} , duodanti plokštės ilgio sumažėjimą (15 pav., c). Integruodami jėgą p plastinės deformacijos sritys $2b_n$ ribose, gausime fiktyvią susitraukimo jėgą P_{sus} . Kadangi $\epsilon_{pl\ liek} < 0$, tai $P_{sus} < 0$:

$$P_{sus} = \int_{-b_n}^{b_n} \epsilon_{pl\ liek} E s dy, \quad (19)$$

čia: s – plokštės storis.

Dėl susitraukimo jėgos P_{sus} atsiras tolygus gniuždimas visame plokštės plote $\sigma_{gn} = P_{sus}/(2Bs)$ ir kartu su įtempiais $\sigma = p$, kurie susidarė $2b_n$ ribose, suformuos liekamųjų savųjų įtempių epiūrą, kurie buvo prieš supjaustant plokštę. Plokštės sutrumpėjimas nuo jėgos P_{sus} veikimo:

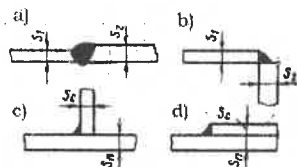
$$\Delta l_{ilg} = P_{sus} L_0 / (2BsE), \quad (20)$$

Virinant legiruotuosius plienus, kuriuose vyksta struktūriniai virsmai, plastinių deformacijų srityje gali būti ir pailgėjimo plastinės deformacijos. Kai kurių plienų jėga P_{sus} gali būti tempianti, t.y. tuo atveju plokštė po suvirinimo pailgėja, o ne patrumpėja. Tačiau dažniausiai ši jėga yra gniuždimas.

Įvairiems plienams ir lydinams yra nustatytos empirinės P_{sus} skaičiavimo formulės priklausomai nuo suvirinimo sąlygų. Mažaangliam ir mažai legiruotam plienui, kurio takumo riba $R_e \leq 300$ MPa, virinant lankiniu suvirinimo būdu sandūrinės, tėjinės ir užleistinės standžių elementų jungtis vienu ėjimu, P_{sus} jėgos reikšmė skaičiuojama pagal formulę:

$$P_{sus,gn} = -[230000/(q_0 + 12600) + 3,58] q/v_s, \quad (21)$$

čia: q – efektyvioji energija, J/s; v_s – suvirinimo greitis, cm/s; $q_0 = q/(v_s s)$ – santykinė įvedamoji suvirinimo šiluma, J/cm²; s – virinamo elemento storis, cm; $s = 0,5(s_1 + s_2)$, kai yra kampinė arba sandūrinė jungtis (16 pav., a, b); $s = 0,5(2s_n + s_c)$, kai yra tėjinė arba užleistinė jungtis (16 pav., c, d). 21 formulė galioja diapazone $q_0 = 4000\text{--}38000$ J/cm².



16 pav. Vienu ėjimu suvirintos jungtys

Virinant keliais ėjimais, pirmųjų sluoksnių plastinės deformacijos sritis gali būti dengiama sekančių sluoksnių plastinės deformacijos sritimis. Virinant tėjinę dvipusę jungtį vienodomis siūlėmis, persidengiančiomis plastinių deformacijų sritimis, suminė susitraukimo jėga sudaro 1,3...1,5 pirmosios siūlės susitraukimo jėgos vertės.

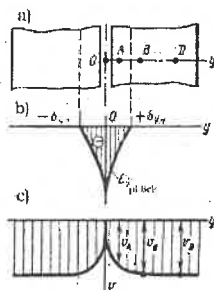
Pjaustant metalą dėl briaunų įkaitimo atsiranda susitraukimo jėga. Dujinio plieno pjaustymo įvedamoji šiluma vienai briaunai, kurios storis $s = 0,6...4,0$ cm:

$$q/v_p = 42600(13,5 - s)s, \quad (22)$$

čia: s išreikšta cm; q/v_p – J/m.

2. *Storyje tolygios skersinės liekamosios plastinės deformacijos $\epsilon_{ypl.liek}$* , kurių integralas duoda skersinį susitraukimą Δ_{sk} . Nuo įkaitimo suvirinant atsiranda ne tik išilginės savosios deformacijos, bet ir skersinės plastinės deformacijos $\epsilon_{ypl.liek}$. Kaitinamas metalas plečiasi, todėl atsiranda gniuždymo įtempimai. Mažiausios R_c reikšmės yra labiausiai įkaitusioje srityje, todėl čia metalui lengviausia plastiškai deformuotis. 17 pav., b pavaizduotas $\epsilon_{ypl.liek}$ pasiskirstymas plokštės plotyje. Jei taškas 0 siūlės ašyje yra nejudantis (17, a pav.), tai galima nustatyti taškų A, B, D poslinkius v siūlės y kryptimi pagal

integralą $\int_0^y \epsilon_{ypl.liek} dy$ (17 pav., c).

