ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS

TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Tomas Tubis

DAUGIASLUOKSNIŲ VAMZDŽIŲ STIPRUMO, STANDUMO TYRIMAS

Magistro darbas

Vadovas

prof. habil. dr. J. Bareišis

ŠIAULIAI, 2005

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS

TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
lekt. Z. Ramonas
2005 06 14

DAUGIASLUOKSNIŲ VAMZDŽIŲ STIPRUMO, STANDUMO TYRIMAS

Magistro darbas

Vadovas
prof. habil. dr. J. Bareišis
2005 06 07

Recenzentas
KTU Mechanikos fakulteto
prof. habil. dr. A. Bargelis
2005 06 14

Atliko
MM-3 gr. stud.
T. Tubis
2005 06 07

ŠIAULIAI, 2005

Tubis T. Composite pipes strength of elastic and tensile deformations: Master thesis of mechanical engineer/research advisor Prof. Habil. Dr. J. Baresis; Šiauliai University, Technological Faculty, Mechanical Engineering Department. – Šiauliai, 2005. - 66 p.

SUMMARY

Composite materials are formed by combiing two or more materials that have quite different properties. The different materials work together to give the composite unique properties, but within the composite you can easily tell the the different materials apart – they do not dissolve or blend into each other. Modern aviation, both military and civil, is a prime example. It would be much less efficient without composites. In fact, the demands made by that industry for materials that are both light and strong has been the main force driving the development of composites. The greatest advantage of composite materials is strength and stiffness combined with lightness. By choosing an appropriate combination of reinforcement and matrix material, manufacturers can produce properties that exactly fit the requirements for a particular structure for a particular purpose. In general, composite materials are very durable. The downside of composites is usually the cost. Although manufacturing processes are often more efficient when composites are used, the raw materials like steel, but in many cases they are just what we need.

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

ĮŽANGA

Darbo aktualumas. XXI a. Ekonomikos ir viso gyvenimo plėtra bus grindžiama naujomis medžiagomis ir informacinėmis technologijomis. Tai susiję su energijos ir laiko taupymu, žmogaus proto galiomis. Tai yra glaudžiai susijusios, viena kitą veikiančios civilizacijos plėtros sritys, lyg kompozitinė medžiaga, susidedanti iš atskirų komponentų.

Ilgą laiką ir dabar daugelis konstrukcinių elementų gaminami iš vienos rūšies medžiagos (plieno, spalvotųjų metalų, plastmasės). Šios medžiagos turi izotropinių; arba anizotropinių mechaninio stiprumo sąvybių. Konstruojant gaminius iš anizotropinių medžiagų, naudojamasi įprastiniais medžiagų stiprumo nustatymo būdais. Čia atsižvelgiama į jėgų poveikio kryptis ir medžiagos pasipriešinimą joms. Naudojant vienos rūšies medžiagą, daugeliu atveju negalima suderinti medžiagos stiprumo savybių su konstrukcijai keliamais masės, kainos ir kitais reikalavimais. Tik naudojant įvairias medžiagas, turinčias skirtingas stiprumo ir kitas fizikines bei mechanines savybes, galima gauti optimalių parametrų konstrukcinius elementus. Hibridinės konstrukcijos ypač plačiai pradėtos taikyti atsiradus kompozicinėms medžiagoms iš polimerų, pasižyminčioms ryškiomis anizotropinėmis sąvybėmis. Derinant anizotropines mechaninio stiprumo medžiagų savybes bei jų lyginamąją masę arba kainą, galima gauti didžiausio stiprumo ir mažiausios masės ar kainos daugiasluoksnę konstrukciją. Atsirandant naujoms kompozicinėms medžiagoms, vis plačiau naudojamos daugiasluoksnės hibridinės konstrukcijos.

Darbo tikslas – išnagrinėti homogeninių ir daugiasluoksnių sukamų vamzdžių stiprumo savybių priklausomybę nuo įvairių veiksnių (vamzdžių geometrijos, medžiagų išdėstymo, sluoksnių skaičiaus), esant tampriam ir tampriai plastiniam deformavimui bei išnagrinėti tampriai plastinio deformavimo efektyvumą. Skaičiavimus atlikti naudojant idealių tamprių - plastinių medžiagų modelius, kurių deformavimas atitinka Prantlio diagramą.

Mokslinis naujumas ir praktinė vertė. Atlikti vamzdžių stiprumo priklausomybės skaičiavimai priklausomai nuo geometrijos, įvertinta daugiasluoksnių vamzdžių sluoksnių skaičiaus bei jų išdėstymo, esant kelioms medžiagoms, įtaka vamzdžio ribinėms apkrovoms. Išnagrinėti plastinio deformavimo efektyvumo koeficiento kitimo dėsningumai.

Konstruojant gaminius, remiantis tyrimų rezultatais, galima efektyviau išnaudoti gaminiams naudojamas medžiagas. Su tokiais pačiais medžiagų kiekiais, pagal gautus rezultatus, galima gauti stipresnes konstrukcijas.

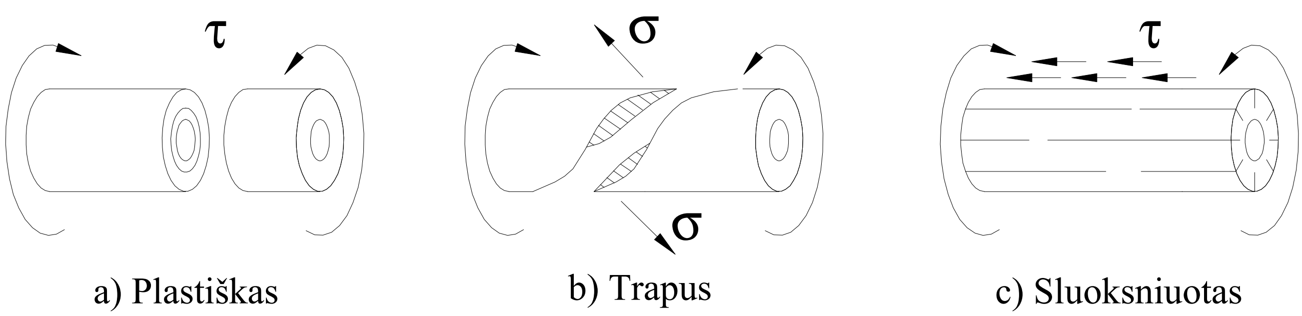
Lietuvai - šaliai, įsivežančiai metalus ir kitas konstrukcines medžiagas, - ypač svarbu kuo racionaliau jas panaudoti. Tyrimai šiais klausimais yra ypač aktualūs, todėl būtina gerai mokėti apskaičiuoti daugiasluoksnių konstrukcijų, sudarytų iš medžiagų su skirtingomis fizikinėmis ir mechaninėmis charakteristikomis, atsparumą [2].

1 SUKAMŲ VAMZDŽIŲ SKAIČIAVIMAS, ESANT TAMPRIAM IR TAMPRIAI PLASTINIAM DEFORMAVIMUI

1.1 Homogeniniai sukami vamzdžiai

1.1.1 Sukamų skritulinio skerspjūvio vamzdžių stiprumas ir standumas

Sukamo vamzdžio įtempimų būvis yra grynoji šlytis. Įtempimų pasiskirstymą tokio strypo įvairiuose pjūviuose rodo brėžinys (1.3 pav.).



1.1 pav. Vamzdžių suirimo būdai

Kai medžiaga plastiška, ji suyra dėl tangentinių įtempimų poveikio – paprastai skerspjūvio plokštumoje (l. l pav. a). Taip nusukamas minkšto plieno vamzdis.

Trapaus vamzdžio (pvz. ketaus, stiklo) suirimą lemia svarbiausieji tempiamieji įtempimai σ_1, kurie atplėšia vieną vamzdžio dalį nuo kitos. Kadangi šių įtempimų kryptis su skerspjūviu sudaro 45° kampą, tai strypo dalys ir atplyšta įstrižu pjūviu (1.1 pav. b*)*.

Kai sukamas vamzdis sluoksniuotas (pvz. medinis), jo suirimą lemia tangentiniai įtempimai išilginėse sukamo vamzdžio plokštumose - būtent dėl jų skeliamojo poveikio sluoksniai atsiskiria vienas nuo kito, vamzdis sueižėja (1.1 pav. c) ir tuo būdu praranda stiprumą.

Visais atvejais stiprumo sąlygomis tenka apriboti tą patį dydį - tangentinį įtempimą τ (nes net ir $\sigma_1 = \tau$). Šis įtempimas apskaičiuojamas pagal (1) arba (10) formulę. Tačiau vertinant sukamo vamzdžio stiprumą, reikia nepamiršti, kad grynoji šlytis yra dviašis (ne vienaašis) įtempimų būvis ir todėl greta svarbiausiojo įtempimo σ_1 savo įtaką daro ir $\sigma_3 = -\tau$ *;* taigi stiprumo sąlygą kai kada tenka formuluoti, pasitelkiant kurią nors irimo ar plastiškumo hipotezę.

Sukamo vamzdžio standumo sąlygomis būna apribojamas arba santykinis sąsūkis, išreiškiamas pagal (5) formulę, arba vamzdžio ruožo (pavyzdžiui, viso veleno ilgio) susisukimo kampas φ, apskaičiuojamas pagal (4) bei (5) formules. Standumo sąlygomis gali būti tikrinama, ar vamzdis ne perdaug susisuka; galimas ir projektinis uždavinys, kurį spręsdami iš standumo sąlygos nustatome, koks turi būti vamzdžio skerspjūvis (jo skersmuo), kad vamzdis per daug nesusisuktų [4].

Tuo atveju, kai sukamo vamzdžio skerspjūvis skritulinis arba žiedinis, strypo skerspjūviai neišsikraipo, galioja plokščių kūnų hipotezė ir galima įrodyti, kad visuose vamzdžio taškuose yra grynosios šlyties deformacija, o įtempimai bet kuriame skerspjūvio taške išreiškiami formule:

$$\tau_k = \frac{T}{I_p}\rho_k; \tag{1}$$

čia: *T*- skerspjūvyje veikiantis sukimo momentas, I_p - skerspjūvio ploto polinis inercijos momentas, φ_k - taško k atstumas nuo skerspjūvio centro.

Tangentinio įtempimo kryptis visuomet statmena spinduliui, kuris jungia skerspjūvio centrą su tašku, kuriame veikia įtempimas. Iš formulės (1) matyti, kad tangentiniai įtempimai skerspjūvyje pasiskirsto pagal tiesinę priklausomybę (žr. 1.5 pav., a) -jie lygūs nuliui skerspjūvio centre ir turi didžiausią reikšmę skerspjūvio periferijoje.

Vienu sukimo momentu veikiamas strypas lieka tiesus, tik jo skerspjūviai pasisuka apie išilginę strypo ašį vienas kito atžvilgiu. Sukamo strypo deformavimąsi ties bet kuriuo jo skerspjūviu intensyvumą apibudina santykinis sąsūkis:

$$\theta = \frac{T}{GI_p}; \tag{2}$$

čia: *T*- nagrinėjamame strypo skerspjūvyje veikiantis sukimo momentas, *G* - strypo medžiagos šlyties modulis, I_p - skerspjūvio ploto polinis inercijos momentas.

Santykinis sąsūkis matuojamas kampo vienetais, tenkančiais strypo ilgio vienetui (pvz. radianais metrui).

Santykinis sąsūkis yra apibendrintoji sukamo strypo deformacija. Sandauga $G \times I_P$ dažnai vadinama strypo skerspjūvio sukamuoju standumo moduliu arba standžių (kuo didesnė ši sandauga, tuo standesnis strypas, tuo mažiau jis susisuka).

Bet kuris strypo skerspjūvis kito kurio nors skerspjūvio atžvilgiu pasisuka kampu:

$$\varphi = \int_0^L \theta * dz = \int_0^L \frac{T}{GI_p} dz \, ; \tag{3}$$

čia: L - atstumas tarp nagrinėjamų skerspjūvių. Tik tuo atveju, kai visame tame strypo ruože santykinis sąsūkis yra pastovus dydis (t.y. kai T=const, I_p=const), galima kampą φ išreikšti be integralo:

$$\varphi = \theta L = \frac{T}{GI_p} L \quad .(4)$$

Jeigu reikia nustatyti, pavyzdžiui, kokiu kampu φ pasisuka vienas strypo galas kito galo atžvilgiu, (kai elemento sukimo diagrama yra laiptuota, t,y. nepastovaus dydžio visame ilgyje) reikia visą sukamo strypo ilgį suskaidyti į ruožus, kurių kiekvieno santykinis sąsūkis būtų pastovus, apskaičiuoti kiekvieno ruožo susisukimo kampą φ_j, o visas ieškomasis kampas:

$$\varphi = \sum_{j=1}^{n} \varphi_j = \sum_{j=1}^{n} \theta_j L_j = \sum_{j=1}^{n} \frac{T_j}{G_j I_{pj}} L_j \tag{5}$$

Kampas φ yra analogiškas tempiamo (gniuždomo) strypo ilgio pokyčiui *ΔL.* Juo naudojames, kai reikia nustatyti kurio nors skerspjūvio kampinį poslinkį. Sukamų strypų kampinių poslinkių skaičiavimo metodika analogiška tempiamų strypų poslinkių skaičiavimui [4].

Statiškai neišsprendžiamiems uždaviniams tenka rašyti papildomas geometrines deformavimo lygtis, panašias į tempiamų bei gniuždomų strypų deformavimo lygtis. Grynojo sukimo veikiamas statiškai neišsprendžiamas strypas dažniausiai yra abiem galais standžiai įtvirtintas, ir jo geometrinė lygtis yra :

$$\sum_{j=1}^{n} \theta_j L_j = \sum_{j=1}^{n} \varphi_j = 0 \tag{6}$$

Šia lygtimi konstatuojame, kad strypo galai nepasisuka vienas kito atžvilgiu (nes jie abu įtvirtinti, abu nejuda).

Greta pusiausvyros lygčių, geometrinių deformavimo lygčių parašome dar fizikines deformavimo lygtis. Spęsdami visas lygtis drauge, randame įrąžas (sukimo momentus), deformacijas (santykinius sąsūkius), o po to, jei reikia ir įtempimus.

Strypui susukti reikia energijos. Ta energija idealiai tampriame strype susikaupia potencinės energijos pavidalu. Susukto strypo potencinė deformavimo energija išreiškiama puse įrąžos, deformacijos ir ilgio sandaugos (tai įrodoma analogiškai, kaip ir tempiamo strypo atveju): $dU = t\theta dz / 2$. Įrašę santykinio sąsūkio reikšmę (2) ir integruodami per visą strypo ilgį, gauname:

$$U = \int_0^L \frac{T^2}{2GI_p} dz \; . \tag{7}$$

o kai visame strype (arba jo ruože) sukimo momentas T=const ir standis $G*P_p$=const, susukto strypo potencinė deformavimo energija:

$$U = \frac{T^2 L}{2GI_p} \tag{8}$$

o kai T≠const:

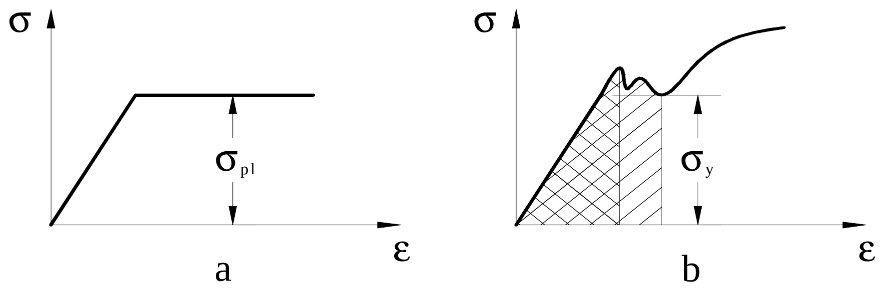
$$U = \sum_1^n \frac{T^2 L_i}{2G_i I_{pi}} \tag{9}$$

[4].

1.1.2 Tampriai plastinio deformavimo esmė

Kol apkrovos, įtempimai ir deformacijos yra nedidelės ,daugumai konstrukcinių medžiagų galioja ir tamprumo, ir proporcingumo prielaida. Tačiau įtempimams pasiekus tam tikrą didumą, dažniausiai medžiagoje atsiranda liekamųjų, plastinių deformacijų. Reta medžiaga lieka tampri beveik iki suirimo (tokios yra trapiosios medžiagos - ketus, stiklas, natūralus ar dirbtinis akmuo). Kai kurių konstrukcijų (pavyzdžiui, mašinų, tiksliųjų prietaisų) elementų plastinis deformavimasis yra visiškai neleistinas. Mat, plastinės deformacijos kaupiasi, didėja ir trikdo mašinų, prietaisų sąveiką, spartina judančių detalių dilimą, padaro neįmanomą visos konstrukcijos eksploatavimą. O kai įtempimai ir deformacijos konstrukcijos eksploatavimo metu kinta ne tik didumu, bet ir ženklu (kai tame pačiame taške deformacija tai teigiama tai neigiama), plastinis deformavimas gali lemti labai greitą konstrukcijos suirimą. Tokia (mainioji) plastinė deformacija jokiu būdu neleistina.

Realių konstrukcinių medžiagų deformavimo (tempimo) diagramos gana sudėtingos ir skirtingos.

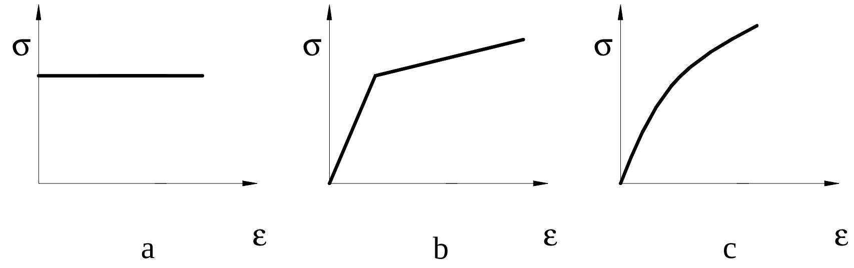


1.2 pav. Medžiagų deformavimo (tempimo) diagramos

Skaičiuoti plastines deformacijas pagal tokias diagramas įmanoma, bet neparanku. Greta jau gerai pažįstamos idealios tamprios medžiagos konstrukcijoms skaičiuoti naudojami dar keli idealūs medžiagų modeliai. Populiariausia yra ideali tampri-plastinė medžiaga, kurios deformavimas atitinka vadinamąją Prantlio diagramą (1.2 pav., a). Ši medžiaga iš pradžių deformuojasi kaip ideali tampri $\sigma = E\varepsilon$, o kai įtempimai išauga iki tam tikros reikšmės σ_{pl}, medžiaga tampa idealia plastine: ji neribotai deformuojasi, tįsta, įtempimams nebeaugant. Taigi, fizikinį tokios medžiagos deformavimo dėsnį galime išreikšti nelygybe:

$$\sigma \le \sigma_{pl} . \tag{10}$$

Kai skaičiuodami konstrukcijos elemento laikomąją galią tariame, jog plastinės deformacijos neleistinos, pasinaudojame tą medžiagos darbo dalimi, kuri diagramoje (1.2 pav., b) užbrūkšniuota kryžmiškai; kai plastines deformacijas leidžiame, panaudojamo darbo apimtis daug didesnė (diagramoje plotas, užbrūkšniuotas ir kryžmiškai, ir viena kryptimi), taigi ir laikomoji galia didesnė.

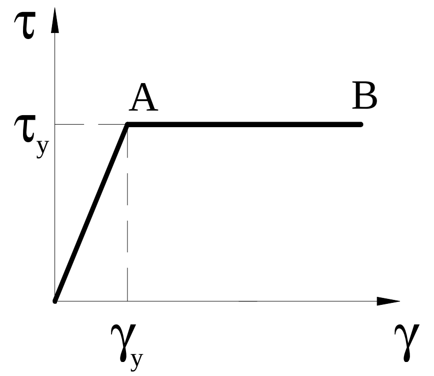


1.3 pav. Idealių medžiagų su plastinėmis savybėmis modeliai

Be idealios tamprios-plastinės medžiagos, dar naudojami tokie idealių medžiagų su plastinėmis savybėmis modeliai: standi-plastinė (1.3 pav., a), tampri-tiesiškai stiprėjanti (b), laipsniškai stiprėjanti (c) ir kt. [4].

Prantlio diagramos pavidalu galima išreikšti ir idealios tamprios plastinės medžiagos tangentinių įtempimų santykį su šlyties deformacija (1.4 pav.). Čia galioja toks dėsnis:

$$\tau \leq \tau_y \tag{11}$$



1.4 pav. Idealios tamprios plastinės medžiagos tangentinių įtempimų santykis su šlyties deformacija

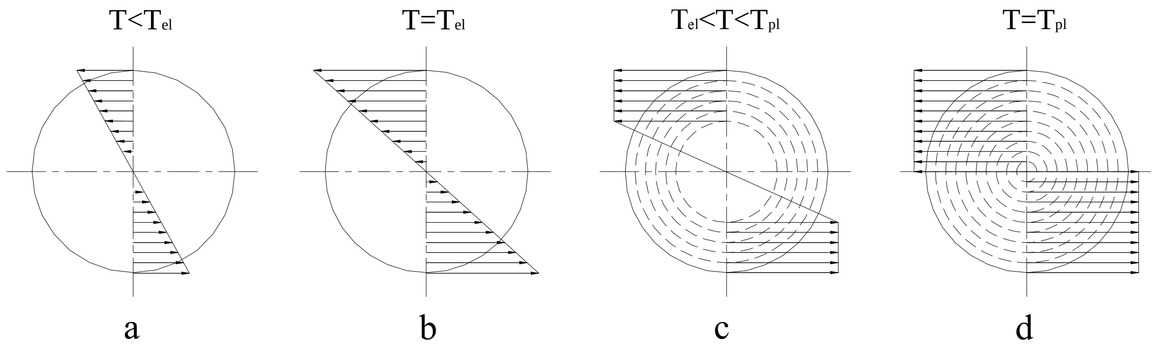
Kai iš šios medžiagos pagamintas strypas veikiamas sukimo momento, iš pradžių jame tangentiniai įtempimai būna pasiskirstę taip, kaip idealiame tampriame strype. Jeigu strypo skerspjūvis skritulinis, įtempimų diagrama trikampė (1.5 pav., a). Ji tokia yra tol, kol didžiausias įtempimas (skerspjūvio pakraštyje) pasieks ribinę reikšmę τ_y (1.5 pav., b); tuo metu skerspjūvyje veikia didžiausias dar nesukeliantis plastinių deformacijų sukimo momentas T_{el}. Taškuose $\tau = \tau_y$ ima rastis plastinės deformacijos, bet jos dar nedidelės, nes jų augimą riboja strypo vidurinė sritis - šerdis, dar tebesanti tampri ir pakankamai standi. Įtempimai plastinėje srityje yra jau pasiekę ribinę reikšmę ir nebeauga, bet tampriojoje šerdyje jie gali didėti ir todėl strypą galima apkrauti didesniu negu T_{el} sukimo momentu (1.5 pav., c). Ir tik tada, kai plastinė sritis pasiekia patį strypo vidurį, kai nebelieka tampriosios šerdies, sukamo strypo skerspjūvio, laikomoji galia išsenka - plastinės deformacijos ima didėti nekliudomai ir neribotai, strypas ties tuo skerspjūviu plastiškai suyra, įtempimai visuose skerspjūvio taškuose prilygsta τ_y, jų diagrama stačiakampė (1.5 pav., d), o skerspjūvyje veikiančio sukimo momento reikšmė - ribinė, T_{pl}.

