

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Edita Bakšytė

ASIMETRINIŲ DAUGIASLUOKSNIŲ ELEMENTŲ
STIPRUMO IR STANDUMO TYRIMAS

Magistro darbas

Vadovas

prof. J. Bareišis

ŠIAULIAI, 2004

SUMMARY

Bakšytė E. Investigation of strength and rigidity of asymmetric multilayered elements: Master thesis of mechanical engineer / research advisor prof. J. Bareišis; Šiauliai University, Technological Faculty, Mechanical Engineering Department. – Šiauliai, 2004. – 69 p.

This theme of master's work in mechanical engineering is urgent: along with appearing new composition substances and growing demands towards strength, rigidity, stability, mass and piece of the constructions, more and more often the multilayered construction elements are used, enabling obtaining of the necessary constructional features in the desirable direction, evaluating total load, working environment and other important requirements. Though the projecting questions of multilayered construction elements were analysed, no asymmetric constructions, made of three substances, were analysed.

In this work I analyse strength and rigidity of asymmetric multilayered elements, made of the following composition substances: carbon plastic, hot setting glass plastic and epoxy resin.

In order to perform analytic calculations, I selected the construction element with height $h = 120$ mm, width $b = 50$ mm, length $l = 1000$ mm, affected with 10 kN force.

In the work I present dependence of neutral axle position factor, rigidity and tension upon the relative layer thickness rates, material allocation in the construction element cross - section as well as number of the layers. Change regularities and their causes are described. Conclusions are given: if number of the layers in the asymmetric three – layer beams is larger than 15, the layer allocation order has no influence upon the rigidity; no direct relation between the layer thickness rate and rigidity is established; along with growing number of the layers in the asymmetric three – layer construction, dependences of each layer's normal tensions approach some average tension value, different for each material; it was also established, that along with growing number of the layers with smaller material resilience module, tension values grow up and along with growing number of the layers with larger material resilience module, tension values fall down.

In the work I also compared analytical calculation and FEA (Finite Element Analysis) calculations. I found out, that no reduced cross – section method, applied to FEA, may be calculated for multilayered construction, because error exceeds 5 per cent.

TURINYS

ĮVADAS	8
1. DAUGIASLUOKSNĖS KONSTRUKCIJOS IR JŲ EFEKTYVUMAS	9
1.1.DKE bendroji charakteristika ir jų panaudojimas	9
1.2.DKE struktūra	10
1.3.DKE skaičiavimas BEM	11
1.4.Stiprumo ir standumo skaičiavimo būdai	13
2. DAUGIASLUOKSNIŲ SIJŲ (DS) SKAIČIAVIMO METODIKA ESANT TAMPRIAM DEFORMAVIMUI	19
2.1. Naudojamos prielaidos, medžiagos, konstrukcijos	19
2.2. Neutraliojo sluoksnio padėties skaičiavimas	20
2.3. Standumo ir įtempimų skaičiavimas	22
3. DKE STANDUMO IR STIPRUMO TYRIMAS	23
3.1. Neutraliųjų sluoksnių padėties tyrimas	23
3.1.1. Neutraliųjų sluoksnių padėties analitinis skaičiavimas	23
3.1.2. Neutraliųjų sluoksnių padėties kitimas priklausomai nuo sluoksnių storio	25
3.1.3. Neutraliųjų sluoksnių padėties kitimas priklausomai nuo sijos standumo	31
3.1.4. Neutraliųjų sluoksnių padėties kitimas priklausomai nuo sluoksnių skaičiaus	32
3.2. Daugiasluoksnės sijos standumo tyrimas	36
3.2.1. Sluoksnių storio įtaka	36
3.2.2. Sluoksnių skaičiaus įtaka	40
3.3. Stiprumo tyrimas	43
3.3.1. Normalinių įtempimų pasiskirstymas DKE skerspjūvyje	43
3.3.2. Sluoksnių storio įtaka įtempimams	45
3.3.3. Sluoksnių skaičiaus įtaka įtempimams	48
4. DS STIPRUMO TYRIMAS BEM	53
4.1. Konstrukcijos apibūdinimas	53
4.2. BEM taikymas	53
4.3. Analitinio skaičiavimo ir BEM rezultatų palyginimas	64
IŠVADOS IR SIŪLYMAI	65
LITERATŪRA	66
PRIEDAI	67