17 pav. $\epsilon_{ypl.liek}$ ir v pasiskirstymas plokštėje

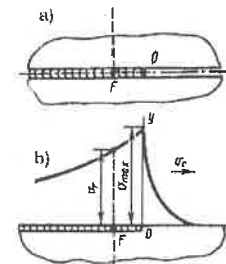
Integravimo viršutinės ribos reikšmės bus y_A , y_B ir y_D . Taškų B ir D poslinkiai siūlės ašies atžvilgiu vienodi, nes skersinių plastinių deformacijų zona yra apribota b_{ym} ir $-b_{ym}$ dydžiais, o taškai B ir D yra už jos ribų. Plokštės plotis sumažėja dydžiu:

$$\Delta_{sk} = \int_{-b_y}^{+b_y} \epsilon_{ypl.liek} dy, \quad (23)$$

Sujungiant plokštės sandūrinio būdu su tarpeliu (18 pav., a), metalas skersine kryptimi plečiasi laisviau, nei virinant vientisą plokštę. Įkaitintos briaunos laisvai juda tarpelio kryptimi, dėl ko atsiranda 18 pav., b pavaizduoti poslinkiai v . Abiejų briaunų galimas didžiausias poslinkis, jei šiluma nebus nuvedama į orą:

$$v_{maks} = \frac{\alpha}{c\gamma} \frac{q}{v_c s}, \quad (24)$$

čia: q – į abi briaunas įvedama šiluma; v_c – suvirinimo greitis; s – lakšto storis; α – linijinio plėtimosi koeficientas; $c\gamma$ – tūrinis šilumos imlumas.



18 pav. Briaunų poslinkis sandūrinėje su tarpeliu jungtyje

Maksimaliai suartėjus briaunoms taške 0, auštant jos juda priešinga kryptimi tol, kol metalo aukšta temperatūra ir žema takumo riba. Ataušęs iki tam tikros temperatūros (taške F) metalas įgauna pakankamą stiprumą, kad būtų gautas jungties skersinis poslinkis $\Delta_{sk} = 2v_F < 2v_{maks}$. Atsižvelgiant į suvirinimo būdą ir sąlygas Δ_{sk} reikšmės gali būti įvairios:

$$\Delta_{sk} = A \frac{\alpha}{c\gamma} \frac{q}{v_c s}, \quad (25)$$

čia: A – empirinis koeficientas. Elektrošlakiniame suvirinime $A = 1,6$; lankinio suvirinimo visiškai įvirintai siūlei $A \approx 1,0...1,2$.

Absoliuti Δ_{sk} reikšmė kinta plačiose ribose priklausomai nuo suvirinimo metu įvestos energijos. Virinant sandūrinę jungtį lankiniu būdu vienu ėjimu Δ_{sk} yra kelios dešimtosios milimetro dalys, kai metalo storis 3–5 mm, o kai metalo storis iki 5–20 mm, $\Delta_{sk} = 0,5-1,5$ mm; virinant elektrošlakiniu būdu $\Delta_{sk} = 3-8$ mm ir daugiau.

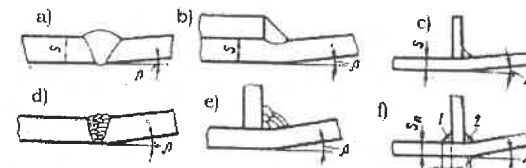
Užleistinėms ir tėjinėms jungtims įvedamoji efektyvi energija apskaičiuojama pagal formulę:

$$q_n = 2qs_H / (2s_n + s_p), \quad (26)$$

čia: s_n – lakšto, į kurį įvedama efektyvioji energija, storis; s_p – antrojo jungties lakšto storis; q – šaltinio visas efektyvusis galingumas.

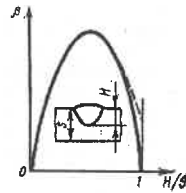
Skersinis susitraukimas gali būti nustatytas eksperimentiniu būdu. Matavimo bazė turi būti didesnė nei įkaistančios iki 150°C zonos plotis (plienui).