Jeigu plastinės deformacijos neleidžiamos, ribinis sukamo strypo sukimo momentas nustatomas iš tampriosios deformavimo stadijos priklausomybės ir sąlygos $\tau_{\max} = \tau_{pl}$.

$$T_{el} = W_p \tau_y . \tag{12}$$

čia W skritulio skerspjūvio polinis atsparumo momentas $W_p = \pi d^3 / 16$.

Jeigu plastinės deformacijos leidžiamos, tai sukamo strypo skerspjūvis gali laikyti didesnį sukimo momentą T_{pl}, kuris gali būti apskaičiuotas pagal įtempimų diagramą, atitinkančią plastinį suirimą (1.5 pav., d).



1. 5 pav. Įtempimų diagramos

Siekiant analogijos su tampriosios stadijos ribinės įrąžos išraiška (12), pastaroji (plastinės stadijos) ribinė įrąža gali būti reiškiama taip:

$$T_{pl} = W_{p,pl} \tau_{pl} ; \tag{13}$$

geometrinis rodiklis:

$$W_{p,pl} = \pi d^3 / 12 ; \tag{14}$$

vadinamas plastiniupoliniu atsparumo momentu.

Palyginę dvi ribines įrąžas (tampriosios stadijos ir plastinės stadijos), matome, kad plastinės stadijos ribinis sukimo momentas T_{pl} yra didesnis už tampriosios stadijos T_{el}

$$T_{pl} / T_{el} = W_{p,pl} / W_p = 4/3\,; \tag{15}$$

karto, taigi, leidus plastinėms deformacijoms rastis strype, sukimo momentas skerspjūvyje gali padidėti visu trečdaliu.

Jeigu sukamas strypas yra statiškai išsprendžiamas, tai pakanka to, kad bent viename skerspjūvyje įrąža pasiekia T_{pl} reikšmę, ir strypas plastiškai suyra. Tokiu atveju strypo laikomoji galia, kai plastinės deformacijos leidžiamos, padidėja tik tuo trečdaliu. Tačiau jeigu sukamas strypas yra statiškai neišsprendžiamas (pavyzdžiui, abiem galais standžiai įtvirtintas), vieno pjūvio ar net vieno ruožo visiškai plastinis deformavimas (su T_{pl}) dar nereiškia strypo plastinio suirimo. Strypas plastiškai suyra tik tada, kai keliuose $(k+1)$ skerspjūviuose ar ruožuose sukimo momentas pasiekia ribinę reikšmę T_{pl}. Taigi, tokio strypo plastinės stadijos laikomoji galia tampa dar didesnė, lyginant su tampriosios stadijos laikomąja galia [4].

1.2 Daugiasluoksniai sukami strypai

1.2. 1 Daugiasluoksnių konstrukcinių elementų struktūra

Daugumą šiuolaikinių konstrukcinių elementų sudaro kompozicijos, kurios gaminiui suteikia tam tikrą savybių derinį. Visais atvejais tai skirtingų medžiagų sistema, kurios kiekvienas komponentas turi konkrečią paskirtį gaminyje. Įvairių medžiagų bendras darbas kompozicijoje yra tolygus naujos medžiagos sukūrimui, kurios savybės kiekybiškai ir kokybiškai skiriasi nuo ją sudarančių elementų savybių. Sluoksniuotos konstrukcijos gali būti gautos naudojant polimerines kompozicines medžiagas, plieną, betoną, medį ir kitas medžiagas.

Jos naudojamos įvairios paskirties objektuose, pradedant buitine technika, automobiliais ir baigiant statybinėmis bei lėktuvų konstrukcijomis. Sluoksniuotos konstrukcijos įgalina gauti reikiamas konstrukcijų savybes norima kryptimi, įvertinant apkrovų visumą, jų veikimo kryptį, naudojamų medžiagų anizotropiškumą bei kitus aktualius reikalavimus [2].

Atskiroms konstrukcijoms, priklausomai nuo konstrukcinio elemento sluoksnių medžiagos mechaninių savybių, sluoksnių formavimui naudojamų medžiagų skaičiaus, sluoksnių padėties (išdėstymo) konstrukciniame elemente, sluoksnių skaičiaus, sluoksniuoto konstrukcinio elemento stiprumo ir standumo savybių kitimo dėsningumai atskiroms elementų konstrukcijoms skiriasi. Visi sluoksniuoti konstrukciniai elementai pagal jų savybių kitimo dėsningumų panašumą skirstomi į tipus ir grupes.

Pagal konstrukcinio elemento sluoksnių skaičių ir simetriškumą sluoksniuoti konstrukciniai elementai skirstomi j simetrinius ir asimetrinius konstrukcinius elementus.

Simetriniais konstrukciniais elementais vadinami konstrukciniai elementai, kurių vienodo storio atitinkamų medžiagų sluoksniai yra simetriškai išdėstyti vidurinio sluoksnio atžvilgiu. Kai naudojamos dvi skirtingos medžiagos, ir visų, išskyrus vidurinį, sluoksnių storiai yra vienodi, tai simetrinės konstrukcijos yra su nelyginiu sluoksnių skaičiumi (3, 5, 7,9 ir t.t.).

Asimetriniais konstrukciniai elementais vadinami konstrukciniai elementai, kurių visi sluoksniai yra iš skirtingų medžiagų arba skirtingų medžiagų sluoksniai atitinkamai periodiškai kartojasi, tačiau neutraliojo sluoksnio padėtis nesutampa su geometrine ašimi, kai naudojamos dvi skirtingos medžiagos, tuomet konstrukciniai elementai, turintys lyginį sluoksnių skaičių (2, 4, 6, 8 ir t.t), yra asimetriniai.

Pagal sluoksniuoto konstrukcinio elemento sluoksnio medžiagos fizines bei mechanines savybes bei to sluoksnio padėtį konstrukciniame elemente, simetriniai konstrukciniai elementai skirstomi į tiesioginės ir atvirkštinės konstrukcijos elementus.

Tiesioginės konstrukcijos konstrukciniais elementais vadinami sluoksniuoti konstrukciniai elementai, kurių išorinio sluoksnio medžiagos tamprumo modulis E_1 (arba šlyties modulis G sukimo atveju) yra didesnis $(E_1>E_2)$ už sekančio vidinio sluoksnio medžiagos tamprumo modulį E_2.

Atvirkštinės konstrukcijos konstrukciniais elementais vadinami simetriniai sluoksniuoti konstrukciniai elementai, kurių išorinio sluoksnio medžiagos tamprumo modulis E_1 yra mažesnis $(E_1>E_2)$ už sekančio vidinio sluoksnio medžiagos tamprumo modulį E_2.

Simetriniai konstrukciniai elementai priklausomai nuo išorinių sluoksnių skaičiaus vidurinio sluoksnio atžvilgiu bei stiprumo (σ_x, τ_{xy}) ir standumo *(B, D, K)* savybių dėsningumų skirtumo, skirstomi į pirmos ir antros grupės konstrukcinius elementus.

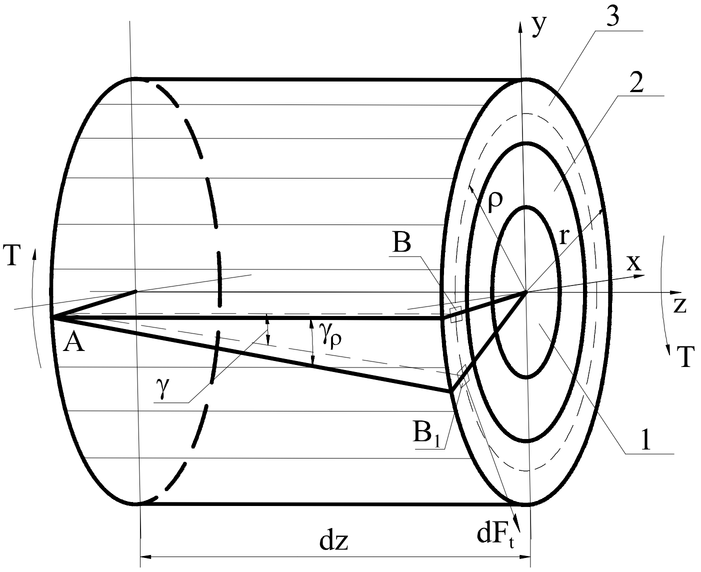
Pirmajai grupei priklauso konstrukciniai elementai, sudaryti iš 3, 7, 11 ir t.t. sluoksnių, turintys po nelyginį išorinių sluoksnių skaičių, išsidėsčiusių vidurinio sluoksnio atžvilgiu, skaičių.

Antrajai grupei priklauso konstrukciniai elementai, sudaryti iš 5, 9, 13 ir t.t. sluoksnių, turintys po lyginį išorinių sluoksnių, išsidėsčiusių vidurinio sluoksnio atžvilgiu, skaičių [3].

Kadangi šiame darbe nagrinėjami tik apvalaus skerspjūvio, sukimo momentais apkrauti daugiasluoksniai konstrukciniai elementai, tai visi jie yra simetrinės konstrukcijos.

1.2.2 Tangentinių įtempimų nustatymas

Nagrinėjant daugiasluoksnio sukamo strypo deformacijas laikoma, kad nėra praslydimo tarp strypą sudarančių sluoksnių, o deformacijos yra tiesiog proporcingos atstumui nuo strypo centro. Daugiasluoksnius strypus sudaro sluoksniai, kurių mechaninės savybės yra izotropinės, t.y. mechaninės savybės visame skerspjūvyje yra vienodos. Taip pat taikoma plokščiųjų pjūvių hipotezė ir tariama, kad visame skersiniame pjūvyje, kaip ir izotropiniame strype, veikia tik tangentiniai įtempimai.



1. 6 pav. Sukamo trisluoksnio strypo elementas

Norėdami nustatyti įtempimus, iš sukamo trisluoksnio strypo, kurį sudaro elementai l, 2, 3, turintys skirtingus šlyties modulius G_1, G_2, G_3, išskiriame ilgio *dz* elementą (1.6 pav).

Sukinio momentas *T* strypo skerspjūvyje pasiskirsto pagal strypą sudarančių elementų šlyties modulius G_i, todėl spindulio ρ nutolusiame ploto elemente dA veikianti tangentinė jėga:

$$dF_t = \tau_{\rho i} dA\,; \tag{16}$$

o jo sukeltas sukimo momentas

$$dT = dF_t \cdot \rho = \tau_{\rho i} \cdot \rho \cdot dA\,; \tag{17}$$

Suintegravę šį momentą viso skerspjūvio atžvilgiu gauname:

$$T = \int_A dT = \int_A \tau_{\rho i} \cdot \rho \cdot dA\,. \tag{18}$$

Toliau šią lygtį spręsime naudodamiesi žinoma deformacijos ir įtempimų ryšio lygtimi, sudaroma remiantis 1.6 pav. parodyta sukamo elemento deformacija

$$dz \cdot \gamma_\rho = \rho \cdot d\varphi\,; \tag{19}$$

arba

$$\gamma_\rho = \theta \cdot \rho\,; \tag{20}$$

čia

$$\theta = \frac{d\varphi}{dz}\,; \tag{21}$$

čia θ vadinamas santykiniu susisukimo kampu.

Remiantis Huko šlyties dėsniu, kad $\tau = G\gamma$, sluoksnyje, nutolusiame nuo centro spinduliu ρ, tangentiniai įtempimai bus tokie:

$$\tau_{\rho i} = G_i \cdot \gamma_\rho = G_i \cdot \theta \cdot \rho\,; \tag{22}$$

$\tau_{\rho i}$ reikšmę įrašius į (18) lygtį;

$$T = \int_A G_i \cdot \theta \cdot \rho^2 \cdot dA = \theta \int_A G_i \cdot \rho^2 \cdot dA = \theta \sum_{i=1}^{n} G_i \cdot I_{pi}\ . \tag{23}$$

Po integralo ženklu $\int_A G_i \cdot \rho^2 \cdot dA$ yra tam tikro sluoksnio polinis inercijos momentas, padaugintas iš to sluoksnio šlyties modulio. Šį integralą pažymėję raide K gauname, jog strypo standumas sukimo atveju

$$K = \sum_{i=1}^{n} G_i \cdot I_{pi}\ . \tag{24}$$

Iš (21) išreiškiame

$$\theta = \frac{T}{\sum_{i=1}^{n} G_i \cdot I_{pi}} = \frac{T}{K} \quad . \tag{25}$$

Ir šią reikšmę įrašome į (22) lygtį

$$\tau_{\rho i} = \frac{T \cdot \rho \cdot G_i}{K} . \tag{26}$$

Taigi gauta, kad bet kuriame sukamo strypo sluoksnyje tangentinių įtempimų dydis yra lygus sukimo momentui, padalytam iš viso strypo skerspjūvio standumo sukimo atveju K ir padaugintam iš atstumo ρ iki nagrinėjamo sluoksnio ir to sluoksnio šlyties modulio.

Ši formulė savo forma ir turiniu yra panaši į sukamo izotropinio strypo tangentinių įtempimų išraišką:

$$\tau = \frac{T \cdot \rho}{I_p} . \tag{27}$$

Analizuojant (26) formulę gauta, kad tangentinių įtempimų diagramoje, pereinant iš vieno sluoksnio į kitą, bus gautas įtempimų šuolis, proporcingas šių sluoksnių šlyties modulių santykiui. Analogiškai lenkiamiems strypams $(\sigma_{i+1} = \sigma_i \frac{E_{i+1}}{E_i})$, galima parašyti, kad

$$\tau_{\rho i+1} = \tau_{\rho i} \frac{G_{i+1}}{G_i} . \tag{28}$$

Tangentiniai įtempimai veikia ne tik skersiniame sukamo strypo pjūvyje, bet dėl įtempimų dualumo tokio .pat dydžio, tik priešingos krypties τ įtempimai veikia ir išilginiuose strypo pjūviuose. Be to, įstrižuose 45° pjūviuose išvestame veikia normaliniai tempimo ir gniuždymo įtempimai, kurių dydis lygus tangentinių įtempimų dydžiams, apskaičiuotiems pagal (26) ir (28) formules. Tokiu būdu apskaičiuotas įtempimų reikšmes būtina palyginti su strypą sudarančių medžiagų atsparumu šlyčiai įvairiomis kryptimis. Reikėtų atminti, jog tokių, plačiai naudojamų medžiagų kaip stiklaplasčių ar angliaplasčių atsparumas šlyčiai labai skiriasi ir tai priklauso nuo armuojančio audinio išdėstymo kampo [3].

1.2.3 Strypo standumas ir deformacijos

Sukamo daugiasluoksnio strypo standumas išreikštas (24) formule, kurią galime perrašyti šitaip:

$$K = \sum_{i=1}^{n} G_i \cdot I_{pi} = I_{pk} \cdot G_k \tag{29}$$

Sukamo daugiasluoksnio strypo ekvivalentinis šlyties modulis G_k apskaičiuojamas žinant atskirų sluoksnių šlyties modulius G_i, sluoksnių polinius inercijos momentus I_{pi} ir viso strypo polinį inercijos momentą $I_k = \sum I_{pi}$ pagal šią išraišką:

$$G_k = \frac{G_1 I_{p1}}{I_{pk}} + \frac{G_2 I_{p2}}{I_{pk}} + ... + \frac{G_n I_{pn}}{I_{pk}} \tag{30}$$

Sukamo apvalaus daugiasluoksnio strypo deformaciją arba susisukimo kampą randame iš (21) lygties. Įrašę santykinio susisukimo reikšmę iš (25) lygties gauname:

$$d\varphi = \theta \cdot dz = \frac{T}{K} \cdot dz \tag{31}$$

Iš čia pjūvio z susisukimo kampas

$$\varphi_z = \int_0^z \frac{T}{K} \cdot dz = \frac{T \cdot z}{K} \tag{32}$$

Viso daugiasluoksnio strypo didžiausias susisukimo kampas:

$$\varphi_{\max} = \frac{T \cdot I}{K} \tag{33}$$

Gautasis susisukimo kampas yra sukamo strypo absoliutinė šlyties deformacija dėl skerspjūvyje veikiančių tangentinių įtempimų. Kaip žinome, įstrižuose pjūviuose veikia normaliniai įtempimai ir juose gaunama didžiausia linijinė deformacija. Kai įstrižo pjūvio kampas lygus 45°:

$$\varepsilon_i = \pm \frac{1}{E_k}(\sigma_1 - \nu_i \sigma_3) = \pm \frac{\tau_{\rho i}}{E_k}(1 + \nu_i) \tag{34}$$

čia ν_i - Puasono koeficientas.

Jei apskaičiuojamos didžiausios linijinės deformacijos, kurios atsiranda strypo paviršiuje, tai (34) formulėje imame paviršinio sluoksnio tangentinių įtempimų reikšmę ir paviršinio sluoksnio medžiagos Puasono koeficiento reikšmę. Ši formulė leidžia nustatyti bet kuriame sluoksnyje atsirandančias deformacijas. Tai būtina, kai strypai daugiasluoksniai, nes leistinieji įvairių sluoksnių deformacijų dydžiai yra skirtingi [3].

1.3 Sukimas už tamprumo ribos

1.3.1 Pilnavidurių homogeninių strypų plastiškas sukimas

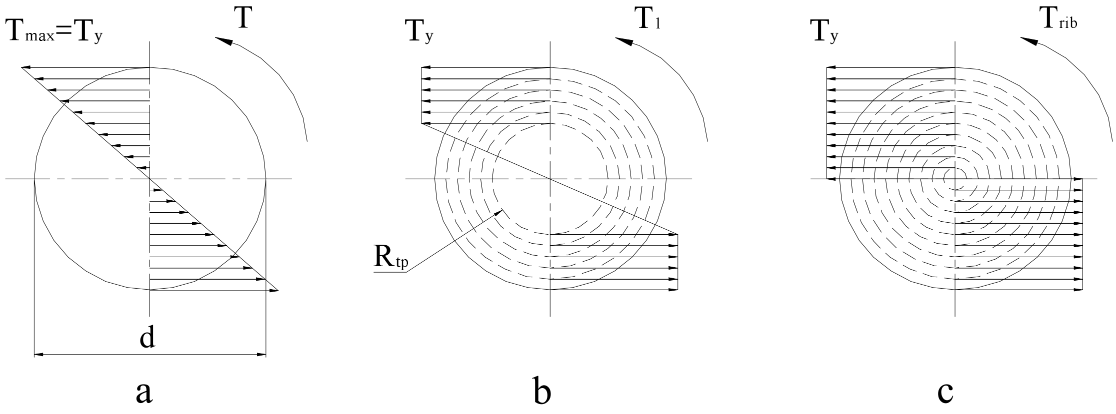
Pagal žinomą tangentinių įtempimų išraišką (27) tamprumo ribose, rašoma, kad:

$$\tau_{\max} = \tau_y = \frac{T \cdot \rho_{\max}}{I_p} = \frac{T \cdot R}{I_p} \tag{35}$$

Tuomet iš šios lygties gauta, kad tampraus deformavimo atveju, maksimali sukimo momento reikšmė T_y yra lygi:

$$T_y = \frac{\tau_y \cdot I_p}{R} = \tau_y \cdot W_p = 0{,}5\pi R^3 \tau_y \tag{36}$$

Didinant sukimo momentą, didžiausių įtempimo veikimo vietose ima rastis plastinės deformacijos, tačiau jų didėjimą riboja tampri strypo vidurinė dalis (šerdis), kurios spindulys R_{tp} (1.7 pav. b)



1.7 pav. Plastinių deformacijų pasiskirstymas sukimo atveju

Bendru atveju sukimo momentas gali būti apskaičiuojamas iš formulės:

$$T = \int_A^0 \tau \cdot \rho dA = \int_0^R \tau \cdot \rho \cdot (2\pi\rho d\rho) = 2\pi \int_0^R \tau \cdot \rho^2 d\rho \tag{37}$$

Kai viena strypo skerspjūvio dalis patiria tamprųjį, o kita dalis – plastinį deformavimą, (l.7 pav. b) ir plastinės zonos pradžia nusakoma spinduliu R_{tp}, o įtempimas t_y, galime parašyti santykį

$$\frac{\tau_y}{R_{tp}} = \frac{\tau}{\rho} \text{ arba } \tau = \frac{\tau_y}{R_{tp}} \cdot \rho \tag{38}$$

Tuomet bendrąją lygtį (37), skirtą apskaičiuoti T, galime suskirstyti į atskiras dalis, kai:

1. ρ kinta nuo 0 iki R_{tp} $(0 \le \rho \le R_{tp})$;
2. ρ kinta nuo R_{tp} iki R $(R_{tp} \le \rho \le R)$.