3. *Netolygi storyje skersinė plastinė deformacija*, duodanti suvirintos jungties srityje kampinį poslinkį β . Storyje arba daugiasluoksnės siūlės skerspjūvyje netolygios skersinės plastinės deformacijos pasuka vieną plokštės dalį kitos dalies atžvilgiu kampų β (19 pav., a–f).



19 pav. Sandūrinių (a, d), užleistinių (b, e) ir tėjinių (c, f) jungčių kampiniai poslinkiai

Pralaidant plokštę arba virinant kampuotę, kampo β dydis priklauso nuo įvirinimo gylio ir plokštės storio santykio H/s , siūlės įvirinimo formos ir jos pločio (19 pav.).

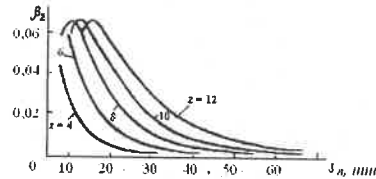


20 pav. β priklausomybė nuo H/s

Esant mažam įvirinimo gyliui, nepravirinta dalis priešinsis siūlės susitraukimui. Kai didelis įvirinimo gylis, $\varepsilon_{\text{pl. lik.}}$ deformacija visame storyje pakankamai tolygi. Abiem atvejais kampas β yra mažas. Tačiau praktiškai net ir esant visiškai įvirinimui, gaunamas kampas β (20 pav. punktyrinė linija). Suvirinus tįtinę jungtį iš abiejų pusių vienu ėjimu (19, f pav.), kampą β_{Σ} sudaro β_1 , atsiradęs dėl netolygaus lakšto susitraukimo suvirinus 1 siūlę, β_2 , atsiradęs dėl netolygaus lakšto susitraukimo suvirinus 2 siūlę, ir β_3 , atsiradęs dėl pačios 2 siūlės susitraukimo. Kampas β_{Σ} yra mažas, palyginus su maždaug vienodais β_1 ir β_2 . Todėl $\beta_{\Sigma} \approx 2\beta_1$. Jei $z \leq 0,5s_n$ (21, f pav.), tai β_{Σ} radianais plienui apytiksliai apskaičiuojamas pagal formulę:

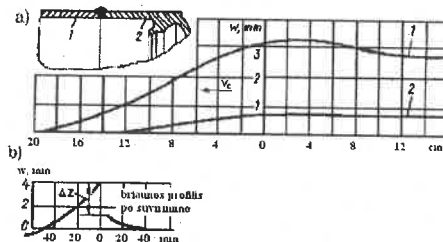
$$\beta_{\Sigma} = 0,1(z/s_n - 0,1), \quad (5.27)$$

Siūlė su vienu ir tuo pačiu statiniu gali būti atlikta daugiau ar mažiau įvirinant lakštą. Todėl lygybė 27 teisinga tik kai į lakštą įvedama efektyvi energija: $q_n/v_s = 16\,000\,z^2$, kai $z/s_n \leq 0,5$, $q_n/v_s = 10\,500z^2$, kai $z/s_n \leq 0,7$; $q_n/v_s = 7\,500z^2$, kai $z/s_n \leq 1$ (z išreikštas cm; $q_n/v_s - J/\text{cm}$). q_n galima apskaičiuoti pagal 26 formulę. 21 pav. pavaizduota kampo β_{Σ} priklausomybė nuo lakšto storio s_n ir siūlės statinio z , kai $q_n/v_s = 10\,500z^2$.



21 pav. β_{Σ} priklausomybė nuo s_n ir z virinant plieną

4. Poslinkiai w siūlės srityje statmena virinamų lakštų paviršių kryptimi sukelia poslinkius Δ_z . Dažniausiai poslinkiai w atsiranda virinant mažų storių metalą. Suvirinimo metu metalas įkaista ir plečiasi sudarydamas laikinus gniuždymo įtempius. Iki 1 mm storio metalas gali prarasti pastovumą – viena briauna pasislenka kitos atžvilgiu ir ta padėtis užtvirtinama siūle. Susidaro poslinkis Δ_z . Dėl nevienodo šilumos įvedimo suvirinimo metu metalas išlinksta. Jei dėl šios priežasties vienas lakštas pasislenka, o kitas ne, tai taip pat susidaro poslinkis.