Tada esant plastinei ir tampriai zonai, dalinai plastinis sukimo momentas:

$$\begin{aligned} T_{dpl} &= 2\pi \int_0^{R_{tp}} \rho^2 \cdot \tau d \cdot \rho + 2\pi \int_{R_{tp}}^{R} \rho^2 \cdot \tau_y \cdot d\rho = 2\pi \int_0^{R_{tp}} \rho^2 \left(\frac{\tau_y}{R_{tp}} \rho \cdot d\rho \right) + \\ &+ 2\pi \int_{R_{tp}}^{R} \rho^2 \cdot \tau_y \cdot d\rho = \frac{1}{2}\pi\tau_y \cdot R_{tp}^3 + \frac{2}{3}\pi\tau_y \cdot R^3 - \frac{2}{3}\pi \cdot \tau_y \cdot R_{tp}^3 = \frac{\rho\tau_y\left(4R^3 - R_{tp}^3\right)}{6} \end{aligned} \tag{39}$$

Didėjant sukimo momentui T, plastinės deformacijos pasireiškia vis gilesniuose strypo sluoksniuose. Ribinis būvis bus gautas, kai plastinė deformacija bus gauta visame strypo skerspjūvyje

(1.7 pav. c). Tuomet sukamo strypo skerspjūvio laikomoji galiaišsenka ir plastinės šlyties deformacijos ima nekliudomai didėti, o strypas ties tuo skerspjūviu plastiškai suyra. Tuo metu skerspjūvyje veikia ribinė sukimo momento reikšmė (T_{rib}), kurios reikšmę gauname iš 35 lygties. Kai $R_{tp} = 0$, tuomet:

$$T_{rib} = T_{pl} = \frac{2\pi\tau_y R^3}{3} \tag{40}$$

Lygtį (40) padalinus iš (36) gaunama, kad:

$$T_{pl} = \frac{4}{3} T_y \tag{41}$$

Siekiant analogijos su tampriosios stadijos ribinės įražos išraiška (36), pastaroji – plastinės stadijos ribinė įrąža gali būti reiškiama taip:

$$T_{pl} = \tau_y \cdot W_{p,pl} \tag{41}$$

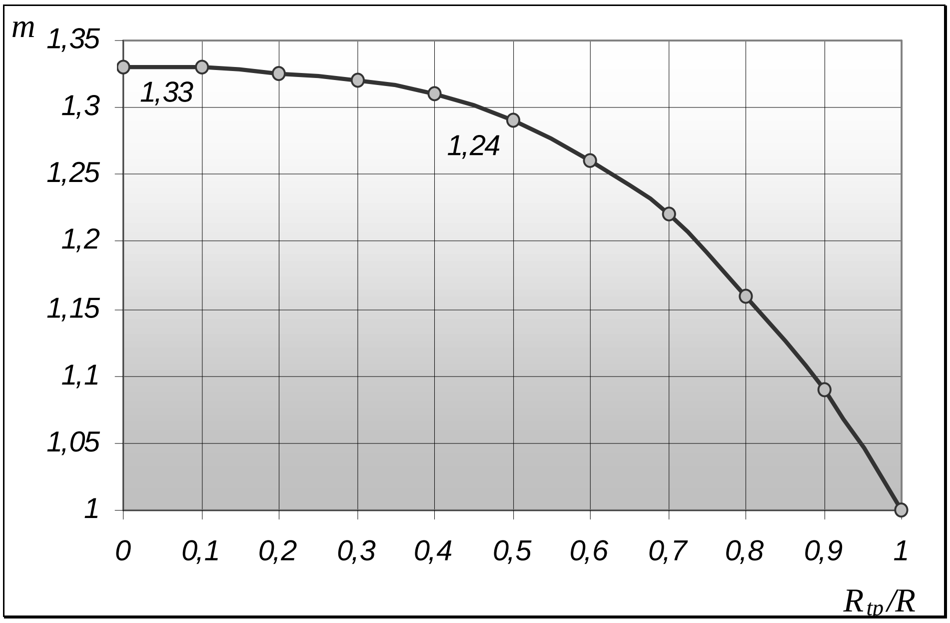
čia geometrinis rodiklis plastinis polinis atsparumo momentas:

$$W_{p,pl} = \frac{2}{3} \pi R^3 \tag{42}$$

Palyginus dvi ribines įrąžas (tamprios stadijos ir plastinės stadijos)gauta, kad plastinės stadijos ribinis sukimo momentas yra m kartų didesnis nei tampriosios stadijos. Todėl plastinio deformavimo efektyvumo koeficientas:

$$m = \frac{T_{pl}}{T_{el}} = \frac{4}{3} = 1{,}33 \tag{43}$$

Plastinio deformavimo efektyvumo koeficiento m kitimą, kintant plastinio deformavimo zonai, patogu nagrinėti nuo spindulių R_{tp} ir R santykio. Kai $R_{tp} / R = 1$, tuomet plastinės zonos sluoksnio storis lygus 0 ir $m = 1$, o kai $R_{tp} / R = 0$, tuomet plastiškai deformuotas visas strypo skerspjūvis ir $m = 1{,}33$. Perėjimas nuo $m = 1{,}33$ iki $m = 1$ kintant R_{tp} / R, kinta kaip parodyta 1.8 pav.



l. 8 pav. Plastinio deformavimo efektyvumo koeficiento *m* kitimas kintant plastinio deformavimo zonai

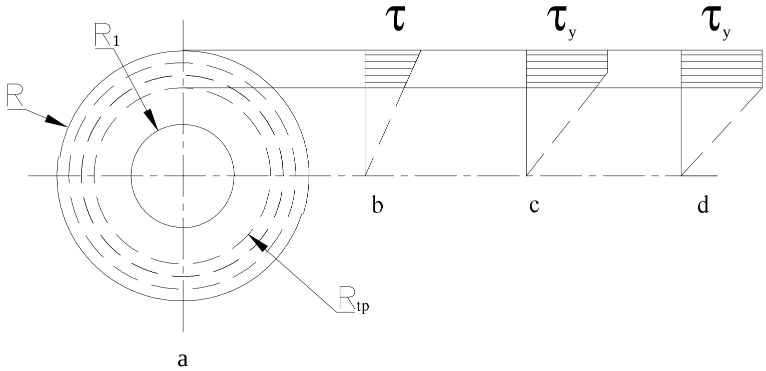
Tai rodo, kad vidurinė strypo dalis turi nežymią įtaką sukimo momento didėjimui. Kai plastinė zona yra apėmusi puse skersmens $(R_{tp} = 0{,}5R)$, tai sukimo momento dydis sudaro 91% viso sukimo momento padidėjimo $(m = 1{,}24)$.

Tokiu būdu skaičiuojant sukamus strypus už tamprumo ribos, t.y. leidžiant strype rastis plastinėms deformacijoms, sukimo momentas skerspjūvyje gali padidėti trečdaliu. Šis santykis gaunamas statiškai išsprendžiamiems sukamiems strypams. Esant statiškai neišsprendžiamiems strypams, pastarasis suyra, kai keliose $(k+1)$ skerspjūviuose ar ruožuose sukimo momentas pasiekia ribinę reikšmę T_{rib}, (40 lygtis). Taigi, sukamo strypo plastinės stadijos laikomoji galia, kaip ir kitais deformavimo atvejais, tampa dar didesnė, lyginant su tampriosios stadijos laikomąja galia.

Tokiu būdu koeficientas *m* gali įgyti reikšmes žymiai didesnes nei 1.33 [6].

1.3.2 Tuščiavidurių homogeninių strypų plastiškas sukimas

Nagrinėjame tuščiavidurį strypą (1.9 pav., a), kurio išorinis spindulys yra R, o vidinis R_1.



1. 9 pav. Tangentinių įtempimų pasiskirstymas vamzdyje

Iš medžiagų mechanikos žinoma, kad žiediniame skerspjūvyje tangentiniai įtempimai yra pasiskirstę pagal trikampį (1 .9 pav. b). Įtempimams vamzdžio tipo išoriniuose sluoksniuose pasiekus τ_y reikšmę ir toliau didinant apkrovą – sukimo momentą, dalis vamzdžio sienutės bus plastiškai deformuota, o likusioji dalis dar liks tampri (1.9 pav. c). Skiriamoji riba yra spindulys R_{tp}. Sukimo momento reikšmė šiam atvejui bus apskaičiuojama naudojant veleno (40) lygtį, nes centrinės skylės įtaka yra ignoruojama dėl įtempimų τ tamprioje zonoje tiesinio pasiskirstymo, t.y.:

$$T_{dpl} = \frac{\pi \tau_y}{6}\left(4R^3 - R_{tp}^3\right). \tag{44}$$

Tačiau realiai, tuščiavidurio vamzdžio skerspjūvio sritis, apribota spinduliu R_1, visai nedalyvauja apkrovos priėmime, todėl iš momento reikšmės, apskaičiuotos pagal (44) lygtį, reikalinga tam tikrą sukimo momento reikšmę atimti. Tai galima padaryti apskaičiavus momento reikšmę, kurios reikia įsivaizduojamo veleno, kurio spindulys R_1 tampriam deformavimui. Panaudojus (36) lygtį, gaunama, kad:

$$T_{elR_1} = \frac{\pi R_1^3}{2}\tau . \tag{45}$$

Kadangi iš τ įtempimų pasiskirstymo diagramos (1.9 pav., c) galima parašyti proporciją:

$$\frac{\tau}{R_1} = \frac{\tau_y}{R_{tp}} \text{ arba } \tau = \frac{R_1}{R_{tp}}\tau_y \tag{46}$$

Tuomet sukimo momento dydis ant įsivaizduojamo veleno, kurio skersmuo lygus tuščiavidurio ertmei, yra lygus:

$$T_{elR_1} = \frac{\pi R_1^4}{2R_{tp}}\tau_y . \tag{47}$$

Tuomet dalinai plastinis sukimo momentas vamzdžiui yra lygus:

$$T_{dpl} = \frac{\pi\tau_y}{6}\left(4R^3 - R_{tp}^3\right) - \frac{\pi R_1^4}{2R_{tp}}\tau_y = \frac{\pi\tau_y}{6R_{tp}}\left(4R^3 R_{tp} - R_{tp}^4 - 3R_1^4\right). \tag{48}$$

Kai vamzdis yra plastiškai deformuojamas visame skerspjūvyje, tuomet ribinis sukimo momentas gaunamas iš lygties (48), priėmus, kad $R_{tp} = R_1$:

$$T_{rib} = T_{pl} = \frac{\pi\tau_y}{6R_1}\left(4R^3 \cdot R_1 - 4R_1^4\right) = \frac{2\pi\tau_y}{3}\left(R^3 - R_1^3\right). \tag{49}$$

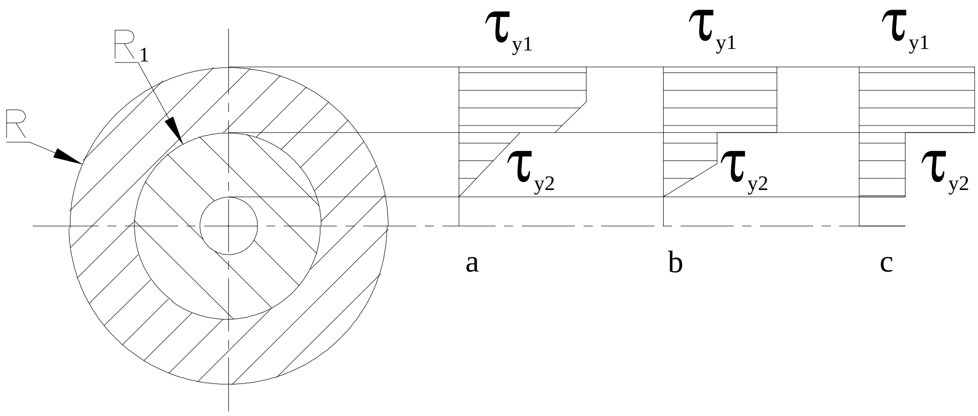
Ši lygtis gali būti gaunama du kartus panaudojus (40) lygtį, t.y. iš pilnai plastiškai deformuoto strypo atėmus pilnai plastiškai deformuotą šerdį, kurios skersmuo lygus centrinės skylės skersmeniui:

$$T_{pl} = \frac{2}{3}\pi\tau_y R^3 - \frac{2}{3}\pi\tau_y R_1 = \frac{2}{3}\pi\tau_y\left(R^3 - R_1^3\right). \tag{50}$$

[6].

1.3.3 Daugiasluoksnių strypų plastiškas sukimas

Skaičiuojant daugiasluoksnius strypus, galima pasinaudoti homogeninių strypų formulėmis. Pvz., skaičiuojant dvisluoksnį strypą, kai pirmasis sluoksnis deformuojamas dalinai plastiškai, o antrasis tampriai (žr. 1.10 pav., a), strypo elastinį sukimo momentą galima apskaičiuoti kaip suminį abiejų sluoksnių T_{dpl1} ir T_{el2} sukimo momentą.



1.10 pav Įtempimų pasiskirstymas vamzdžio skerspjūvyje

Kai strypo pirmasis sluoksnis plastiškai deformuotas visu skerspjūviu, o antrasis dalinai plastiškai (1.10 pav., b), strypo sukimo momentas yra lygus pirmo sluoksnio plastinio sukimo momento ir antro sluoksnio dalinai plastinio sukimo momentų sumai.

Strypo plastinį sukimo momentą T_{pl} (1.10 pav., c) išsireiškiame kaip suminį kiekvieno sluoksnio plastinį sukimo momentą:

$$T_{pl} = \tau_{y1} \cdot W_{ppl1} + \tau_{y2} \cdot W_{ppl2} + ... + \tau_{yn} \cdot W_{pp\ln} \tag{51}$$

Jeigu turime daugiasluoksnį strypą iš kelių medžiagų, ir iš kiekvienos medžiagos yra keli sluoksniai, ir tą strypą deformuojame plastiškai visu skerspjūviu, tai plastinį sukimo momentą galima apskaičiuoti pagal formulę:

$$T_{pl} = \tau_{y1}\left(\sum W_{ppl1}\right) + \tau_{y2}\left(\sum W_{ppl2}\right) + ... + \tau_{yn}\left(\sum W_{pp\ln}\right) \tag{52}$$

čia: $\sum W_{pp\ln}$ - n-tosios medžiagos sluoksnių poliniai plastiniai atsparumo momentai.

Skaičiuojant daugiasluoksnius strypus iki tamprumo ribos (kai bent vienas sluoksnis pasiekia takumo ribos įtempimus), pirmiausiai nustatome sluoksnį, kuris šiuos įtempimus pasieks pirmasis ir pagal šio sluoksnio maksimalų susukimo kampą (formulė 23) apskaičiuojame visą daugiasluoksnį strypą:

Kad nustatyti kuriame sluoksnyje takumo ribos įtempimai bus pasiekti pirmiausiai, visą daugiasluoksnį strypą apkrauname bet kokiu sukimo momentu. Pagal jį nustatome įtempimus, kylančius kiekvieno sluoksnio išorėje. Pagal gautųjų įtempimų santykį su leistinaisiais įtempimais nustatome kuris sluoksnis pirmasis pasieks takumo ribos įtempimus, t.y. kuriam sluoksniui šis santykis yra didžiausias, tas sluoksnis pirmasis ir pasieks takumo ribos įtempimus.

$$\frac{\tau_{fi}}{\tau_{yi}} \tag{53}$$

2 SUKAMŲ ELEMENTŲ TYRIMAS, ESANT TAMPRIAM DEFORMAVIMUI

2. 1 Tyrimams naudojamų medžiagų charakteristikos

Šiame darbe skaičiavimams pasirinktos homogeninės medžiagos, kurių mechaninės savybės visomis kryptimis vienodos. Dažniausiai skaičiuojami daugiasluoksniai strypai iš dviejų arba trijų medžiagų. Šių medžiagų užsiduotos reikalingos charakteristikos pateiktos 2. 1 lentelėje. Skaičiavimams naudotos medžiagos pagal tamprumo modulį *E*, šlyties modulį *G* bei takumo ribą T_y pavadintos *A*, *B* ir *C*.

2.1 lentelė

Skaičiavimams pasirinktų medžiagų mechaninės charakteristikos

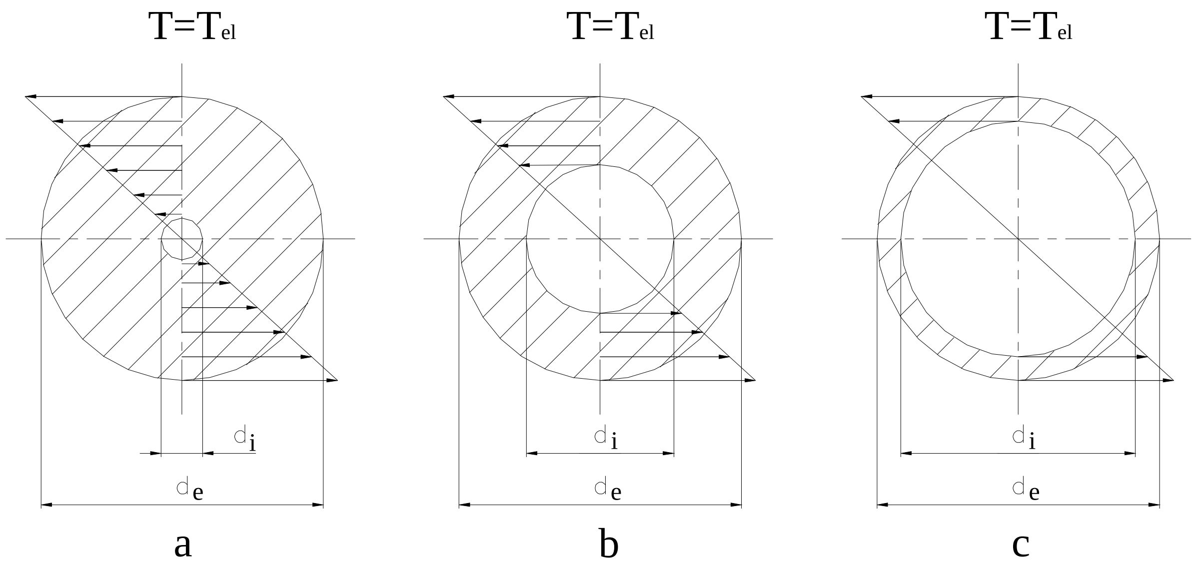
Medžiagų parametrai	*Medžiagos pavadinimas*		
	A	***B***	***C***
E, Gpa	***210***	***160***	***80***
G, Gpa	***120***	***60***	***30***
τ_y***, MPa***	***100***	***60***	***30***

Kai skaičiuojami homogeniniai strypai, laikome, kad jie pagaminti iš *A* medžiagos. Kai skaičiuojami daugiasluoksniai strypai iš dviejų medžiagų, laikome kad jie pagaminti iš *A* ir *B* medžiagų. Skaičiuojant strypų mechaninių savybių priklausomybes nuo medžiagos parametrų, medžiagų tipai neįvardijami.

2.2 Homogeninių, deformuojamų iki tamprumo ribos, elementų tyrimas

2.2.1 Vamzdžio skylės skersmens d_i, įtakos T_{el} tyrimas

Nustatome kaip kinta maksimalus sukimo momentas T_{el} priklausomai nuo to koks vamzdis deformuojamas, t.y. imame skirtingus vamzdžius, kurių išoriniai diametrai d_e yra vienodi, o vidiniai (skylės) diametrai *d*, kinta nuo O iki d_e. Laikome, kad strypai pagaminti iš *A* medžiagos. Skaičiavimo eskizas pateiktas 2.1 pav.



2. 1 pav Vamzdžio skaičiavimo eskizas

Skaičiavimus atliekame iki tamprumo ribos.

Maksimalus sukimo momentas T_{el} dar nesukeliantis plastinių deformacijų apskaičiuojamas pagal formulę (1). Polinis atsparumo momentas :

$$W_p = \frac{\pi \cdot d_e^3}{16}. \tag{54}$$

Polinis atsparumo momentas strypams su skirtingais d_i apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_p = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{d_e^4 - d_i^4}{d_e}. \tag{55}$$

Skaičiavimų rezultatai pateikti 2.2 lentelėje.

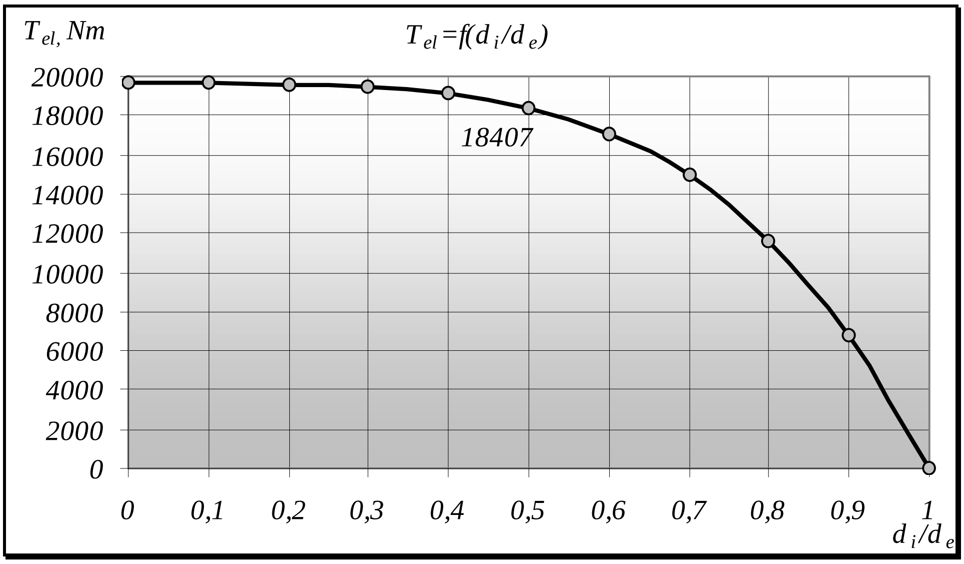
2.2 lentelė.