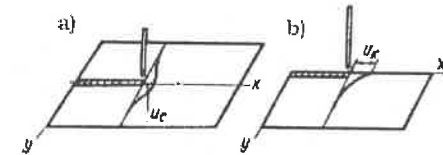


22 pav. Poslinkiai cilindro iš aliuminio lydimo žiedinės siūlės srityje ($s = 6\text{ mm}$)

Radialinis briaunų poslinkis susidaro virinant žiedines siūles, nes dėl įvestos šilumos pailgėja apskritimo ilgis. Radialiniai briaunos poslinkiai gali būti nevienodi, jei briaunos yra skirtingų standumų (22 pav., a). Šie detalės apskritimo ilgio poslinkiai pavaizduoti 1 ir 2 kreivėmis. Jie registruojami 6 mm atstumu nuo virinamų briaunų. Siūle užtvirtinamas briaunų poslinkis, ir 22 pav., b pavaizduota jų padėtis visiškai ataušus. Atsiradęs nesutapimas mažina briaunų stiprumą ir pastovumą. Poslinkis w gali būti apskaičiuotas, tačiau dažniausiai nustatomas eksperimentiniu būdu.

5. Šlyties deformacijos γ_{xy} . Dėl jų suvirintoje jungtyje susidaro poslinkis Δ_x . Suvirinimo metu kaistant plokščių taškai juda išilgai x ašies. Prieš šilumos šaltinį esantys taškai juda suvirinimo kryptimi, už šaltinio esantys taškai – priešinga kryptimi. Maksimalūs poslinkiai u yra skirtingi – didžiausi prie briaunų, kurie mažėja y ašies kryptimi. Susidaro šlyties plastinės ir tampriosios deformacijos. Poslinkis $u \sim \frac{\alpha}{c\gamma} \frac{q}{v_s s}$, kuris

priklauso nuo į kiekvieną plokštę įvedamos santykinės šilumos. Esant tiems patiems temperatūros laukams, šaltinio veikimo srityje plokštės krašto maksimalus poslinkis u_k yra 1,5 karto didesnis nei centre u_c . Tai gaunama virinant užleistines ir tįtines jungtis.



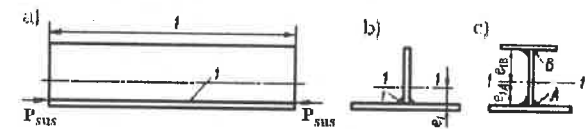
23 pav. u poslinkiai prieš judantį šilumos šaltinį: plokštės viduryje (a) ir krašte (b)

Skirtumas tarp u_k ir u_c gali būti didesnis, jei daugiau šilumos bus įvesta į privirinamą lakštą, nei į juostą. Poslinkių skirtumas Δx fiksuojamas siūle ir išlieka. Poslinkį galima nustatyti tik visiškai ataušus. Δx reikšmė virinant 5...10 mm storio metalą sudaro kelias dešimtas milimetrų dalis, tačiau gali būti ir daugiau milimetrų, jei į privirinamą dalį bus įvesta labai daug šilumos.

4. Suvirintų konstrukcijos elementų deformacijos tipai

4.1 Sijų tipo konstrukcijų poslinkiai.

Šio tipo suvirintų konstrukcijų ypatumai: didelis jų ilgis lyginant su aukščiu ir pločiu, išilginės siūlės per visą sijos ilgį, prie juostos skersinėmis siūlėmis tvirtinamos standumo briaunos, diafragmos ir pagalbiniai elementai. Jei sijoje yra nesimetriškos išilginės ar skersinės siūlės, tai dėl didelio jų ilgio, jose atsiranda dideli įlinkiai.



24 pav. Išilginėmis siūlėmis suvirinta sija

Suvinus išilginę siūlę 1 (24 pav., a, b), atsiranda susitraukimo jėga P_{sus} , kuri sutrumpina siją dydžiu:

$$\Delta_{sij} = P_{sus}/(EA), \quad (28)$$

čia: A – juostos ir sienelės bendras skerspjūvio plotas.

Momentas:

$$M = P_{sus}e_1, \quad (29)$$

Kadangi jėgos P_{sus} pridėta ne skerspjūvio centre, todėl gaunamas sijos įlinkis, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f = P_{sus} e_1^2 / (8EI_1) = M^2 / (8EI_1), \quad (30)$$

Sijos galų kampas vienas kito atžvilgiu nustatomas pagal formulę:

$$\Theta = Ml / (8EI_1), \quad (31)$$

I_1 – formulėse (30) ir (31) tėjinės sijos skerspjūvio inercijos momentas ašies 1–1 atžvilgiu.

Nustatant susitraukimo jėgą būtina įvertinti sijos standumą:

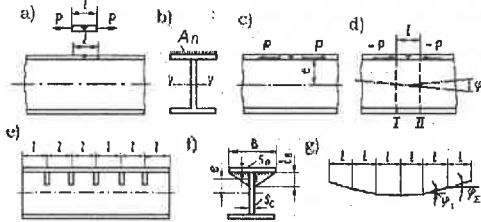
$$P_{sus} = P_{sus,sl} / [1 - P_{sus,sl} (e_1^2 / I_1 + e_2^2 / I_2 + l/A) / R_c], \quad (32)$$

čia: R_c – sijos metalo takumo riba; I_1, I_2, A – svarbiausieji inercijos momentai ir sijos skerspjūvio plotas; e_1 ir e_2 – susitraukimo jėgos pridėjimo ekscentricitetas pagrindinių centrinių sijos skerspjūvio ašių atžvilgiu. 32 formulės laužtiniuose skliaustuose reikšmė turi būti ne mažesnė kaip 0,5.

Jei prie tėjinės sijos privirinama dar viena juosta (24 pav., c), tai nuo šios siūlės susidarys susitraukimas ir įlinkis jai nustatomas atskirai. Skerspjūvio plotas A ir inercijos momentas nustatomi visam dvitėjam skerspjūviui. Siūlės B susitraukimo jėgos pridėjimo ekscentricitetas yra e_{1B} . Siūlių A ir B įlinkio ženklai bus skirtingi. Juos būtina apskaičiuoti ieškant suminį įlinkį. Jei skerspjūvis simetriškas ašies 1-1 atžvilgiu, tai sijos liekamasis įlinkis po dviejų siūlių suvirinimo bus nukreiptas į viršų, t.y. įlinkis nuo siūlės A didesnis nei nuo siūlės B.

Jei sijos elementai iš pradžių sukabinami ir tik tada suvirinami, tai skaičiuojant susitraukimą ir įlinkį sukabinimo siūlės yra laikomos pakankamai stipriomis ir standžiomis, kad garantuoti bendrą visų elementų darbą. Skaičiuojant poslinkį nuo siūlių A ir B imamas visas skerspjūvio plotas ir inercijos momentas 1-1 ašies atžvilgiu, taip pat ekscentricitetas e_{1A} siūlei A ir ekscentricitetas e_{1B} siūlei B.

Atpaunant juostas nuo lakšto, jos taip pat išlinksta. Dėl netolygaus įkaitimo pjaunant, jos sudėtingai išsiskraipo, tačiau ataušus jų įlinkį galima nustatyti remiantis tom pačiom taisyklėmis.



25 pav. Dvitėjė sija su skersinėmis siūlėmis

Statmenos sijos ašiai skersinės siūlės sutrumpina sija, o jei jos yra ne skerspjūvio svorio centre, tai atsiranda ir įlinkis. Jei ant dvitėjės sijos viršutinės juostos užvirinta siūlė (25 pav., a, b), nuo kurios bus gautas skersinis susitraukimas $\Delta_{sker} < 0$. Išpjovus iš sijos l ilgio gabalą juostos (5.25 pav., a viršutinė dalis) ir pridėjus jėgą P , gaunamas šios dalies pailgėjimą – Δ_{sker} :

$$P = -\Delta_{sker} EA_{juosta} / l, \quad (33)$$

čia: A_{juosta} – viršutinės juostos skerspjūvio plotas.

Pašalinus dalį l , sijoje įtempių neliko. Taip pat nebus sutrumpėjimo ar įlinkio. Sugražinkim tą dalį su jėgomis P į siją ir „priklijuokim“ prie lentynos (25 pav., c). Atimkim fiktyvias jėgas P ir pridėkim jėgas – P (25 pav., d). Jėga – P siją ilgyje l sutrumpins:

$$\Delta_{istl} = -Pl / (EA), \quad (34)$$

Įstatykim P išraišką (33) į (34):

$$\Delta_{istl} = \Delta_{sker} A_{lent} / A, \quad (35)$$

Dėl jėgos – P veikimo susidaro lenkimo momentas $M = -Pe$ ir l pjūvį pasisuka kampu ϕ II pjūvio atžvilgiu:

$$\phi = Ml / (EI), \quad (36)$$

čia: I – viso skerspjūvio inercijos momentas y – y ašies atžvilgiu.