Vamzdžio skylės skersmens d_i įtaka elastiniam sukimo momentui T_{el}

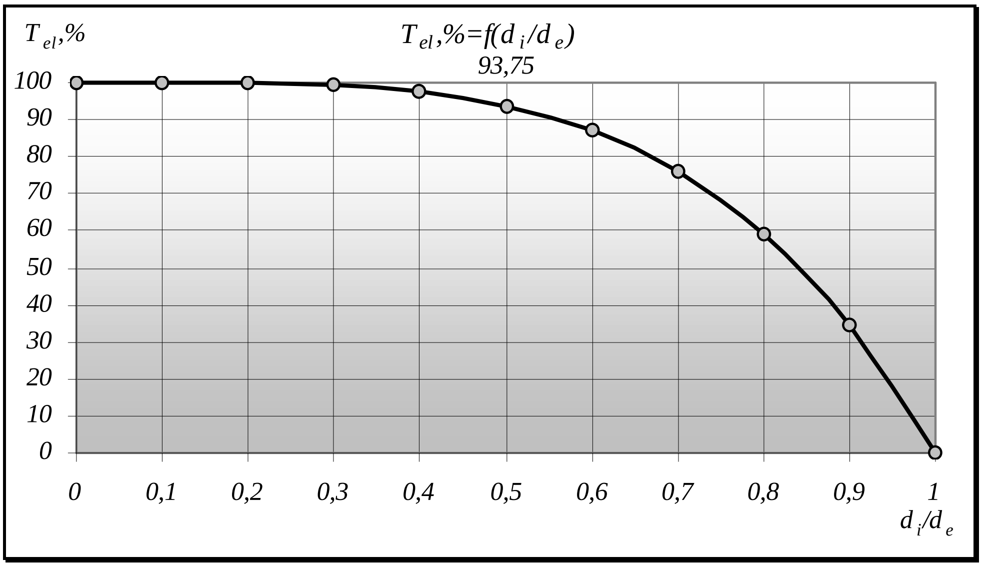
d_e, m	d_i, m	d_i/d_e	W_p, m^3	T_{el}, Nm	T_{el}, %
0.1	0	0	0.00019635	19634.95408	100
	0.01	0.1	0.00019633	19632.99059	99.99
	0.02	0.2	0.000196035	19603.53816	99.84
	0.03	0.3	0.000194759	19475.91096	99.19
	0.04	0.4	0.000191323	19132.29926	97.44
	0.05	0.5	0.000184078	18407.76945	93.75
	0.06	0.6	0.000170903	17090.26404	87.04
	0.07	0.7	0.000149206	14920.60161	75.99
	0.08	0.8	0.000115925	11592.47689	59.04
	0.09	0.9	6.75246E-05	6752.46071	34.39
	0.1	1	0	0	0

Sukimo momento T_{el} priklausomybės nuo strypo skylės diametro d_i grafikas pateiktas 2.2 pav. To paties sukimo momento T_{el} kitimas procentais pateiktas 2.3 pav. T_{el} kitimą procentais išreiškiame pagal formule:

$$T_{el},\% = \frac{T_{el} \cdot 100}{T_{el\,\max}}. \tag{56}$$



2.2 pav. Sukimo momento T_{el} priklausomybės nuo strypo skylės diametro d_i grafikas



2.3 pav. Sukimo momento T_{el} priklausomybės nuo strypo skylės diametro d_i grafikas procentais

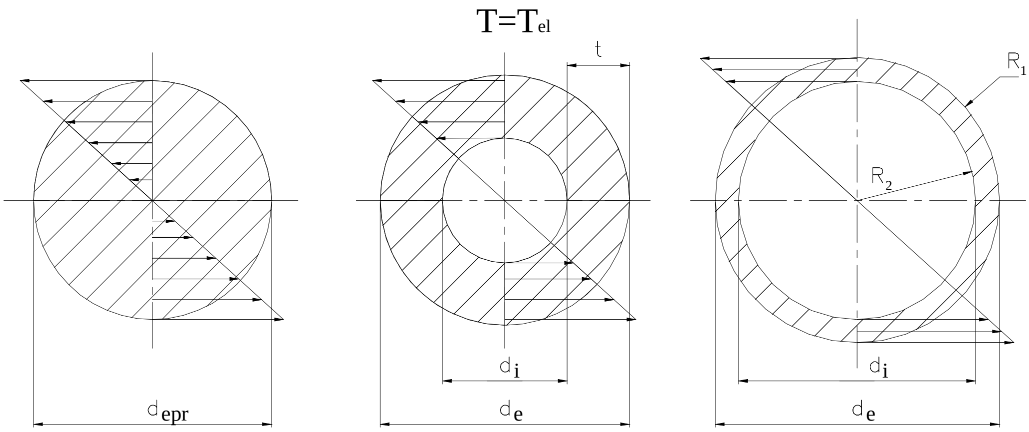
Iš 2.3 pav. pateikto grafiko matome, kad skylės skersmenį *di* padidinus iki $0{,}5d_e$, sukimo momenlas T_{el} sumažėjo tik *6.25%.* O vėliau sukimo momento kreivė kinta pastebimiau, jos kitimo kampas didėja.

Iš to galima daryti išvadą, kad sukamų strypų stiprumui didžiausią įtaką turi išoriniai jo sluoksniai. Nesunku pastebėti, kad tuščiaviduris strypas atlaikys didesnius apkrovimus jeigu „pridėsime" daugiau medžiagos į išorinį jo paviršių negu į skylės sienelių paviršių.

Atlikus elementarius skaičiavimus gautume, kad kai skylės diametras siekia $0{,}6d_e$, skerspjūvio plotas sumažėja tik iki *25%.* Nustatysime kaip kinta T_{el} priklausomai nuo strypo matmenų, išlaikant vienodą skerspjūvio plotą.

2.2.2. Vamzdžio geometrinių parametrų įtakos T_{el} tyrimas

Atliekame skaičiavimus, kokius T_{el} atlaikys to paties skerspjūvio ploto, bet skirtingų matmenų tuščiaviduriai, apvalaus skerspjūvio strypai (vamzdžiai), kai skylės diametrą d_i didiname iki d_{epr} (skaičiavimams užsiduodame, kad $d_{epr}=0.1$ m). Skaičiavimų schema pateikta 2.4 paveikslėlyje. Laikome, kad strypas pagamintas iš *A* medžiagos.



2.4 pav. Vamzdžio geometrinių parametrų įtakos skaičiavimo eskizas

Tokio, pastovaus skerspjūvio ploto strypo plotą apskaičiuojame šia tvarka:

- prie pradinio skersmens strypo *(d_{epr})* ploto pridedame skylės plotą ir gauname menamo strypo plotą;
- gavę menamo strypo plotą iš jo išsiskaičiuojame jo skersmenį;
- iš menamo strypo ploto vėl atėmę skylės plotą išlaikome strypo skerspjūvio plotą pastovų.

Skaičiavimus atliekame pagal šias formules:

Formulės strypo geometrijai aprašyti:

Strypo skerspjūvio plotas:

$$A = \pi(R_1^2 - R_2^2) = const; \tag{57}$$

Strypo skylės skersmuo kinta R_2=0.01, 0.02, 0.03 ...0.1 m;

Tariamo A_1 skerspjūvio ploto strypo, kurio $d_{e1}=d_e$ skersmuo apskaičiuojamas:

$$A_1 = A_2 + A_{pr}; \tag{58}$$

$$A_1 = \pi R_1^2; \tag{59}$$

$$R_1^2 = \frac{A_1}{\pi}; \tag{60}$$

$$d_{e1} = d_e = 2\sqrt{\frac{A_1}{\pi}}. \tag{61}$$

čia: A_2 — skylės plotas;

A - strypo pradinis skerspjūvis.

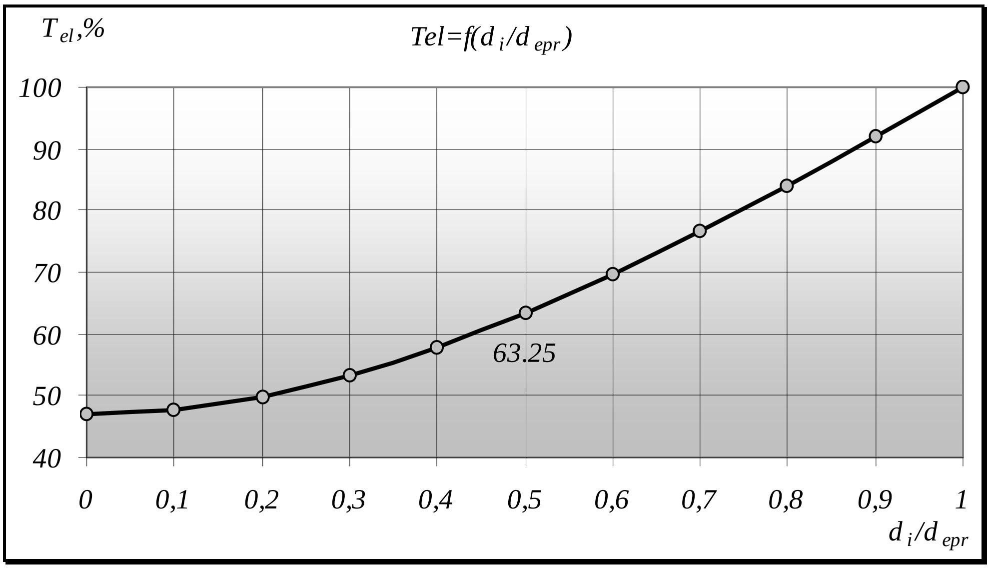
Momentų nustatymui naudojame 12 formule.

Skaičiavimų rezultatų suvestinė pateikta 2.3 lentelėje. Sukimo momento priklausomybės nuo skerspjūvio geometrijos kitimo procentais grafikas pateiktas 2.5 paveikslėlyje.

2.3 lentelė

Sukimo momento priklausomybės nuo skerspjūvio geometrijos

d_i, m	d_i/d_{epr}	d_e, m	W_p, m^3	T_{el}, Nm	T_{el}, %
0	0	0.1	0.000196	19634.95	47.14
0.01	0.1	0.1005	0.000199	19928.26	47.84
0.02	0.2	0.10198	0.000208	20793.95	49.92
0.03	0.3	0.1044	0.000222	22192.11	53.28
0.04	0.4	0.1077	0.000241	24064.39	57.78
0.05	0.5	0.1118	0.000263	26343.06	63.25
0.06	0.6	0.11662	0.00029	28959.35	69.53
0.07	0.7	0.12207	0.000318	31849.45	76.47
0.08	0.8	0.12806	0.00035	34957.7	83.93
0.09	0.9	0.13454	0.000382	38237.71	91.8
0.1	1	0.14142	0.000417	41652.03	100



2.5 pav. Sukimo momento T_{el} priklausomybės nuo geometrijos (kai išlaikomas pastovus skerspjūvio plotas) priklausomybės grafikas

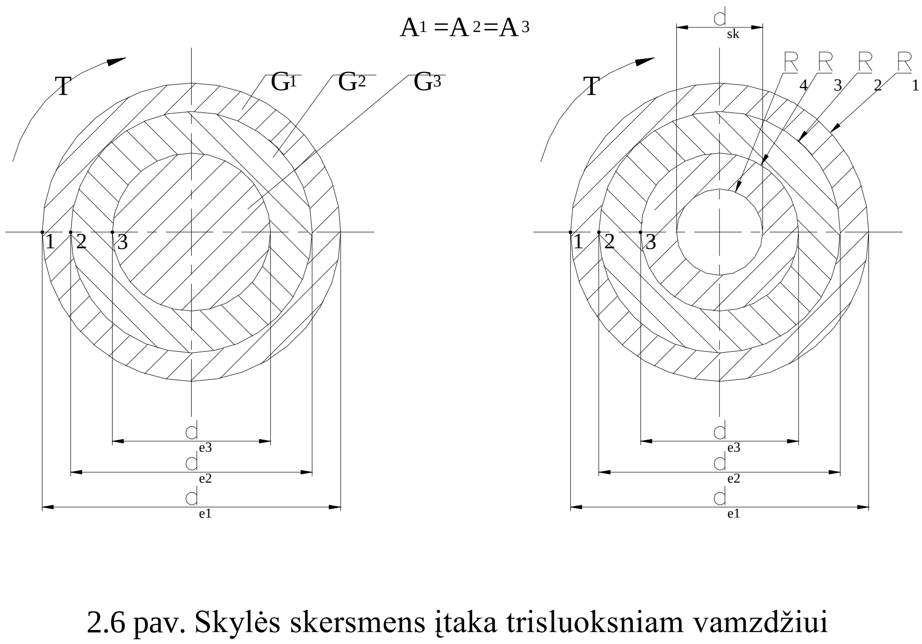
Iš gautų rezultatų matome (žr. 2.5 pav.), kad tuščiaviduris strypas su tokiu pačiu skerspjūvio plotu kaip pilnaviduris, ir kurio skylės diametras lygus to pilnavidurio strypo išoriniam diametrui, atlaiko daugiau negu dvigubai didesnes apkrovas. Kai skylės skersmuo siekia 0,5 pradinio strypo skersmens, T_{el} padidėja nuo 47,14% iki 63,25% ir nuo šio taško T_{el} kitimo kreivė beveik išsitiesina, kinta maždaug tuo pačiu kampu. Kol skylės diametras nesiekia $0{,}5d_{epr}, T_{el}$ kitimo kreivė kinta ne tuo pačiu kampu, ir vis labiau kyla, kas vėl gi rodo, kad kol skylės diametras nedidelis, ji turi nežymią įtaką strypo standumui. Išlaikant tą patį strypo skerspjūvio plotą, kol skylės diametras nedidelis, mažas ir jos plotas. Taigi ir mažai medžiagos prisideda į strypo išorę. Todėl gaunamas mažas T_{el} pokytis.

2.3 Daugiasluoksnių elementų, deformuojamų iki tamprumo ribos tyrimas

Skaičiuojant daugiasluoksnius strypus iki tamprumo ribos laikome, kad daugiasluoksniame sukamame strype T_{elk} bus pasiektas tada, kai bent viename iš sluoksnių bus pasiektas ribinis įtempimas T_{eli}. Nagrinėdami daugiasluoksnio sukamo strypo deformacijas laikome, kad nėra praslydimo tarp strypą sudarančių sluoksnių, o deformacijos yra tiesiog proporcingos atstumui nuo strypo centro.

2.3.1 Skylės skersmens įtakos, trisluoksnio vamzdžio T_{el} tyrimas

Nustatysime kaip kinta daugiasluoksnio tuščiavidurio (3 sluoksnių), tiesioginės konstrukcijos strypo elastinis sukinio momentas T_{el} , priklausomai nuo skylės diametro. Išorinį strypo diametrą išlaikome pastovų, o skylę didiname nuo O iki d_e. Skaičiavimo schema parodyta 2.6 paveikslėlyje.



2.6 pav. Skylės skersmens įtaka trisluoksniam vamzdžiui

Skylės diametrą d_{sk} keičiame nuo 0 iki d_e=*0,1*. Skylės kitimo žingsnis - *0.01 m*.

Tangentinius įtempimus τ_i charakteringuose taškuose 1, 2, 3 apskaičiuojame pagal formulę (26). Viso vamzdžio skerspjūvio standumą sukimo atveju apskaičiuojame pagal formulę (24). Atskirų sluoksnių poliniai inercijos momentai I_{pi} apskaičiuojami pagal formulę:

$$I_{pi} = \frac{\pi}{32}(d_{ei}^4 - d_{ii}^4). \tag{62}$$

Viso daugiasluoksnio vamzdžio ekvivalentinį šlyties modulį G_k apskaičiuojame pagal formulę(30).

Kadangi laikome, kad daugiasluoksniame sukame vamzdyje T_{elk} bus pasiektas tada, kai bent viename iš sluoksnių bus pasiektas ribinis įtempimas τ_{el}, tai nustatome būtent kuriame sluoksnyje bus pasiektas šis įtempimas pirmiausiai ir pagal šio sluoksnio maksimalų sąsūkį bus apkrautas visas daugiasluoksnis vamzdis. Tai nustatome pagal santykį $\frac{\tau_f}{\tau_{adm}}$. Apkrauname vazdį bet kokiu sukimo momentu ir gautus atskirų sluoksnių įtempimus padaliname iš tų sluoksnių leistinųjų įtempimų. Pagal tai, kurio sluoksnio santykis didžiausias, nustatome kuriame sluoksnyje leistinieji įtempimai bus pasiekti pirmiausiai.

Nustačius, kad pirmiausiai τ_{el} bus pasiekti pirmame sluoksnyje, apskaičiuojame šio sluoksnio maksimalų susisukimo kampą, kuriuo suksime visą daugiasluoksnį strypą pagal formulę (25):

Atskirų sluoksnių matmenis nustatome laikydamiesi sąlygos, kad sluoksnių skerspjūvio plotai vienodi. Geometriją nustatome sekančiai:

$$A_1 = A_2 = A_3; \tag{63}$$

$$A_i = \frac{A_{str} - A_{sk}}{3}; \tag{64}$$

$$A_3 = \pi(R_3^2 - R_4^2); \tag{65}$$

$$A_2 = \pi(R_2^2 - R_3^2); \tag{66}$$

$$A_1 = \pi(R_1^2 - R_2^2); \tag{67}$$

$$d_{e3} = 2\sqrt{\frac{A_3 + \pi R_4^2}{\pi}}; \tag{68}$$

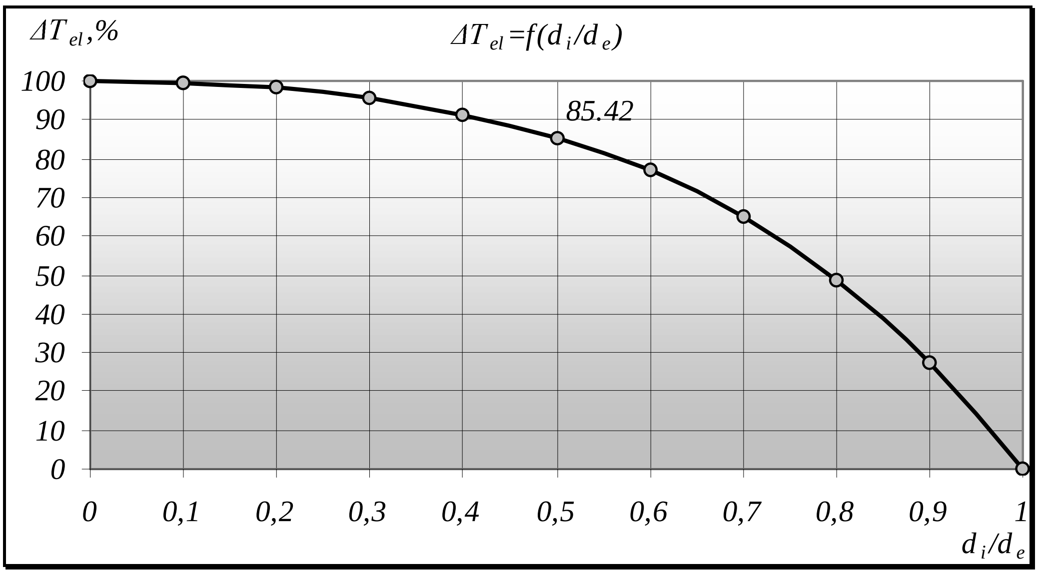
$$d_{e2} = 2\sqrt{\frac{A_2 + \pi R_3^2}{\pi}}. \tag{69}$$

Skaičiavimų rczultatai pateikti 2.4 lentelėje, o elastinio sukimo momento T_{el} priklausomybės nuo skylės diametro d_i kitimo grafikas 2.7 paveikslėliuose.

2.4 lentelė

Elastinio sukimo momento T_{el} priklausomybė nuo skylės diametro d_i

Vamzdžio sluoksnių skersmenys, m²				***Skylės ir išorinio diametro santykis***	***Sluoksnių skerspjūvio plotai, m²***	***Vamzdžio polinis inercijos momentas, m⁴***	***Strypo elastinis sukimo momentas, Nm***	***Elastinio sukimo momento pokytis, %***
d_{e1}	d_{e2}	d_{e3}	d_{sk}	d_i/d_e	$A_1=A_2=A_3$	I_{pk}	T_{el}	ΔT_{el}
	0.081	0.058	0	0	0.00262	9.82E-06	14726	100
	0.081	0.058	0.01	0.1	0.00259	9.82E-06	14660	99.55
	0.082	0.06	0.02	0.2	0.00251	9.80E-06	14451	98.13
	0.083	0.063	0.03	0.3	0.00238	9.74E-06	14071	95.55
	0.084	0.066	0.04	0.4	0.0022	9.57E-06	13470	91.47
0.1	0.086	0.071	0.05	0.5	0.00196	9.20E-06	12579	85.42
	0.088	0.076	0.06	0.6	0.00168	8.55E-06	11310	76.8
	0.091	0.081	0.07	0.7	0.00134	7.46E-06	9555	64.89
	0.093	0.087	0.08	0.8	0.00094	5.80E-06	7186	48.8
	0.096	0.093	0.09	0.9	0.0005	3.38E-06	4057	27.55
	0.1	0.1	0.1	1	0	0	0	0



2.7 pav. Trisluoksnio strypo T_{el} priklausomybės nuo skylės diametro d_i kitimo grafikas procentais

2.7 paveikslėlyje parodytas grafikas atvaizduoja elastinio sukimo momento kitimą nuo skylės diametro procentais. T.y., kai turime pilnavidurį strypą, T_{el} tokio strypo sudaro 100%, o kai tuščiavidurio strypo skylės skersmuo siekia puse išorinio skersmens *(d_i/d_e=0.5),* tokio strypo T_{el} *14.58%* mažesnis negu pilnavidurio strypo.

Palyginus su analogiškais skaičiavimais homogeniniam strypui, matome, kad strypų skylės diametrus padidinus iki *0,5* išorinio strypo diametro, homogeniniam strypui elastinis sukimo momentas sumažėja *6.25%,* o trisluoksniam strypui *14.58%.* Kadangi skaičiavimai buvo atlikti išlaikant atskirų sluoksnių skerspjūvių plotus vienodus, tai trisluoksniam tiesioginės konstrukcijos strypui skylės įtaka elastiniam sukimo momentui yra pastebimesnė. Čia proporcingai sumažėjo ir išorinis, didžiausią šlyties modulį turintis medžiagos sluoksnis (žr. 2.4 lentelę, strypo sluoksnių skersmenis), kuris turi didžiausią įtaką strypo standumui sukimo atveju. Todėl ir T_{el} pokytis tokiame strype ženklesnis.