Išreiškę M formulėje (36) per P (33), gausime:

$$\phi = \Delta_{sker} A_{juosta} e / l, \quad (37)$$

Dydis $A_{juosta} e = S_{juosta}$ yra juostos, kuri susitraukė dydžiu Δ_{sker} , statinis momentas sijos skerspjūvio svorio centro atžvilgiu. Todėl:

$$\phi = \Delta_{sker} S_{juosta} / l, \quad (38)$$

Formulėse (35) ir (38) nebėra sijos dalies ilgio l . Skersinės siūlės vietinė deformacija sutrumpino sijos ilgį ir sulenkė siją kampu ϕ (25 pav., d). Tas pačias formules (35) ir (37) galima taikyti siūlėms ant vertikalios sienelės tik tuomet formulėse vietoj A_{juosta} ir S_{juosta} turi būti įstatyti vertikalios sienelės atitinkami dydžiai.

Dideli sijos įlinkiai susidaro tuomet, jei yra daug skersinių siūlių ir jos išdėstytos nesimetriškai elemento plotyje. 25 pav., e, f prie pavaizduotos sijos lentynos ir sienelės privirintos standumo briaunos, kurių storiai s_n ir s_c gali būti skirtingi. Dviejų privirintų briaunų kampas ϕ_E nustatomas sumuojant lentynos ϕ_n ir sienelės ϕ_c sulinkimo kampus. Kampas ϕ_n nustatomas pagal juostos susitraukimą $\Delta_{sker, juosta}$ ($B - s_c$) atkarpoje. Kampas ϕ_c nustatomas pagal sienelės susitraukimą iš abiejų pusių, t.y. $2\Delta_{sker, c}$ atkarpoje l_B ; skaičiuojant statinį momentą plotas $l_B s_c$ dauginamas iš ekscentriciteto e (25 pav., f). Kiekvienam pjūviui $\phi_E = \phi_n + \phi_c$. Esant daugeliui tokio tipo standumo briaunų, galima nustatyti sijos įlinkį f viduriniame taške (25 pav., h), šiuo atveju jis lygus:

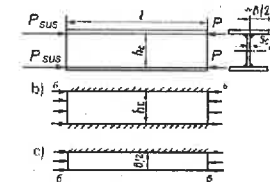
$$f = \phi_E (3l/2 + 2l + l), \quad (39)$$

4.2 Suvirintų lakštinių elementų pastovumo praradimas.

Veikiant susitraukimo jėgai, konstrukcijos elementuose susidaro gniuždymo įtempiai, dėl kurių prarandamas elementų iki 10...15 mm storio pastovumas. Ypač dideli plonų lakštų (3...4 mm) poslinkiai. Sutinkamos dviejų tipų užduotys, susijusios su stabilumo netekimu:

- pastovumo netekimo sąlygų nustatymas;
- poslinkių nustatymas praradus pastovumą.

Pirmo tipo uždavinys paprastesnis – jam išspręsti pakanka surasti pastovumo praradimo kritines apkrovas ir įtempius.



26 pav. Suvirintos dvitėjės sijos elementų pastovumo praradimas

Panagrinėkime suvirintos dvitėjės sijos elementų pastovumo praradimo sąlygas (26 pav., a). Susitraukimo jėgos gniuždo juostas ir sienelę išilgine kryptimi, todėl plokšti sijos elementai gali prarasti pastovumą. Sienelės, kurių ilgis l ir aukštis h_c , išilginės briaunos privirintos prie juostų, 26 pav., b), kuriose sienelės briaunos standžiai įtvirtintos ir negali iškrypti skersine kryptimi. Susitraukimo jėga $2P_{sus}$ tolygiai gniuždo sienelę įtempiais $\sigma_{gn} = 2P_{sus} / A$, čia A – sijos skerspjūvio plotas. Vertikalios sienelės kritiniai gniuždymo įtempiai:

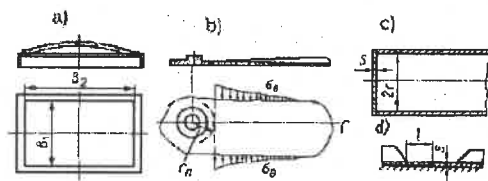
$$\sigma_{kr} = 7\pi^2 E (s_c / h_c)^2 / [12(1 - \mu^2)], \quad (40)$$

Jei $\sigma_{gn} > \sigma_{kr}$, tai vertikalios sienelės pastovumas bus prarastas.

Juosta taip pat gali prarasti pastovumą. Pusės juostos plotis – $B/2$, ji įtvirtinta tik iš vienos pusės (26 pav., c). Plokštė apkrauta σ_{gn} įtempiais. Kritiniai šios juostos įtempiai:

$$\sigma_{kr} = 1,33\pi^2 E (2s_n / B)^2 / [12(1 - \mu^2)], \quad (41)$$

Virinant lakštą prie karkaso užleistinėmis jungtimis (27 pav., a), pagrindiniai poslinkiai susidaro dėl išilginės susitraukimo jėgos, skersinio susitraukimo įtaka menka. Todėl lakštą nagrinėjame kaip stačiakampę plokštę, įtvirtintą visomis keturiomis briaunomis, kuriose gniuždymo įtempiai išilgai plokštės $2P_{\text{sus}}/(sB_2)$ ir $2P_{\text{sus}}/(sB_1)$ skersai plokštės, čia s – lakšto storis.