2. 3. 2. Medžiagos išdėstymo įtakos vamzdžio T_{el} tyrimas

Nustatysime kaip kinta T_{el} priklausomai nuo medžiagos išdėstymo. T.y. imame vienodos geometrijos vamzdžius su skirtingai išdėstytomis medžiagomis. Pirmu atveju skaičiuojame tiesioginės konstrukcijos, antru - atvirkštinės, trečiu - netaisyklingos konstrukcijos vamzdžius. Skaičiavimus atliksime pagal 2.8 paveikslėlyje pateiktą schemą. Vamzdžių geometrinius parametrus parenkame tokius, kad visų sluoksnių skerspjūvių plotai būtų vienodi. Taip galime tiksliau įvertinti T_{el} priklausomybę nuo medžiagos parametrų turint tokią pačią vamzdžių geometriją. Laikome, kad vamzdžiai sudaryti iš *A, B ir C* medžiagų.

Nustatome sluoksnių matmenis: Vamzdžio išorinis diametras $d_{e1} = 0{,}1m$.

Centrinės dalies diametrą išsireiškiame iš sąlygos $A_3 = \frac{1}{3}A = \pi \cdot R^2$, kur A viso vamzdžio skerspjūvis.

$$d_3 = 2R = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}; \tag{70}$$

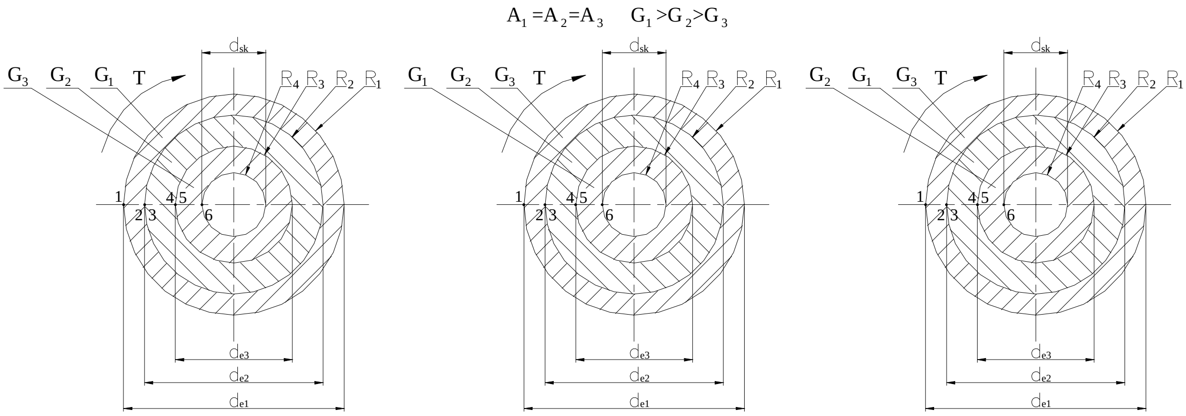
$$A_2 = \pi \cdot R_2^2 - \pi \cdot R_3^2; \tag{71}$$

$$d_2 = 2R_2 = \sqrt{\frac{A_2 + \pi \cdot R_3^2}{\pi}}. \tag{72}$$

Polinius inercijos momentus apskaičiuojame pagal formulę (62). Vamzdžio standumas sukimo atveju randamas iš formulės (24). Ekvivalentinis šlyties modulis apskaičiuojamas pagal formulę (30).

Nustatome kuriame sluoksnyje ribiniai įtempimai bus pasiekti pirmiausiai. Tai atliksime pagal santykį $\frac{\tau_f}{\tau_{adm}}$. Čia τ_f - įtempimai charakteringuose vamzdžio taškuose 1, 2, 3, 4, 5. Kuriame sluoksnyje šis santykis didžiausias, tame sluoksnyje ir bus pasiekti maksimalūs įtempimai pirmiausiai. Įtempimus kylančius šiuose taškuose apskaičiuojame pagal formulę (26):

Nustatę sluoksnį, kuris plastiškai deformuosis pirmas, pagal formulę (25) galime apskaičiuoti to sluoksnio maksimalų santykinį sąsukį θ, kurio suksime visą daugiasluoksnį vamzdį. Skaičiuojame tiesioginės konstrukcijos strypą (2. 8 pav., a), antru atveju - atvirkštinės (2.8 pav., b), trečiu - netaisyklingos (2.8 pav., c) sluoksnių išdėstymo konstrukcijos vamzdžius.



2.8 pav. Daugiasluoksnio vamzdžio konstrukcijų tipai

Rezultatų suvestinė pateikta 2.5 lentelėje. 2.6 lentelėje pateikta įtempimų kiekvieno sluoksnio charakteringuose taškuose suvestinė Įtempimų diagramos pavaizduotos 2.9 paveikslėlyje. T_{el} priklausomybes nuo medžiagos išdėstymo grafikas pateiktas 2.10 paveikslėlyje.

2.5 lentelė

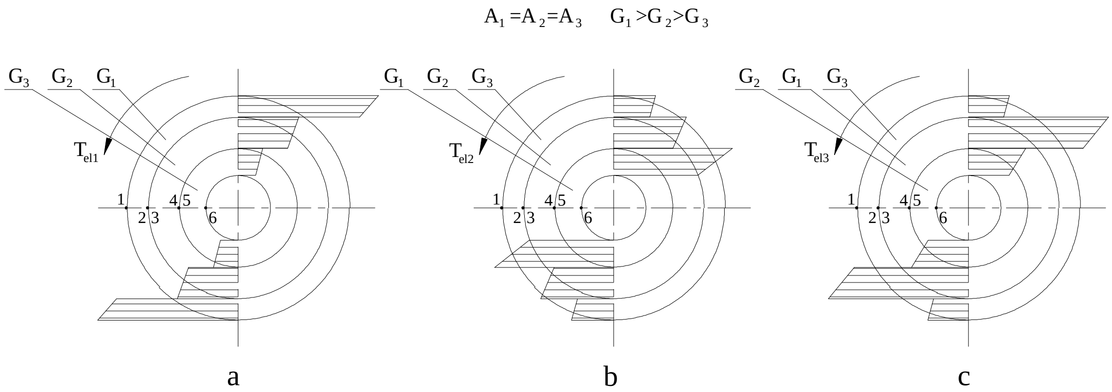
Daugiasluoksnių vamzdžių parametrai

Vamzdžių sluoksnių skersmenys, m				***Skerspjūvio plotai, m^2***	***Sluoksnių poliniai inercijos momentai, m^4***			***Vamzdžio polinis inercijos momentas, m^4***
d_{e1}	d_{e2}	d_{e3}	d_{sk}	A_i	I_{p1}	I_{p2}	I_{p3}	I_{pk}
0,1	***0,0866***	***0,0707***	***0,05***	***0,00196***	***4,295E-06***	***3,068E-06***	***1,841E-06***	***9,204E-06***

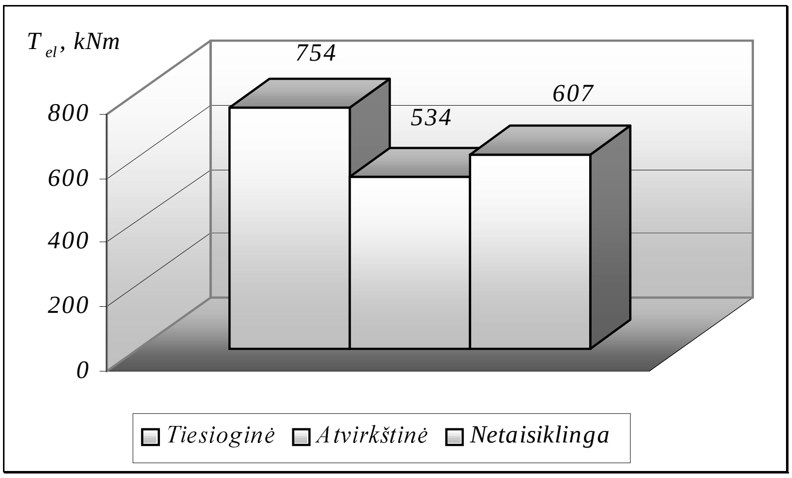
2.6 lentelė

Įtempimų charakteringuose taškuose suvestinė

Konstrukcija	Tiesioginė		Atvirkštinė		Netaisiklinga	
Elastinis sukimo momentas T_{el}, Nm	6250		5300		5800	
Strypo standumas K ,Nm²	754718		533825		607456	
	τ , MPa	τ/τ_{adm}	τ , MPa	τ/τ_{adm}	τ , MPa	τ/τ_{adm}
6 taškas	12,42	0,414	59,57	0,596	28,64	0,477
5 taškas	17,57	0,585	84,24	0,842	40,51	0,675
4 taškas	35,13	0,585	42,12	0,702	81,02	0,81
3 taškas	43,03	0,717	51,59	0,86	99,23	0,992
2 taškas	86,06	0,86	25,79	0,86	24,81	0,826
1 taškas	99,37	0,993	29,79	0,993	28,64	0,955



2. 9 pav. Įtempimai įvairiose daugiasluoksnio vamzdžio konstrukcijose



2.10 pav. Maksimalūs sukimo momentai T_{el} įvairiose konstrukcijose

Iš gautų rezultatų (2.10 pav.) matome, kad didžiausius sukimo momentus T_{el} atlaiko tiesioginės konstrukcijos vamzdžiai. Mažiausius sukimo momentus T_{el} atlaiko atvirkštinės konstrukcijos vamzdžiai. Tiesioginės konstrukcijos vamzdyje pirmo ir antro sluoksnių medžiagų išnaudojimas (tai parodo τ / τ_y santykis) mažėja tolygiai sluoksniams artėjant prie centro. Kuo santykis τ / τ_y 2.6 lentelėje arčiau vieneto, tuo geriau išnaudojamos medžiagos stiprumo savybės. Tiesioginės konstrukcijos vamzdyje didesnio tamprumo modulio sluoksniai išsidėsto toliau nuo vamzdžio centro, taip savo ruožtu įnešdami didesni indelį į vamzdžio standumą.

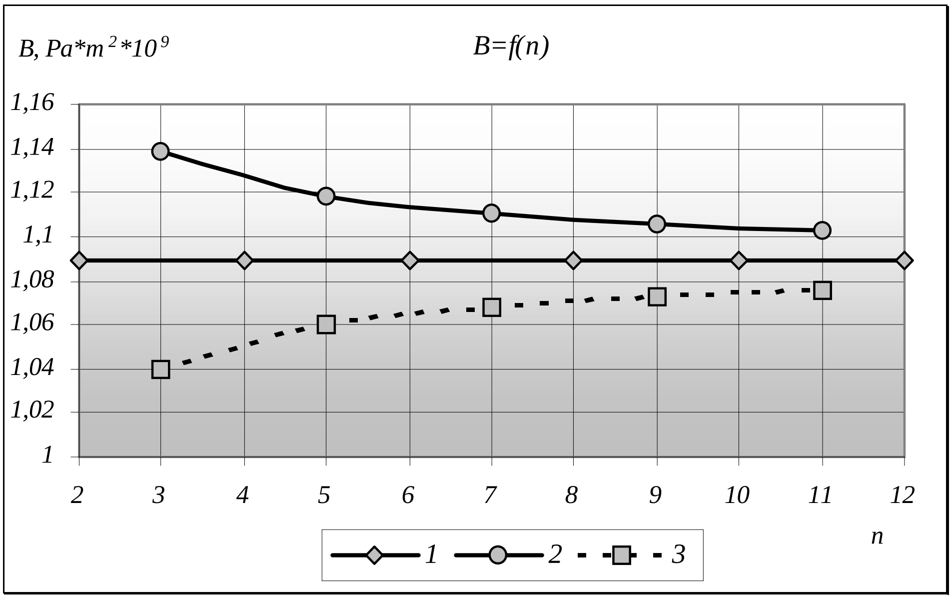
2.3.3 Sluoksnių skaičiaus *n* įtaka standumui *B* tempimo - gniuždymo atveju

Sluoksnių skaičiaus įtaka standumui *B* tempimo - gniuždymo atveju pateikta 2.7 lentelėje, o gautos priklausomybės pavaizduotos 2.11 paveikslėlyje. Atliekant skaičiavimus laikome kad vamzdis pagamintas iš *A* ir *B* medžiagų. Iš gautų rezultatų matome, kad tiesioginių ir atvirkštinių konstrukcijų su lyginiu sluoksnių skaičiumi standumas yra vienodas ir išlieka toks pats didinant sluoksnių skaičių. Taip yra todėl kad nepriklausomai nuo sluoksnių skaičiaus, skerspjūvio ploto dalis tenkanti vienai medžiagai yra nekintanti. Trijų sluoksnių tiesioginės konstrukcijos standumas yra didžiausias, tačiau didėjant sluoksnių skaičiui, medžiagos su didesniu tamprumo moduliu *E* turio dalis konstrukcija santykinai mažeja, todėl ir mažėja standumas *B*. Atvirkštinėse konstrukcijose, didėjant sluoksnių skaičiui, mažėja medžiagos kiekis su mažesniu tamprumo moduliu *E*, todėl standumas *B* ir didėja.

2.7 lentelė

Daugiasluoksnių vamzdžių standumas nuo sluoksnių skaičiaus

n											
Tiesioginė konstrukcijos vamzdis											
B,	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***	***10***	***11***	***12***
Pa*m^2*10^{9}B	***1,089***	***1,138***	***1,089***	***1,119***	***1,089***	***1,11***	***1,089***	***1,106***	***1,089***	***1,103***	***1,089***
Atvirkštinė konstrukcijos vamzdis											
B,	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***8***	***9***	***10***	***11***	***12***
Pa*m^2*10^9	***1,089***	***1,04E***	***1,089***	***1,06***	***1,089***	***1,068***	***1,089***	***1,073***	***1,089***	***1,076***	***1,089***



2.11 pav. Vamzdžio ašinio standumo B priklausomybės nuo sluoksnių skaičiaus n: 1 –su lyginiu sluoksniu skaičiumi, 2 – tiesioginių, 3 – atvirkštinių su nelyginiu sluoksnių skaičiumi.

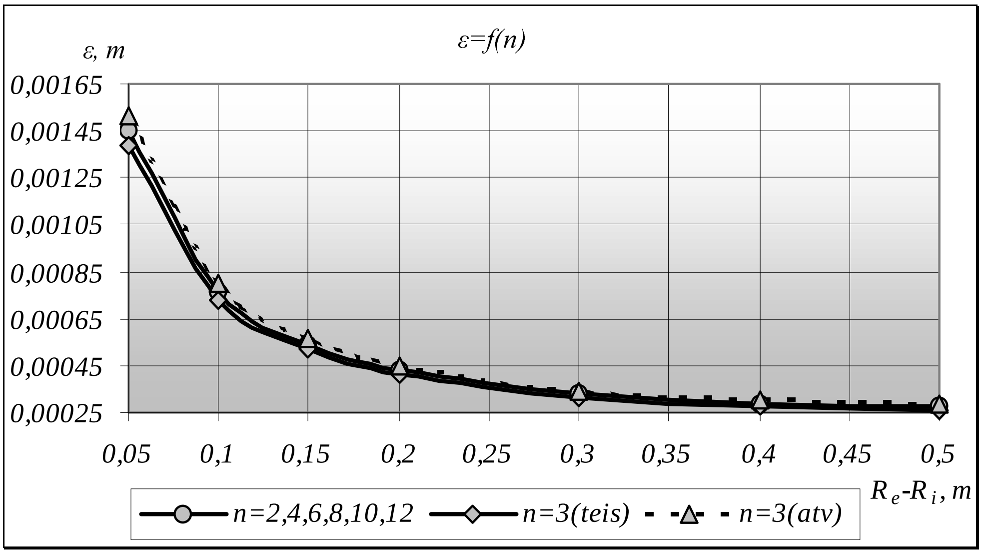
2.3.4 Sienelės storio įtaka konstrukcijos deformacijai ε

Nustatome kaip priklauso tiesioginės ir atvirkštinės konstrukcijos daugiasluoksnio vamzdžio deformacija ε nuo sienelės storio tempimo – gniuždymo atveju. Didinant sienelės storį, kaip ir prieš tai atliktuose skaičiavimuose, išlaikome pastovius atskirų sluoksnių skerspjūvio plotus, laikant kad vamzdis pagamintas iš *A* ir *B* medžiagų. Skaičiavimus atliekame iki tamprumo ribos.

2.8 lentelė

Vamzdžių deformacija ε kintant sienelės storiui.

	Sluoksnių skaičius n										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
R_e-R_i, m	Tiesioginės konstrukcijos vamzdis										
0,5	0,000275	0,000263	0,000275	0,000268	0,000275	0,00027	0,000275	0,000271	0,000275	0,000272	0,000275
0,4	0,000286	0,000274	0,000286	0,000279	0,000287	0,000281	0,000288	0,000282	0,000286	0,000283	0,000286
0,3	0,000327	0,000313	0,000327	0,000319	0,000327	0,000321	0,000327	0,000322	0,000327	0,000323	0,000327
0,2	0,00043	0,000411	0,00043	0,000418	0,00043	0,000422	0,000431	0,000423	0,000430	0,000424	0,000430
0,15	0,000539	0,000516	0,000539	0,000525	0,000539	0,000529	0,000538	0,000531	0,000539	0,000533	0,000539
0,1	0,000764	0,000731	0,000765	0,000744	0,000765	0,00075	0,000767	0,000753	0,000764	0,000755	0,000764
0,05	0,001448	0,001386	0,001448	0,00141	0,001448	0,001421	0,001448	0,001427	0,001448	0,001431	0,001448
R_e-R_i, m	Atvirkštinės konstrukcijos vamzdis										
0,5	0,000275	0,000288	0,000275	0,000282	0,000275	0,00028	0,000275	0,000279	0,000275	0,000278	0,000275
0,4	0,000286	0,0003	0,000286	0,000294	0,000286	0,000292	0,000286	0,000291	0,000286	0,000290	0,000286
0,3	0,000327	0,000343	0,000328	0,000336	0,000327	0,000334	0,000327	0,000332	0,000327	0,000331	0,000327
0,2	0,00043	0,00045	0,00043	0,000442	0,00043	0,000438	0,000430	0,000436	0,000430	0,000435	0,000430
0,15	0,000539	0,000565	0,000539	0,000554	0,000539	0,00055	0,000539	0,000548	0,000539	0,000546	0,000539
0,1	0,000764	0,0008	0,000764	0,000786	0,000764	0,000779	0,000764	0,000776	0,000764	0,000774	0,000764
0,05	0,001448	0,001517	0,001448	0,001489	0,001448	0,001477	0,001448	0,001471	0,001448	0,001466	0,001448



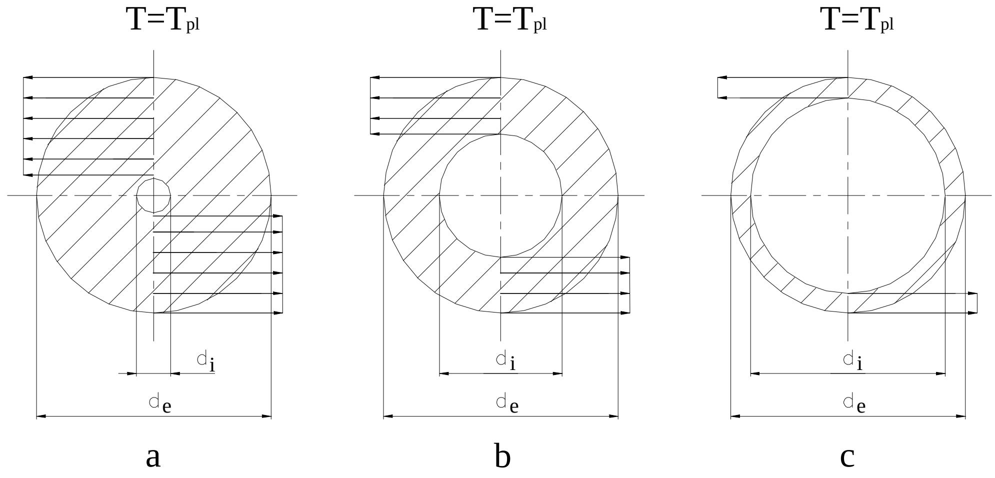
2.12 pav. Konstrukcijos deformacija kintant sienelės storiui

Iš gautų rezultatų (2.8 lentelė, 2.12 pav) matome, kad didėjant vamzdžio sienelės storiui nepriklausomai nuo vamzdžio konstrukcijos tempimo – gniuždymo atveju deformacija ε mažeja. Padidėjus vamzdžio sienelės storiui iki *50%,* konstrukcijos deformacija ε sumažėja apie 3,5 karto, po to šis deformacijos mažėjimas nebėra toks pastebimas. Todėl didžiausias standumo efektas yra gaunamas didinant plonasienių vamzdžių sieneles.

3 SUKAMŲ ELEMENTŲ TYRIMAS, ESANT TAMPRIAI PLASTINIAM DEFORMAVIMUI

3.1 Homogeninių elementų plastinio deformavimo tyrimas

Nustatome kaip kinta maksimalus sukimo momentas T_{pl} priklausomai nuo to koks vamzdis deformuojamas, t.y. imame skirtingus vamzdžius, kurių išoriniai diametrai d_e yra vienodi, o vidiniai (skylės) diametrai *d,* kinta nuo O iki d_e. Laikome, kad strypai pagaminti iš *A* medžiagos. Skaičiavimus atliekame pagal prieš tai naudotas formules. Skaičiavimo schema pateikta 3.1 pav, o skaičiavimo rezultatų suvestinė pateikta 3.1 lentelėje.. Šiuo atveju vamzdis sukamas tokiu momentu, kad plastiškai deformuotusi visu skerspjūviu.



3. 1 pav Vamzdžio plastinio deformavimo skaičiavimo eskizas

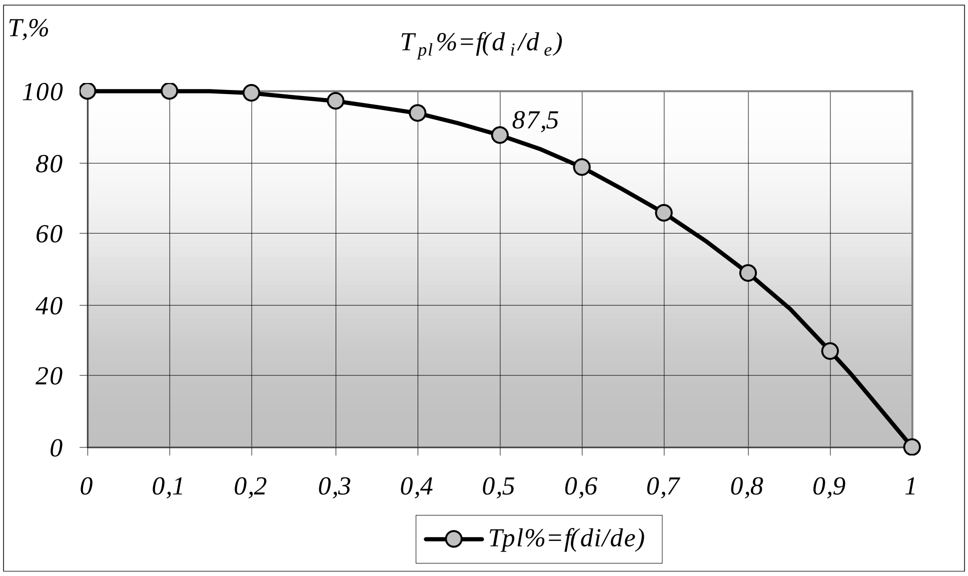
3.1 lentelė

Vamzdžio skylės skersmens d_i įtaka plastiniam sukimo momentui T_{pl}

d_e, m	***d_i, m***	***d_i/d_e***	***T_{pl}, Nm***	***T_{pl}, %***	***m***
	0	***0***	***26180***	***100***	***1.333***
	0.01	***0.1***	***26153***	***99.99***	***1.332***
	0.02	***0.2***	***25970***	***99.2***	***1.325***
	0.03	***0.3***	***25473***	***97.3***	***1.308***
	0.04	***0.4***	***24504***	***93.6***	***1.281***
0.1	***0.05***	***0.5***	***22907***	***87.5***	***1.244***
	0.06	***0.6***	***20525***	***78.4***	***1.2***
	0.07	***0.7***	***17200***	***65.7***	***1.153***
	0.08	***0.8***	***12776***	***48.8***	***1.102***
	0.09	***0.9***	***7094***	***27.1***	***1.051***
	0.1	***1***	***0***	***0***	***0***

Sukimo momento T_{pl} priklausomybės nuo strypo skylės diametro d_i grafikas pateiktas 3.2 pav. T_{pl} kitimą procentais išreiškiame pagal formule:

$$T_{pl},\% = \frac{T_{pl} \cdot 100}{T_{pl\,\max}}. \tag{73}$$



3.2 pav. Sukimo momento T_{pl} priklausomybės nuo strypo skylės diametro d_i grafikas procentais

Iš 3.2 pav. pateikto grafiko matome, kad skylės skersmenį *di* padidinus iki $0{,}5d_e$, sukimo momenlas T_{pl} sumažėjo *12,5%.* O vėliau sukimo momento kreivė kinta pastebimiau, jos kitimo kampas didėja. Didejant skylės diametrui plastinio sukimo momento T_{pl} mažejimas yra didesnis už elastinio sukimo momento T_{el} , esant tai pačiai vamzdžio konstrukcijai.

Iš to, kaip ir deformavimo atveju iki tamprumo ribos, galima daryti išvadą, kad sukamų vamzdžių stiprumui didžiausią įtaką turi išoriniai jo sluoksniai.

3.2 Daugiasluoksnių elementų plastinio deformavimo tyrimas

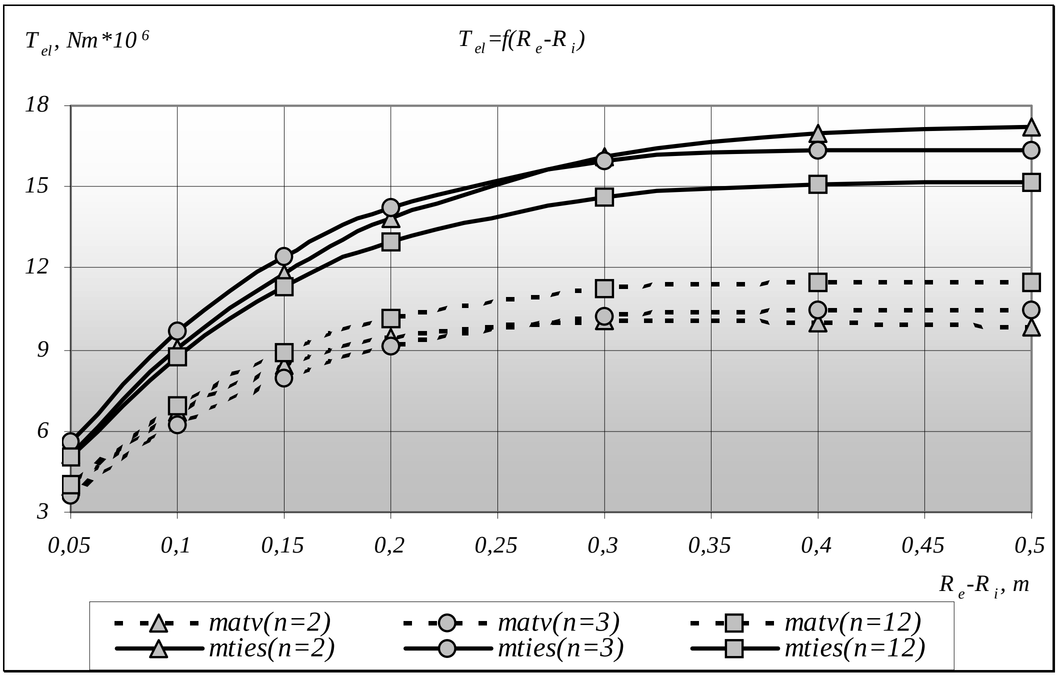
3.2.1 Vamzdžio sienelės storio įtaka plastinio sukimo momentui T_{pl}, *bei* plastinio deformavimo koeficientui *m*

Nustatome kaip kinta sukimo momentas T_{el} priklausomai nuo to kokio sienelės storio vamzdis deformuojamas, t.y. imame skirtingus vamzdžius, kurių išoriniai diametrai d_e yra vienodi, o vidiniai (skylės) diametrai *d,* kinta nuo O iki d_e. Laikome, kad strypai pagaminti iš *A ir B* medžiagos. Sluoksnių skaičius kinta nuo 2 iki 12, o jų skerspjūvio plotai išlaikomi vinodi. Skaičiavimai atliekami pagal prieš tai aprašytas formules. Skaičiavimo rezultatai pateikti 3.2, 3.3 lentelėse. Elastinio sukimo momento T_{el} priklausomybė nuo vamzdžio sienelės storio pateikta 3.2 paveikslėlyje, o plastinio deformavimo koeficiento *m* priklausomybė nuo sienelės storio 3.3 paveikslėlyje.

3.2 lentelė

Vamzdžio elastinio sukimo momento T_{el} priklausomybė nuo sienelės storio

	Vamzdžio sienlės storis						
	0,5	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1	0,05
n	Tiesioginės konstrukcijos T_{el}						
2	17180584,82	16964600,3	16081027,4	13823007,68	11828832,65	9012443,925	5152948,263
3	16362461,74	16336281,8	15943582,72	14241886,7	12433834,67	9660397,41	5627050,592
12	15135277,11	15079644,7	14637858,27	12985249,63	11296848,11	8747372,045	5079112,654
n	Atvirkštinės konstrukcijos T_{el}						
2	9817477,042	9952565,527	10093937,2	9449910,702	8441655,81	6701017,13	3980594,242
3	10471975,51	10455220,35	10203892,94	9114807,486	7957654,192	6182654,342	3601312,379
12	11453723,22	11460530	11248472,5	10120117,13	8867243,44	6913074,634	4039662,729

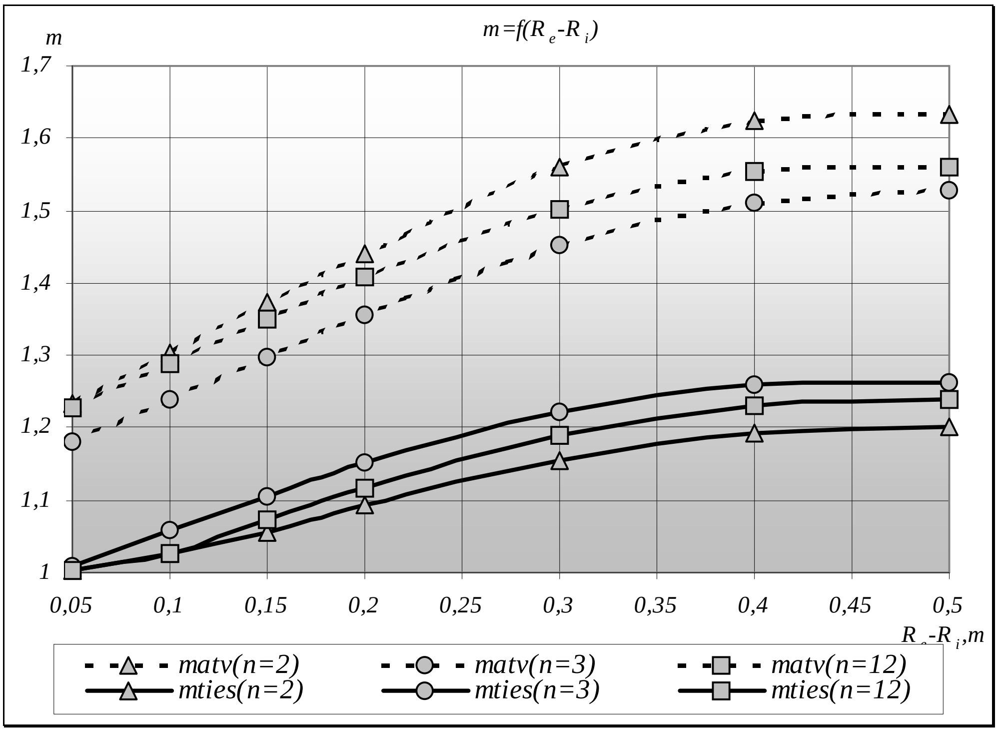


3.2 pav. Elastinio sukimo momento T_{el} priklausomybė nuo vamzdžio sienelės storio

3.3 lentelė

Vamzdžio plastinio deformavimo koeficiento m priklausomybė nuo sienelės storio

	Vamzdžio sienlės storis						
	0,5	0,4	0,3	0,2	0,15	0,1	0,05
n	Tiesioginės konstrukcijos m						
2	1,20056071	1,191070371	1,154857299	1,093095797	1,055665094	1,025759045	1,00325614
3	1,262194274	1,258260546	1,222583963	1,150433501	1,105434565	1,057516746	1,008562111
12	1,240284878	1,230240158	1,188692922	1,11612388	1,072444229	1,02641191	1,00264812
n	Atvirkštinės konstrukcijos m						
2	1,632352092	1,622965066	1,558846623	1,441836821	1,373311376	1,303035431	1,233588054
3	1,527821446	1,511531999	1,451781523	1,355021185	1,298814553	1,240584013	1,182190907
12	1,561052126	1,55377757	1,502983918	1,407291379	1,349355998	1,288533365	1,22708461



3.3 pav. Plastinio deformavimo koeficiento *m* priklausomybė nuo sienelės storio

Iš gautų rezultatų matome, kad tiesioginės konstrukcijos vamzdis atlaiko didesnius elastinius sukimo momentus T_{el}, nei tokios pats geometrinės formos atvirkštinės konstrukcijos vamzdis, nes jo standumas *K* yra didesnis. Padidėjus daugiasluoksnio vamzdžio sienelės storiui *50%,* elastinis sukimo momentas, priklausomai nuo vamzdžio konstukcijos tipo, padidėja apie 3 – 4 kartus. Didinant sienelės stori daugiaus nei *50%,* sukimo momento didėjimo priklausomybė tampa daugiau tiesinė ir nebėra tokia pastebima.

Ir tiesinėje, ir atvirkštinėje konstrukcijoje plastinio deformavimo koeficiento *m* priklausomybė nuo sienelės storio didėja. Daugiasluoksnio, atvirkštinės konstrukcijos vamzdžio plastinio deformavimo koeficientas *m* yra apie *20%* didesnis už tiesioginės konstrukcijos vamzdžio plastinio deformavimo koeficientą. Plastinio deformavimo efektyvumo koeficientas m sukimo atveju, parodo kiek kartų didesnius sukimo momentus gali atlaikyti vamzdis deformuojamas plastiškai iki tam tikros ribos ar visu skerspjūviu, palyginus su vamzdžiu , deformuojamu iki tamprumo ribos. Vadinasi esant mažesniam elastinio sukimo momentui T_{el} atvirkštinėse konstrukcijose, plastinio sukimo momento T_{pl} padidėjimas yra apie *20%* , tačiau jis vis tiek išliks mažesnis už tiesioginės konstrukcijos sukimo momentus.

3.2.2 Sluoksnių skaičiaus n įtakos, tiesioginės konstrukcijos vamzdžio tyrimas

Nustatysyme kaip priklauso elastinis sukimo momentas nuo daugiasluoksnio strypo sluoksnių skaičiaus. Čia skaičiuojame elastinį sukimo momentą T_{el} vamzdžiams su skirtingais sluoksnių skaičiais. Vamzdis sudarytas iš dviejų skirtingų medžiagų *(A* medžiaga ir *B* medžiaga), kurių kiekiai vamzdyje vienodi.

Skaičiuojant tiesioginės konstrukcijos, kai sluoksniai nuo išorės išsidėsto *A-B-A-* seka, ir atvirkštinės konstrukcijos, kai sluoksniai nuo išorės išsidėsto *B-A-B-* seka vamzdžius, kurių *n* kinta nuo 2 iki 12, skerspjūvio plotus išlaikome pastovius. Vidinis vamzdžių diametras $d_{vid}=0,05\ m$, išorinis $d_{išor}=0,1\ m$. Atskirų sluoksnių skerspjūvių plotai tarpusavyje taip pat yra išlaikomi vienodi. Skaičiuojami daugiasluoksniai vamzdžiai iš dviejų medžiagų (3.4 pav).

Kadangi mūsų atveju turime tik dvi medžiagas, tai:

$$T_{pl} = \tau_{y1}\left(\sum W_{pylyg}\right) + \tau_{y2}\left(\sum W_{pynelyg}\right).$$

čia: $\sum W_{plyg}$ - lyginių sluoksnių polinių plastinių atsparumo momentų suma;

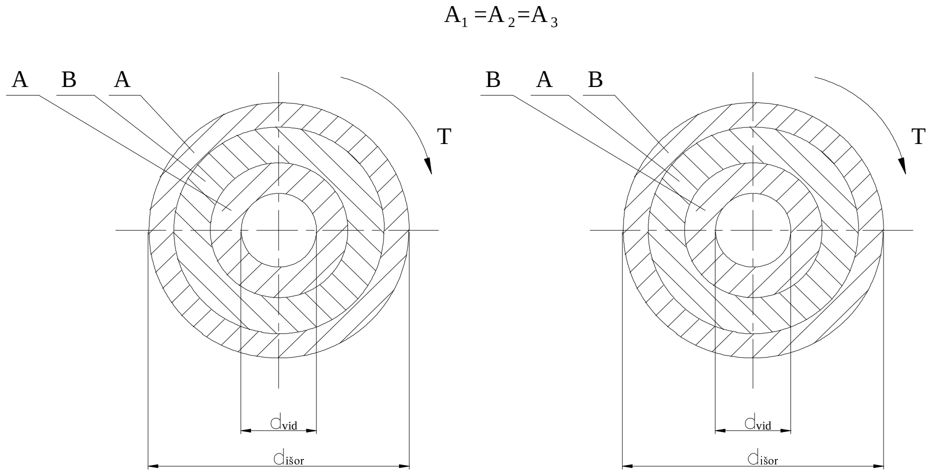
$\sum W_{plyg}$ - nelyginių sluoksnių polinių plastinių atsparumo momentų suma.

Vamzdžio polinis plastinis atsparumo momentas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$W_{ppl} = \frac{\pi\left(d_e^3 - d_i^3\right)}{12}.$$

Kitus skaičiavimus atliekame pagal anksčiau naudotas formules. Santykinis vamzdžio susisukimo kampas θ šiuo atveju pastovus, kadangi visą daugiasluoksnį vamzdį sukame tol, kol jis pilnai deformuosis visu skerspjūviu. Šiuo atveju vazdžio santykini susisukimo kampą apsprendžia vidinis sluoksnis.

Strypo atskirų sluoksnių skerspjūvių plotai išlaikomi vienodi. Kadangi šiuo atveju nagrinėjami strypai yra tiesioginės konstrukcijos, tai pirmiausiai takumo ribos, įtempimai bus pasiekti pirmo sluoksnio išorėje. Taigi strypo santykinis sąsūkis θ, skaičiuojant elastinį sukimo momentą T_{el} bus visiems strypams vienodas. Skaičiavimus atliekame pagal prieš tai naudotas formules. Skaičiavimų rezultatų suvestinė pateikta 3.4 lentelėje.



a b

3.4 pav. Daugiasluoksnio vamzdžio medžiagų išsidėstymas

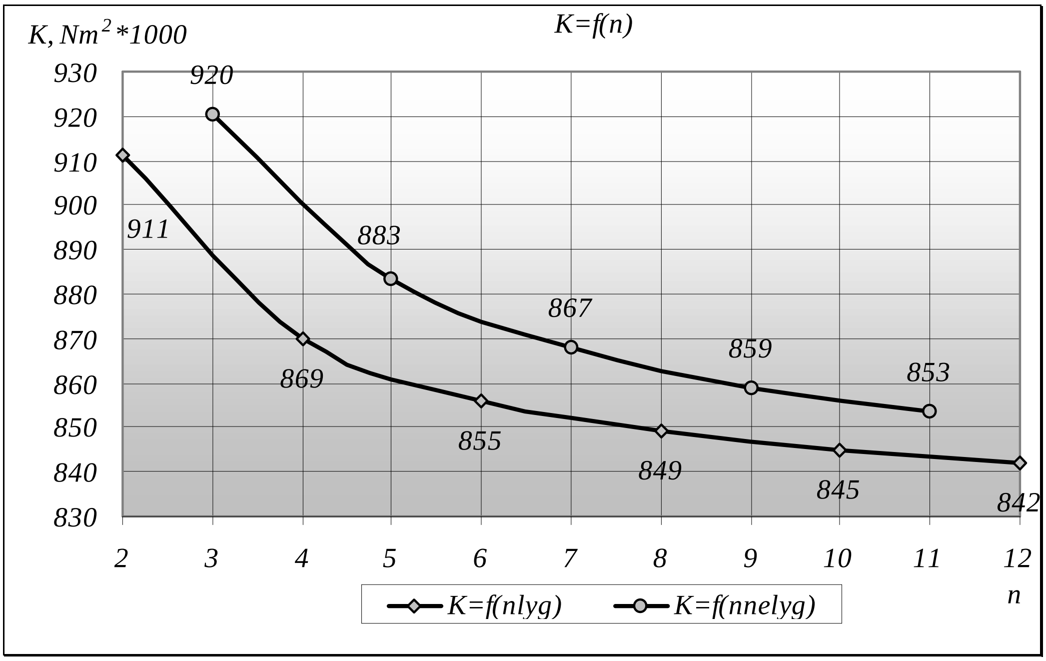
3.4 lenlelė

Tiesioginės konstrukcijos daugiasluoksnio vamzdžio nuo sluoksnių skaičiaus *n* skaičiavimų rezultatai

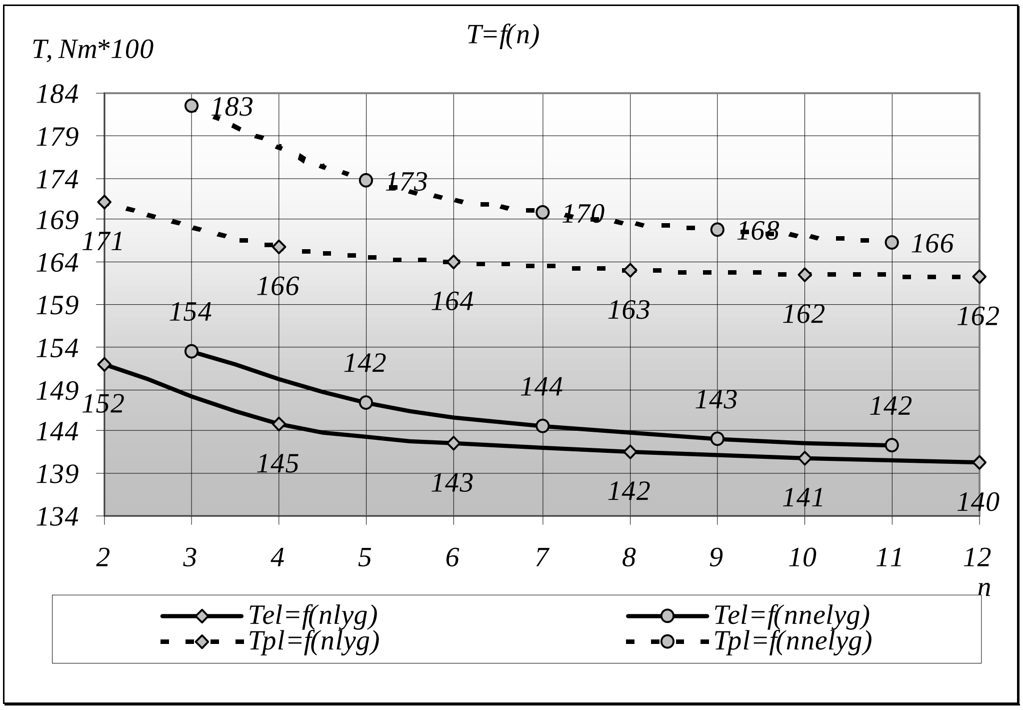
Sluoksnių skaičius	***Medžiagos šlyties modulis, GPa***		***Polinis inercijos momentas, m^4***	***Vamzdžio standumas, Nm^2***	***Ekvivalentinis šlyties modulis, GPa***	***Elastinis sukimo momentas, Nm***	***Plastinis sukimo momentas, Nm***	***Plastinio deformavimo efektyvumo koeficientas***
n	G_1	G_2	I_{pk}	K	G_k	T_{el}	T_{pl}	m
2				***911184,6***	***9,9E+10***	***15186***	***17109***	***1,127***
3				***920388,5***	***1E+11***	***15339***	***18258***	***1,19***
4				***869767,1***	***9,45E+10***	***14496***	***16582***	***1,144***
5				***883572,9***	***9,6E+10***	***14726***	***17363***	***1,179***
6				***855961,3***	***9,3E+10***	***14266***	***16401***	***1,15***
7	***1,2E+11***	***6E+10***	***9,2E-06***	***867794,8***	***9,43E+10***	***14463***	***16983***	***1,174***
8				***849058,4***	***9,23E+10***	***14150***	***16310***	***1,153***
9				***859029,2***	***9,33E+10***	***14317***	***16772***	***1,171***
10				***844916,6***	***9,18E+10***	***14081***	***16255***	***1,154***
11				***853451,1***	***9,27E+10***	***14224***	***16638***	***1,17***
12				***842155,5***	***9,15E+10***	***14035***	***16219***	***1,156***

Nustatome kaip priklauso tiesioginės konstrukcijos vamzdžio standumas K (3.5 pav) ir elastinis sukimo momentas T_{el}, plastinis sukimo momentas T_{pl} (3.6 pav), ir plastinio deformavimo efektyvumo koeficientas m (3.7 pav) priklauso nuo daugiasluoksnio vamzdžio sluoksnių skaičiaus.