27 pav. Suvirintose konstrukcijose stabilumo netenkantys lakštiniai elementai

Plokšti konstrukcijos elementai taip pat gali prarasti pastovumą, jei į juos bus įvirinami apvalūs elementai (27 pav., b) ir jei juose atsiradus radialiniai tempimo įtempiai σ_r ir apskritiminiai gniuždymo įtempiai σ_θ . Dėl pastarųjų dažniausiai ir prarandamas pastovumas. Kritiniai radialiniai įtempiai priklauso nuo spindulio r_n , apribojančio plastinių deformacijų zoną ir nuo lakšto storis s :

$$\sigma_{r,krit} = 3E(s/r_n)^2/[12(1 - \mu^2)], \quad (42)$$

Plokšti dugnai, veikiami radialinių gniuždymo įtempių taip pat gali prarasti pastovumą (27 pav., c). Cilindrinio kevalo krašto pastovumas radialine kryptimi daug mažesnis nei dugno plokštumos. Todėl radialinius gniuždymo įtempius $\sigma_{r,gn} = P_{\text{sus}}/(rs)$, atsiradusius kampinėje jungtyje pagrindinai priima tik dugnas. Plokščio dugno, privirinto uždaru kontūru prie kevalo, kritiniai įtempiai:

$$\sigma_{r,krit} = 1,49\pi^2 E(s/r)^2/[12(1 - \mu^2)], \quad (43)$$

Suvirinant sandūrine jungtimi plonus lakštus ($s \leq 1 \text{ mm}$) gali būti prarastas pastovumas. Tam išvengti jie prispaudžiami prie pagrindo, paliekant minimalų tarpą l tarp prispaudimo elementų, kad būtų pakankamas priėjimas virinti (27 pav., d).

5. Konstrukcijų suvirinimo įtempių, deformacijų ir poslinkių mažinimo metodai

Visi suvirinimo įtempių ir suvirintų konstrukcijų formos iškraipymo mažinimo būdai remiasi trimis pagrindiniais principais:

1. Metalas, kuris plastiškai deformuojasi jam kaistant, tūrio sumažinimas, taip pat pačios plastinės deformacijos sumažinimas.
2. Plastiškai deformuoto metalo, gauto jam kaistant, srityse sukūrimas priešingo ženklo papildomų deformacijų. Tai gali būti atliekama metalui auštant arba visiškai jam ataušus.
3. Gautų deformacijų ir poslinkių kompensavimas simetriškai išdėstant siūles, sudarant papildomas plastinės deformacijos sritis, išankstinius poslinkius, užtikrinant laisvą metalo susodinimą ir kt.

Apžvelgiam kai kurios gamyboje naudojamus metodus.

Pakaitinimas keičia temperatūros pasiskirstymo laukus, suvirinimo deformacijas ir struktūrinių virsmų sukurtus įtempimus, taip pat kartais gali turėti įtakos metalo savybėms. Pakaitinimas, iš vienos pusės, sumažina takumo ribą, tamprumo modulį ir temperatūrų gradientą, todėl gaunamas maksimalių liekamųjų įtempių sumažėjimas, iš kitos pusės, gaunama platesnė plastinės deformacijos sritis, esant tai pačiai įvedamajai šilumai. Pakaitinimas iki labai aukštų temperatūrų sumažina takumo ribą R_e , o tuo pačiu ir liekamuosius įtempius.

Pakalimas. Pakalti galima auštantį arba visiškai ataušusį metalą. Pakalimu susodinamas metalo storumas, plastinė deformacija pailgina siūlę plokštumoje, kuri yra statmena smūgio krypčiai. Taip sumažinami tempimo įtempiai, tačiau gali susidaryti net gniuždymo liekamieji įtempiai. Pakalimo efektyvumas priklauso nuo temperatūros, šilumos kiekio, kuris išsiskiria pakalimo metu, o taip pat nuo plastinės deformacijos dydžio. Jeigu pakalimo srityje temperatūra aukštesnė nei likusiame metalo, tai metalui auštant ir jam traukiantis gniuždymo įtempiai mažės ir gali pereiti net į tempimo įtempius. Šalto pakalimo

metu paprastai metalas nedaug įkaista todėl gali susidaryti gana aukšti gniuždymo įtempiai. Pakalimas gali sumažinti metalo plastiškumą, kuris tam tikrai atvejais turėtų būti įvertintas.