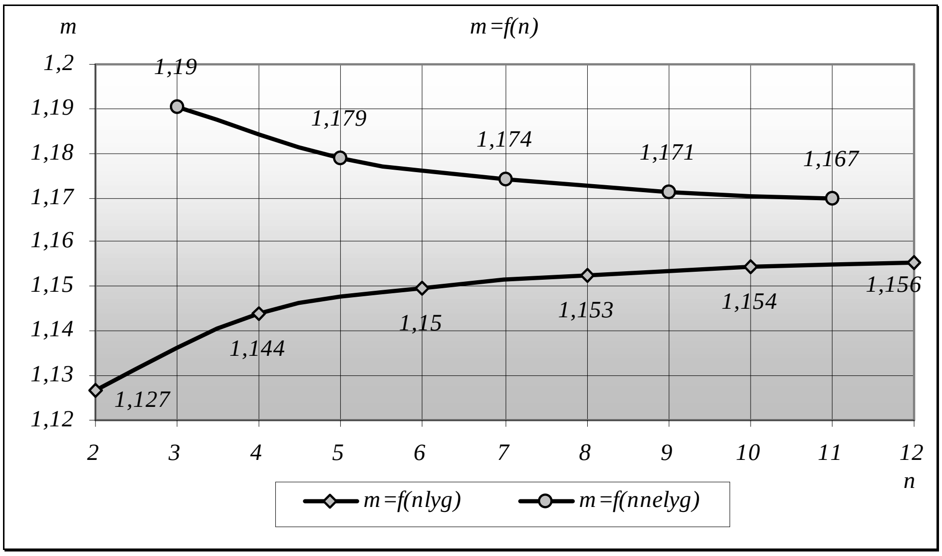
Kuomet nagrinėjami vamzdžiai yra tiesioginės konstrukcijos, tai esant tampriam deformavimui ribiniai įtempimai pirmiausiai bus pasiekti pirmojo sluoksnio išorėje. Didinant sukimo momentą, didžiausių įtempimų veikimo vietose ima rastis plastinės deformacijos, jos pasireiškia vis gilesniuose vamzdžio sluoksniuose. Ribinis būvis bus gautas kai plastinė deformacija bus visame strypo skerspjūvyje. Plastinio deformavimo efektyvumo koeficientas *m* sukimo atveju, parodo kiek kartų didesnius sukimo momentus gali atlaikyti vamzdis deformuojamas plastiškai iki tam tikros ribos ar visu skerspjūviu, palyginus su vamzdžiu, deformuojamu iki tamprumo ribos.



3. 5 pav. Tiesioginės konstrukcijos, standumo *K* priklausomybė nuo vamzdį sudarančių sluoksnių skaičiaus *n*



3.6 pav. Tiesioginės konstrukcijos, sukimo momentų T_{el} ir T_{pl} priklausomybės nuo vamzdį sudarančių sluoksnių skaičiaus n



3.7 pav Tiesioginės konstrukcijos plastinio deformavimo efektyvumo koeficiento *m* priklausomybė nuo vamzdį sudarančių sluoksnių skaičiaus *n*

Iš gautų rezultatų matome, kad didinant sluoksnių skaičių, tiesioginės konstrukcijos daugiasluoksniam vamzdžiui elastinis sukimo momentas mažėja. Čia medžiagos sluoksniai su didesniu šlyties moduliu išsidėsto vis tolygiau visame vamzdžio skerspjūvyje, bei arčiau vamzdžio centro. Taip atsitinka dėl to, kad didesnį šlyties modulį turinti medžiaga atsiduria arčiau strypo išorės ir jos sluoksnis kol kas storiausias, taigi ir šio sluoksnio įtaka strypo standumui didžiausia. Toliau didinant sluoksnių skaičių, didesnį šlyties modulį turinti medžiaga dar labiau artėja prie strypo išorės, tačiau jos sluoksniai mažėja ir tolygiau pasiskirsto visame skerspjūvyje. Tarp jos įsiskverbia mažesnį tamprumo modulį turinčios medžiagos sluoksniai - strypo standumas mažėja. Šios medžiagos sluoksnių sluoksnių suminis inercijos momentas mažėja. Sluoksnių skaičiui didėjant skirtumas tarp T_{el} mažėja. Jeigu sluoksnių skaičių didintume iki begalybės, tai atrodytų, kad daugiasluoksnio tiesioginės konstrukcijos vamzdžio charakteristikos artėja prie homogeninio vamzdžio su tarpinėmis daugiasluoksnio vamzdžio charakteristikų. Tačiau, esant tampriam deformavimui, vamzdį galime pasukti tik tokiu kampu, kokiu gali būti deformuotas išorinis vamzdžio sluoksnis. O vamzdį su tarpinėmis medžiagų charakteristikomis galime sukti didesniu kampu. Taigi, didinti sluoksnių skaičių tiesioginėms konstrukcijos daugiasluoksniam vamzdžiui nėra tikslinga, nes toks strypas atlaiko mažesnius sukimo momentus.

3.2.3. Sluoksnių skaičiaus n įtakos, atvirkštinės konstrukcijos vamzdžio tyrimas

Nustatysime kaip priklauso T_{el} nuo sluoksnių skaičiaus *n* atvirkštinės konstrukcijos strypui. Čia skaičiuojame analogiškos geometrijos vamzdžius, tik medžiagos *A* ir *B* sukeičiamos vietomis. Šiuo atveju vamzdžio santykinis sąsukis gali būti nevienodas. Tai priklausys nuo to, kuris (pirmas ar antras, kadangi jie yra arčiau išorės sluoksnis pirmas pasieks tamprumo ribos įtempimus. Taigi čia pagal santykį τ_i / τ_{yi} nustatysime pagal kurį sluoksnį suksime visą daugiasluoksnį strypą. Skaičiavimus atliekame pagal prieš tai naudotas formules. Skaičiavimų rezultatai pateikti 3.5 lentelėje.

3.5 lentelė

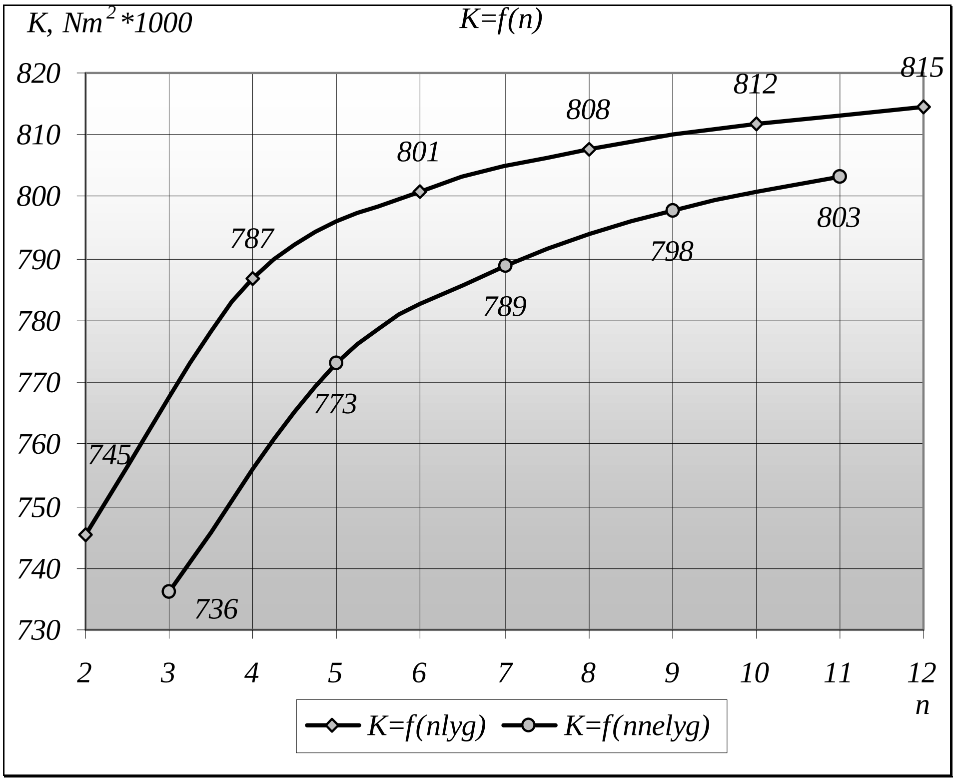
Atvirkštinės konstrukcijos daugiasluoksnio vamzdžio
nuo sluoksnių skaičiaus *n* skaičiavimų rezultatai

Sluoksnių skaičius	*Medžiagos šlyties modulis, GPa*		*Polinis inercijos momentas, m^4*	*Vamzdžio standumas, Nm^2*	*Ekvivalentinis šlyties modulis, GPa*	*Elastinis sukimo momentas, Nm*	*Plastinis sukimo momentas, Nm*	*Plastinio deformavimo efektyvumo koeficientas*
n	G_1	G_2	I_{pk}	*K*	G_k	T_{el}	T_{pl}	***m***
2				745514	8,1E+10	9940	14961	1,505
3				736310	8E+10	9817	13812	1,407
4				786932	8,55E+10	10492	15487	1,476
5				773126	8,4E+10	10308	14706	1,427
6				800738	8,7E+10	10676	15668	1,468
7	6E+10	1,2E+11	9,204E-06	788904	8,57E+10	10518	15087	1,434
8				807641	8,78E+10	10768	15759	1,464
9				797670	8,67E+10	10635	15298	1,438

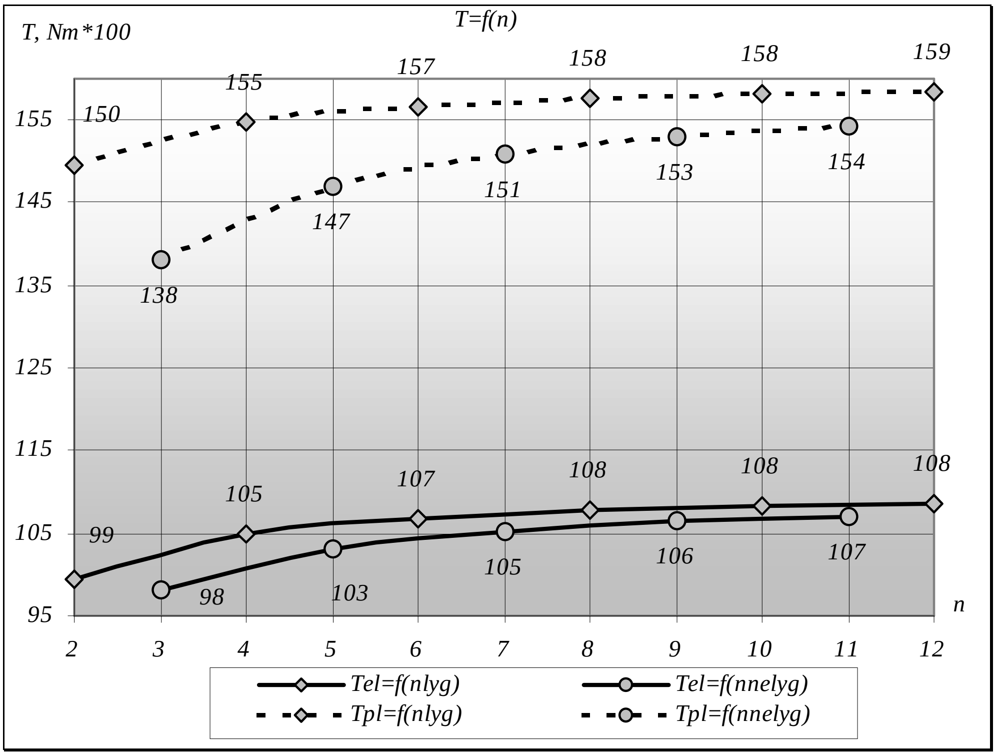
2.12 lentelės tęsinys

Sluoksnių skaičius	***Medžiagos šlyties modulis, GPa***		***Polinis inercijos momentas, m^4***	***Vamzdžio standumas, Nm^2***	***Ekvivalentinis šlyties modulis, GPa***	***Elastinis sukimo momentas, Nm***	***Plastinis sukimo momentas, Nm***	***Plastinio deformavimo efektyvumo koeficientas***
n	G_1	G_2	I_{pk}	***K***	G_k	T_{el}	T_{pl}	***m***
10				***811783***	***8,82E+10***	***10823***	***15814***	***1,461***
11				***803248***	***8,72E+10***	***10709***	***15432***	***1,441***
12				***814544***	***8,85E+10***	***10860***	***15851***	***1,46***

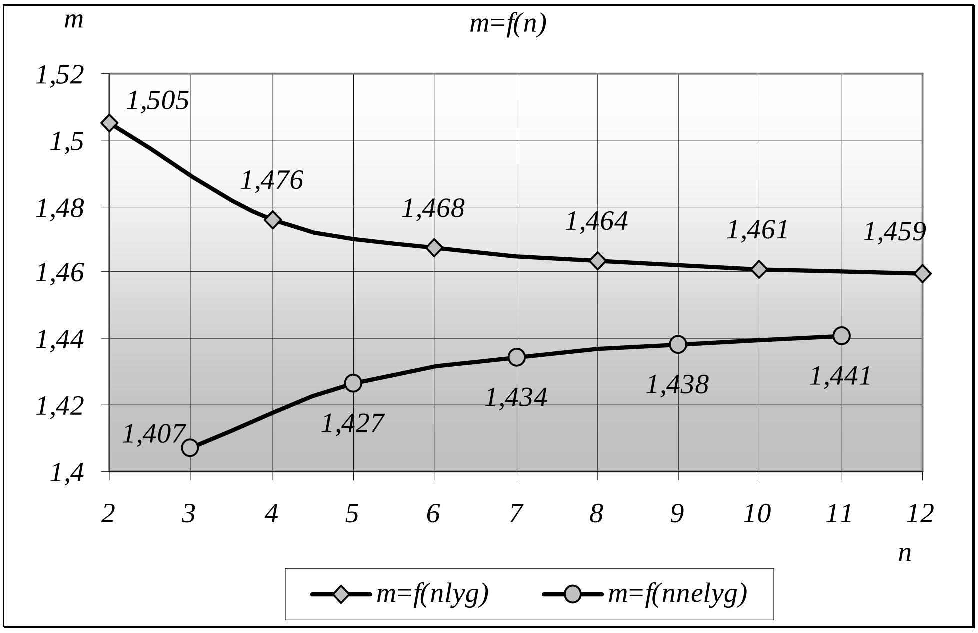
Nustatinėjant K, T_{el}, T_{pl} ir m priklausomybes nuo sluoksnių skaičiaus n atvirkštinės konstrukcijos vamzdžiui, skaičiuojame analogiškos geometrijos vamzdžius, tik medžiagos A ir B yra sukeičiamos vietomis. Šiuo atveju vamzdžio santykinis sąsūkis gali būti nevienodas, tai būtina įvertinti nustatinėjant kuris sluoksnis pirmas pasieks takumo ribos įtempimus. Duotu atveju išorinis sluoksnis visuomet pirmas pasiekia ribinius įtempimus.



3.8 pav. Atvirkštinės konstrukcijos, standumo K priklausomybė nuo vamzdį sudarančių sluoksnių skaičiaus n



3.9 pav. Atvirkštinės konstrukcijos, sukimo momentų T_{el} ir T_{pl} priklausomybės nuo vamzdį sudarančių sluoksnių skaičiaus n



3.10 pav. Atvirkštinės konstrukcijos plastinio deformavimo efektyvumo koeficiento m priklausomybė nuo vamzdį sudarančių sluoksnių skaičiaus n

Nustatinėjant atvirkštinės konstrukcijos daugiasluoksnio strypo koeficiento m priklausomybę nuo sluoksnių skaičiaus n. Skaičiavimo pobūdis analogiškas prieš tai atliktiems, tik čia svarbu nustatant elastinį sukimo momentą, kuriame sluoksnyje takumo ribos įtempimai bus pasiekti pirmiausiai. Pagal šio sluoksnio maksimalų susisukimo kampą sukamas visas daugiasluoksnis strypas nustatant jo elastinį sukimo momentą T_{el}. Duotu atveju takumo ribos įtempimai pirmiausiai bus pasiekti išoriniame sluoksnyje.

Nagrinėjant atvirkštinės konstrukcijos daugiasluoksnį vamzdį, matome, kad didinant sluoksnių skaičių vamzdžio standumas, elastinis ir plastinis sukimo momentas eksponentiškai didėja, tačiau niekuomet nepasiekia tiesioginės konstrukcijos charakteristikų (3.8, 3.9, 3.10 pav.). Mažiausi sukimo momentai bei standumas yra trijų sluoksnių konstrukcijoje, nors medžiaga su didesniu šlyties moduliu ir atsiduria arčiau strypo išorės, bet jos kiekis yra mažiausias iš visų nagrinėjamų variantų. Tiesioginė daugiasluoksnio vamzdžio konstrukcija visuomet yra pranašesnė už atvirkštinę, tačiau kintant skerspjūvio matmenims ar medžiagų charakteristikoms šios priklausomybės gali pasikeisti.

3.2.4 Daugiasluoksnio, sudaryto iš trijų skirtingų medžiagų, vamzdžio stiprumas didėjant sluoksnių skaičiui *n*

Skaičiavimams pasirinktos homogeninės medžiagos *A, B* ir *C*. Skaičiuojami daugiasluoksniai vamzdžiai iš trijų medžiagų. Skaičiuojant tiesioginės konstrukcijos, kai sluoksniai nuo išorės išsidėsto *A-B-C-A-B-…* seka, ir atvirkštinės konstrukcijos, kai sluoksniai nuo išorės išsidėsto *C-B-A-C-B-…* seka vamzdžius, kurių *n* kinta nuo 3 iki 12 pridedant po tris tų pačių medžiagų sluoksnius, skerspjūvio plotus išlaikome pastovius. Sluoksnių skaičius yra didinamas po tris tam kad grafinėse priklausomybėse butų galima matyti priklausomybių dėsningumus. Vidinis vamzdžių diametras $d_{vid}=0{,}05\ m$, išorinis $d_{išor}=0{,}1\ m$. Atskirų sluoksnių skerspjūvių plotai tarpusavyje taip pat yra išlaikomi vienodi. Skaičiavimo rezultatai pateikti 3.6 lentelėje.