Taikant impulsinį apdirbimą sprogdinant specialią juostą uždėtą ant apdirbamo paviršiaus. Sprogimas, kuris atliekamas specialioje kameroje, sukuria įtempius paviršiniame sluoksnyje ir tokio būdu perskirsto liekamuosius suvirinimo įtempius. Šis būdas taikomas suvirintų sujungimų nuovargio atsparumui padidinti.

Siūlės srities valcavimas taikomas suvirinimo liekamiesiems įtempiams sumažinti ir siūlės kraštui sulyginti. Valcavimo vietose sumažinami tempimo įtempiai arba gali peraugti į gniuždymo įtempius.

Papildomas apkrovimas. Suvirinimo metu galima apkrauti taip, kad siūlės srityje susidarytų tempimo įtempiai. Tai sumažina liekamuosius tempimo įtempius ir susitraukimo jėgą P_{sus} . Jeigu apkrovos pridėdamos po suvirinimo, būtina, kad įtempiai nuo apkrovos sumuotųsi su liekamaisiais tempimo įtempiais ir metalas plastiškai deformuotųsi. Nuėmus apkrovą gaunami mažesni liekamieji įtempiai. Norint visiškai pašalinti savuosius įtempius, įtempiai nuo papildomos apkrovos turi būti artimi metalo takumo ribai, o tai sunkiai pasiekama.

Netolygus kaitinimas ir aušinimas. Jeigu iš abiejų virintinės siūlės pusių sukurti įkaitintas zonas, tai plėsdamasis metalas ištempis siūlės sritį išilgai jos ašies, o statmena ašiai kryptimi gniuždyt. Tokia įtempių schema sudaro sąlygas plastiniam siūlės srities metalo ištempimui siūlės ašies kryptimi ir sumažina liekamuosius tempimo įtempius. Perslenkant įkaitintas zonas siūlės kryptimi, aušinant metalą gale šilumos šaltinio, procesas gali vykti nenutrūkstamai.

Atskirų zonų koncentruotas vietinis įkaitinimas naudojamas tų vietų susodinimui ir išlyginimui.

Suvirintų konstrukcijų atkaitinimas naudojamas metalo struktūrai ir savybėms pakeisti, o taip pat liekamiesiems įtempiams sumažinti. Atleidimą liekamiesiems įtempiams mažinti tikslinga naudoti, jei yra padidinti reikalavimai suvirintos konstrukcijos stiprumui ir matmenų tikslumui eksploatacijos metu. Be to, kartais reikia atstatyti plastines savybes, ten kur suvirinimo metu koncentravosi plastinė deformacija ir padidinti atsparumą trapiam suiriumi. Kitais atvejais nerekomenduojama naudoti atkaitinimą, nes labai padidėja konstrukcijos kaina.

Atkaitinimas gali būti: **bendras** atkaitinimas, kai įkaitinamas visas gaminy; **vietinis** - įkaitinama tik siūlės sritis; **palaipsnis atkaitinimas** - kaitinimo šaltinis juda išilgai konstrukcijos ir nuosekliai kaitina jos sritis; **nuoseklus atskirų elementų atkaitinimas** - termiškai apdirbami atskiri konstrukcijos mazgai, kurie vėliau suvirinami.

Įvairių konstrukcijų medžiagų atkaitinimo temperatūros ($^{\circ}\text{C}$), leidžiančios sumažinti liekamuosius įtempius iki $(0,1 \dots 0,2)\sigma_r$ lygio yra šios:

– aliuminio lydinių	250...300;
– titano lydinių	550...600;
– konstrukcinių plienų	580...680;
– austenitinių plienų	850...1050.

Suvirinimo deformacijų ir poslinkių mažinimo priemonės turi būti numatytos visuose konstrukcijų projektavimo ir gamybos etapuose.

Literatūros sąrašas

1. NIKOLAEV, G. A., VINOKUROV, B. A. Suvirintos konstrukcijos. Skaičiavimas ir projektavimas. Maskva: Vyšiaja škola, 1990, 445 p. (rusų k.).
2. STR 2.05.08:2005 Plieninių konstrukcijų projektavimas. Pagrindinės nuostatos. Vilnius „Rekona“ 128 p.