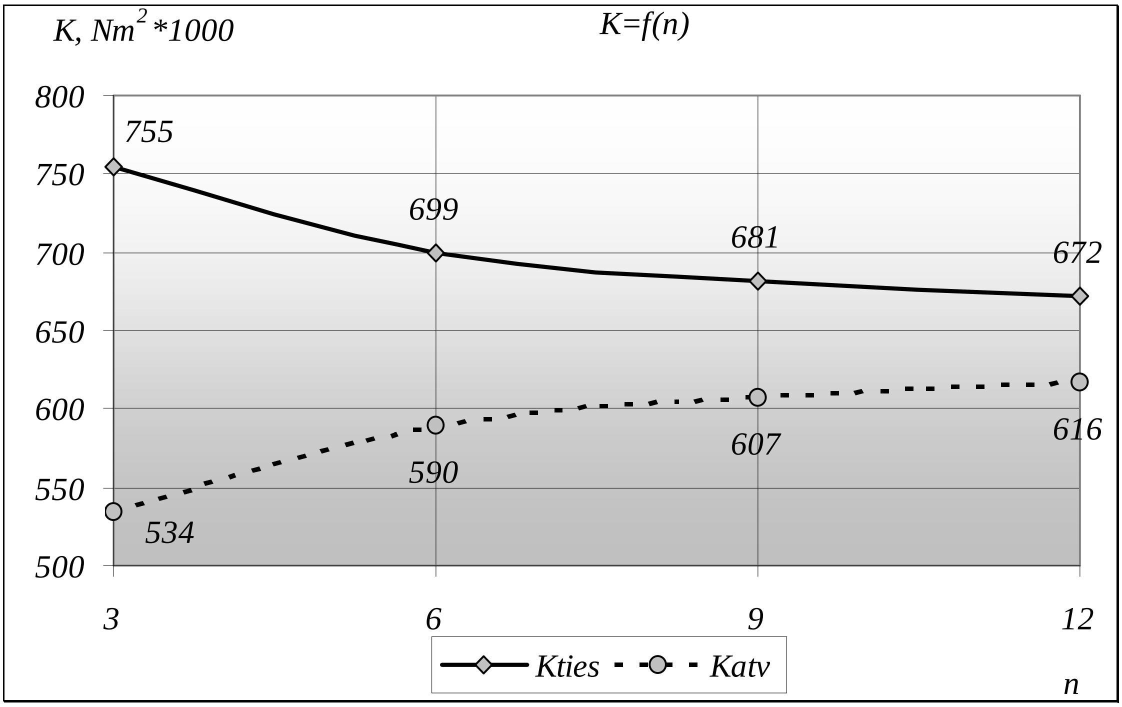
3.6 lentelė

Daugiasluoksnio, sudaryto iš trijų skirtingų medžiagų, vamzdžio stiprumo skaičiavimo rezultatai

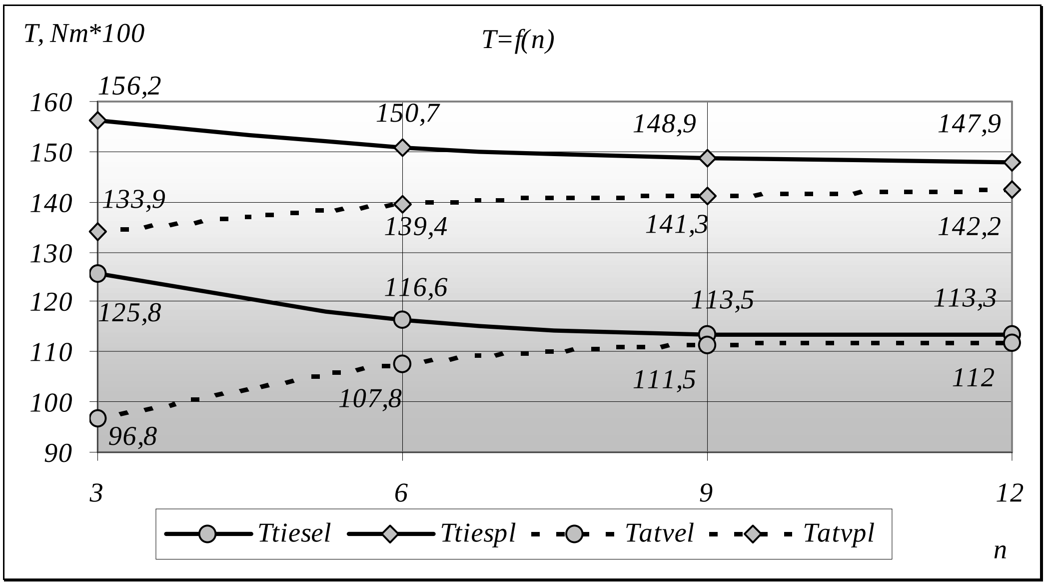
Sluoksnių skaičius	*Medžiagos šlyties modulis, GPa*			*Vamzdžio standumas, Nm^2*	*Ekvivalentinis šlyties modulis, GPa*	*Elastinis sukimo momentas, Nm*	*Plastinis sukimo momentas, Nm*	*Plastinio deformavimo efektyvumo koeficientas*
n	G_1	G_2	G_3	***K***	G_k	T_{el}	T_{pl}	***m***
Tiesioginės konstukcijos vamzdis								
3	***1,2 E+11***	***6 E+10***	***3 E+10***	***754718,5***	***8,2 E+10***	***12578,6***	***15619,6***	***1,241***
6				***699495,2***	***7,6 E+10***	***11658,3***	***15074,7***	***1,293***
9				***681087,5***	***7,4 E+10***	***11351,5***	***14887,7***	***1,312***
12				***671883,6***	***7,3 E+10***	***11333,2***	***14793,4***	***1,305***

3.6 lentelės tęsinys

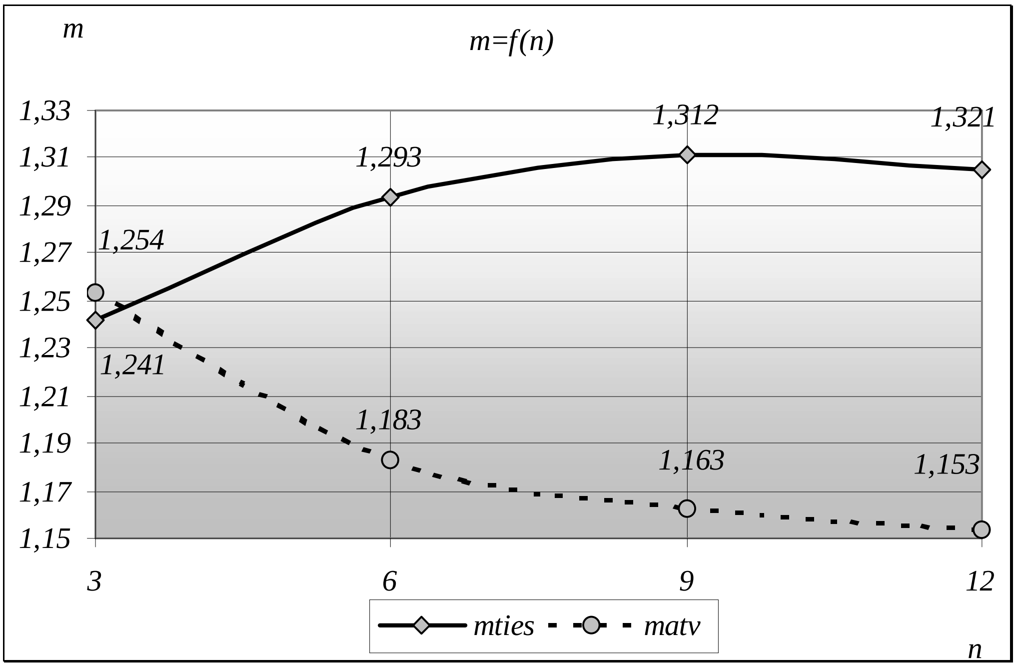
Sluoksnių skaičius	*Medžiagos šlyties modulis, GPa*			*Vamzdžio standumas, Nm²*	*Ekvivalentinis šlyties modulis, GPa*	*Elastinis sukimo momentas, Nm*	*Plastinis sukimo momentas, Nm*	*Plastinio deformavimo efektyvumo koeficientas*
n	G_1	G_2	G_3	***K***	G_k	T_{el}	T_{pl}	***m***
Atvirkštinės konstukcijos vamzdis								
3	**3 E+10**	**6 E+10**	**1,2 E+11**	**533825,3**	**5,8 E+10**	**9676,5**	**13385,2**	**1,254**
6				**589048,6**	**6,4 E+10**	**10780,9**	**13938,2**	**1,183**
9				**607456,4**	**6,6 E+10**	**11149,1**	**14126,9**	**1,163**
12				**616660,3**	**6,7 E+10**	**11198,1**	**14221,9**	**1,153**



3.11 pav. Tiesioginės ir atvirkštinės konstrukcijos, standumo *K* priklausomybė nuo vamzdį sudarančių sluoksnių skaičiaus *n*



3.12 pav. Tiesioginės ir atvirkštinės konstrukcijos, sukimo momentų T_{el} ir T_{pl} priklausomybės nuo vamzdį sudarančių sluoksnių skaičiaus *n*



3.13 pav. Tiesioginės ir atvirkštinės konstrukcijos plastinio deformavimo efektyvumo koeficiento *m* priklausomybė nuo vamzdį sudarančių sluoksnių skaičiaus *n*

Iš gautų rezultatų matome, kad daugiasluoksnio vamzdžio sudaryto iš trijų skirtingų medžiagų, dėsningumai yra analogiški prieš tai atliktiems skaičiavimams su dviejų skirtingų medžiagų daugiasluoksniu vamzdžiumi (3.11, 3.12, 3.13 pav.). Tik standumo *K* ir sukimo momentu T_{el} bei T_{pl}

skaitinės reikšmės yra mažesnės. Taip yra todėl, kad trečdalį skerspjūvio ploto užima medžiaga su silpnesnėmis mechaninėmis charakteristikomis. Tiesioginėje konstrukcijoje, didinant sluoksnių skaičių , standumas *K* mažėja, nes su didesniu šlyties moduliu išsidėsto vis tolygiau visame vamzdžio skerspjūvyje, bei arčiau vamzdžio centro. Atvirkšinėje konstrukcijoje, didinant sluoksnių skaičių, standumas *K* didėja, nes medžiagos su didesniu šlyties moduliu išsidėsto vis toliau nuo vamzdžio centro, tačiau atvirkštinėse konstrukcijose standumas *K* išlieka mažesnis.

3.3 Šlyties modulių skirtumų įtakos daugiasluoksnio strypo koeficientui m tyrimas

Nustatome koeficiento *m* priklausomybę nuo daugiasluoksnio strypo medžiagų šlyties modulių santykių. T.y. skaičiuojame strypus, pagamintus iš medžiagų su skirtingais šlyties moduliais. Šlyties modulius palaipsniui sulyginame ir stebime kaip kinta koeficientas *m*. Skaičiavimus atliekame tiesioginės ir atvirkštinės konstrukcijos daugiasluoksniams strypams, kurių sluoksnių skaičius nuo 2 iki 12. Laikome, kad takumo ribos įtempimai abiejų medžiagų vienodi. Skaičiavimus atliekame pagal prieš tai naudotas formules.

3.3.1 Šlyties modulių skirtumų įtakos tiesioginės konstrukcijos daugiasluoksnio strypo koeficientui m tyrimas

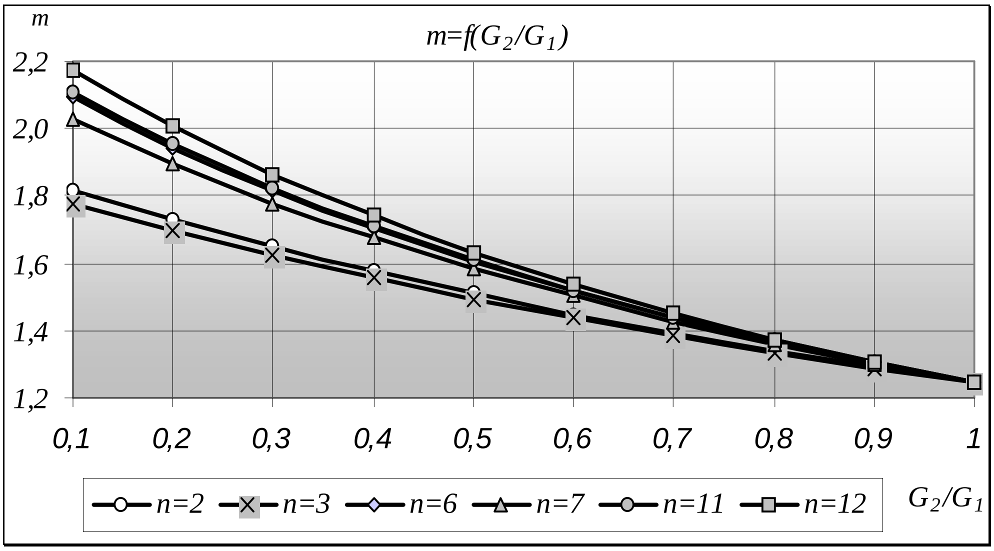
Grafikuose, tiesioginės konstrukcijos vamzdžiams, kai santykis G_2/G_1 yra lygus 0,5, pirmos medžiagos šlyties modulis yra du kartus didesnis nei antrosios, kai santykis G_2/G_1 yra lygus 1.0 - pirmos ir antros medžiagos šlyties moduliai yra vienodi.

Tiesioginės konstrukcijos strypų skaičiavimų rezultatai pateikti 3.7 lentelėje, o koeficiento *m* priklausomybės nuo medžiagų šlyties modulių skirtumo grafikas – 3.14 paveikslėlyje.

3.7 lentelė

Tiesioginės konstrukcijos dvisluoksnio strypo skaičiavimų rezultatų suvestinė

n	G_2/G_1									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	m									
2	1,817	1,728	1,648	1,575	1,508	1,447	1,390	1,338	1,290	1,244
3	1,778	1,697	1,623	1,556	1,493	1,436	1,383	1,333	1,287	1,244
6	2,092	1,944	1,817	1,705	1,606	1,518	1,439	1,368	1,303	1,244
7	2,026	1,894	1,778	1,675	1,584	1,502	1,428	1,361	1,300	1,244
11	2,106	1,956	1,825	1,711	1,610	1,521	1,441	1,369	1,304	1,244
12	2,174	2,007	1,864	1,740	1,632	1,536	1,451	1,375	1,307	1,244



3.14 pav. Tiesiogines konstrukcijos daugiasluoksnių strypų koeficiento m priklausomybės nuo medžiagų šlyties modulių santykio G_2 / G_1 grafikas

Iš gautų rezultatų matome, kad tiesioginės konstrukcijos strypų koeficientas *m* (žr. 3.13 pav.), didėjant medžiagų šlyties modulių skirtumui, didėja. Šiame tyrime išlaikomi pastovūs abiejų medžiagų takumo ribos įtempimai (τ_{y1} = const, τ_{y21} = const). Taigi T_{pl} kintant šlyties moduliui G_2 išlieka pastovus, o T_{el} didėja, taigi koeficiento *m* reikšmės mažėja. Kuo centrinės dalies medžiagos šlyties modulis artimesnis išorinės dalies medžiagos šlyties moduliui, tuo koeficientas *m* artimesnis pilnavidurio strypo koeficiento *m* reikšmei.

Kuo tiesioginės konstrukcijos daugiasluoksnuio vamzdžio sluoksnių skaičius *n* didesnis, tuo daugiau sluoksnių su mažesniu šlyties moduliu atsiduria arčiau strypo išorės. Elastinis sukimo momentas mažėja, o koeficientas *m* atitinkamai didėja.

3.3.2 Šlyties modulių skirtumų įtakos atvirkštinės konstrukcijos daugiasluoksnio strypo koeficientui m tyrimas

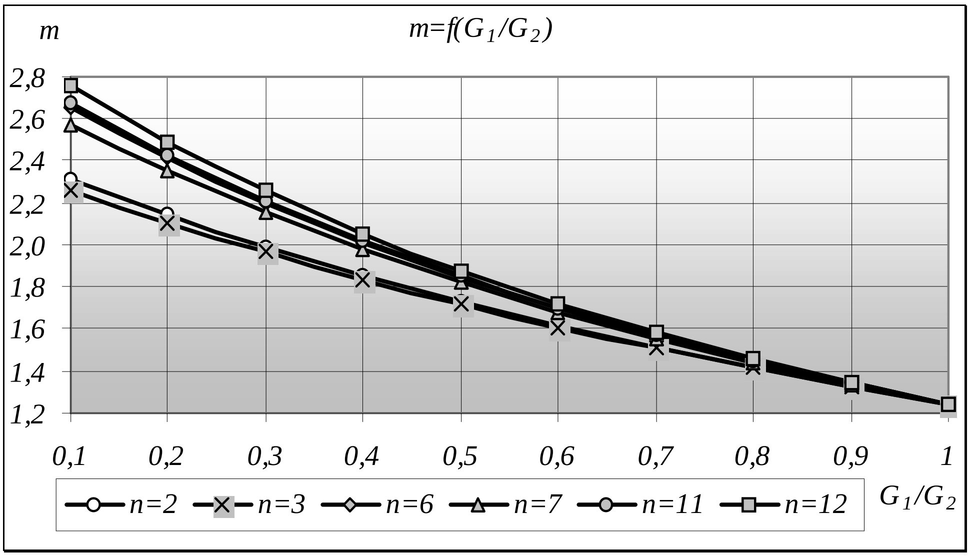
Atvirkštinės konstrukcijos strypams, kai santykis G_1 / G_2 yra lygus 0.5, antros medžiagos šlyties modulis yra du kartus didesnis nei pirmos, kai santykis G_1 / G_2 yra lygus 1.0 - pirmos ir antros medžiagos šlyties moduliai yra vienodi.

Atvirkštinės konstrukcijos strypų skaičiavimų rezultatai pateikti 3.8 lentelėje, o koeficiento *m* priklausomybės nuo medžiagų šlyties modulių skirtumo grafikas – 3.15 paveikslėlyje.

3.8 lentelė

Atvirkštinės konstrukcijos dvisluoksnio strypo skaičiavimų rezultatų suvestinė

n	G_1/G_2									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
	m									
2	2,307	2,143	1,994	1,859	1,735	1,621	1,516	1,418	1,328	1,244
3	2,258	2,104	1,964	1,836	1,717	1,608	1,507	1,413	1,326	1,244
6	2,656	2,411	2,198	2,012	1,847	1,700	1,568	1,450	1,342	1,244
7	2,573	2,348	2,151	1,977	1,821	1,682	1,557	1,443	1,339	1,244
11	2,675	2,425	2,208	2,019	1,852	1,704	1,571	1,451	1,343	1,244
12	2,761	2,489	2,256	2,054	1,877	1,721	1,582	1,458	1,346	1,244



3.15 pav. Atvirkštinės konstrukcijos daugiasluoksnių strypų koeficiento m priklausomybės nuo medžiagų šlyties modulių santykio G_1 / G_2 grafikas

Skaičiuojant atvirkštinės konstrukcijos strypų koeficiento *m* priklausomybę nuo medžiagų šlyties modulių, matome (žr. 3.15 pav.), kad pradinėje padėtyje (kai G_1 / G_2) koeficiento *m* reikšmės pasiskirsčiusios atvirkščia tvarka negu tiesioginės konstrukcijos strypams. T.y. šioje padėtyje dvisluoksnio strypo koeficientas didžiausias, kai tiesioginės konstrukcijos strypui šioje padėtyje mažiausias. Atitinkamai čia pasiskirstę ir kitų strypų koeficientai. Tai sąlygoja, kad kuo mažiau sluoksnių sudaro strypą, tuo mažiau sluoksnių su didesniu šlyties moduliu yra arčiau strypo išorės ir tuo elastinis sukimo momentas mažesnis, o plastinis sukimo momentas išlieka pastovus, kadangi laikome, kad abiejų medžiagų įtempimai τ_{y1} = const, τ_{y21} = const. Taigi koeficientas *m* didėja.

IŠVADOS

Darbe išnagrinėti homogeninių ir daugiasluoksnių sukamų vamzdžių ribinių apkrovų (sukinio momentų), bei plastinio deformavimo efektyvumo koeficiento m kitimo dėsningumai, esant tampriam bei plastiniam deformavimui.

Tiriant daugiasluoksnių vamzdžių sukimą iki tamprumo ribos gauta:

● esant tampriam deformavimui, sukamų strypų geometrija turi didelę įtaką ribinėms apkrovoms. Sukamų strypų stiprumui didžiausią įtaką turi išoriniai jo sluoksniai. Tuščiaviduris strypas atlaikys didesnius apkrovimus jeigu „pridėsime" daugiau medžiagos į išorinį jo paviršių negu į skylės sienelių paviršių. Ribinės apkrovos, kintant strypo skersmenim, kinta ne pagal tiesinę priklausomybę. Nustatyta, kad racionaliau naudoti tuščiavidurius (vamzdžio tipo) elementus.

● nagrinėjant vamzdžių sukimą, gauta, kad homogeninio vamzdžio, kurio skylės skersmuo lygus pusei išorinio skersmens, ribinis sukimo momentas tik *6,25%* mažesnis negu pilnavidurio, o trisluoksniam strypui *14.58%.*

● vamzdžio tipo elementų plastinio deformavimo efektyvumo koeficientas nesiekia 1,33 ir didėjant vamzdžio skylės diametrui jo reikšmės mažėja dėl „neefektyvios" viduriniosios dalies sumažėjimo.

● deformuojant iki tamprumo ribos didinti sluoksnių skaičių, tiesioginės konstrukcijos daugiasluoksniam vamzdžiui nėra tikslinga, nes toks vamzdis atlaiko vis mažesnius sukimo momentus. Tiesioginės konstrukcijos vamzdis atlaiko didesnius elastinius sukimo momentus T_{el}, nei tokios pats geometrinės formos atvirkštinės konstrukcijos vamzdis, nes jo standumas K yra didesnis. Didžiausius sukimo momentus T_{el} atlaiko tiesioginės konstrukcijos trijų sluoksnių vamzdžiai. Mažiausius sukimo momentus T_{el} atlaiko atvirkštinės konstrukcijos vamzdžiai. Racionaliausia yra naudoti tiesiogines trijų sluoksnių konstrukcijas.

● Padidinus daugiasluoksnio vamzdžio sienelės storį iki *50%* tempimo – gniuždymo atveju, konstrukcijos deformacija ε sumažėja apie 4 kartus, daugiau didinant sienelės storį šis deformacijos mažėjimas nebėra toks didelis.

Tiriant daugiasluoksnių vamzdžių sukimą už tamprumo ribos gauta:

● Koeficientas m tiesioginėse konstrukcijose yra mažesnis už koeficientą m gautą atvirkštinėse konstrukcijose. Tai reiškia, kad atvirkštinėse konstrukcijose T_{pl} padidėja už T_{el} daugiau nei tiesioginėse konstrukcijose, tačiau tiesioginės konstrukcijos visuomet yra stipresnės.

● Atvirkštinės konstrukcijos daugiasluoksnio vamzdžio, sudaryto iš dviejų skirtingų medžiagų, didėjant sluoksnių skaičiui vamzdžio standumas, elastinis ir plastinis sukimo momentas eksponentiškai didėja, tačiau niekuomet nepasiekia tiesioginės konstrukcijos charakteristikų.

Mažiausi sukimo momentai bei standumas yra trijų sluoksnių konstrukcijoje, nors medžiaga su didesniu šlyties moduliu ir atsiduria arčiau strypo išorės, bet jos kiekis yra mažiausias iš visų nagrinėjamų variantų.

● Tiesioginė daugiasluoksnio vamzdžio konstrukcija visuomet yra pranašesnė už atvirkštinę, tačiau kintant skerspjūvio matmenims ar medžiagų charakteristikoms šios priklausomybės gali pasikeisti.

● Daugiasluoksnio vamzdžio sudaryto iš trijų skirtingų medžiagų, dėsningumai yra analogiški atliktiems skaičiavimams su dviejų skirtingų medžiagų daugiasluoksniu vamzdžiumi. Tik standumo K ir sukimo momentu T_{el} bei T_{pl} skaitinės reikšmės yra mažesnės.

● Kuo tiesioginės konstrukcijos daugiasluoksnio vamzdžio sluoksnių skaičius n didesnis, tuo daugiau sluoksnių su mažesniu šlyties moduliu atsiduria arčiau strypo išorės, todėl elastinis sukimo momentas mažėja, o koeficientas m atitinkamai didėja.

LITERATŪRA

1. Čižas A. Medžiagų atsparumas (Konstrukcinių elementų mechanika). V., Technikas, 1993, 408 p.

2. Bareišis J. Konstrukcinis stiprumas ir patikimumas (Paskaitų konspektas I dalis). 2002,41 p.

3. Bareišis J. Konstrukcinis stiprumas ir patikimumas (Paskaitų konspektas II dalis). 2002,41 p.

4. Bareišis J., Paulauskas V. Daugiasluoksnių kompozicinių konstrukcinių elementų projektavimas. Kaunas, Technologija, 1995, 47 p.

5. Bareišis J. Konstrukcinių elementų atsparumas. Šiauliai, Šiaulių Universitetas, 2003, 258 p.

PRIEDAI