LENTELĖS

2.1. Medžiagų fizinės ir mechaninės savybės, kai $T = 25^{\circ}\text{C}$	19
4.1. Asimetrinių A – B – C, C – A – B, B – C – A konstrukcinių elementų įtempimų σ_x reikšmės, gautos pagal analitinę DKE skaičiavimo metodiką ir BEM, esant grynajam lenkimui	64

PAVEIKSLAI

1.1 pav. Daugiasluoksniai konstrukciniai elementai	10
1.2 pav. Simetrinių ir asimetrinių konstrukcinių elementų skerspjūviai	10
1.3 pav. DKE modelis skaičiuojant BEM	11
1.4 pav. Pirminis tinklelis inžinerinei struktūrai su skirtingomis medžiagos sritimis	12
1.5 pav. Sija, sudaryta iš dviejų skirtingų medžiagų	14
1.6 pav. Kompozitas, orientuotas viena kryptimi	16
1.7 pav. Kampu orientuotas kompozitas	16
1.8 pav. Trisluoksnės sijos elementas	17
2.1 pav. Bandinio konstrukcijos (formos)	20
2.2 pav. Bandinio skerspjūvis	21
3.1 pav. Asimetrinių trisluoksnių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficientų K_y ir K_x priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficientų ψ_y ir ψ_x	25
3.2 pav. Asimetrinių dvisluoksnių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficientų K_y ir K_x priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_y (keičiant medžiagų sluoksnių storius) ($\psi_x = 0,5$)	26
3.3 pav. Standumo centro kitimo grafikas; konstrukcija, kai $\psi_y = 0$; konstrukcija, kai $\psi_y = 0,1 \dots 0,9$; konstrukcija, kai $\psi_y = 1$	28
3.4 pav. Asimetrinių dvisluoksnių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficientų K_x , K_y priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_x (keičiant medžiagų pločius) ($\psi_y = 0,5$)	29
3.5 pav. Standumo centro kitimo grafikas; konstrukcija, kai $\psi_x = 0$; konstrukcija, kai $\psi_x = 0,1 \dots 0,9$; konstrukcija, kai $\psi_x = 1$	30
3.6 pav. Trisluoksnių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybė nuo standumo D_x	31
3.7 pav. Asimetrinių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n (konstrukcija A – D – S_k – ...)	32
3.8 pav. Konstrukcijos (priklausomai nuo sluoksnių skaičiaus)	33
3.9 pav. Asimetrinių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n (konstrukcija S_k – A – D – ...)	34
3.10 pav. Asimetrinių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n (konstrukcija D – S_k – A – ...)	35
3.11 pav. Asimetrinių trisluoksnių konstrukcinių elementų standumo D_x priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_y	37
3.12 pav. Įvairių grupių sluoksniuotų konstrukcinių elementų, suformuotų iš anglies A ir stiklo S_k plastikų, standumo D priklausomybės nuo santykinio storio parametro ψ	38
3.13 pav. Asimetrinių trisluoksnių konstrukcinių elementų standumo D priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_y	38
3.14 pav. Konstrukcinių elementų standumo D_x , D_y priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_y ($\psi_x = 0,5 = \text{const}$)	39

3.15 pav. Konstrukcinių elementų standumo D_x, D_y priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_x ($\psi_y = 0,5 = \text{const}$)	39
3.16 pav. Asimetrinių konstrukcinių elementų standumo D_x priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n (konstrukcija A – D – S_k – ...)	40
3.17 pav. Asimetrinių konstrukcinių elementų standumo D_x priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n (konstrukcija S_k – A – D – ...)	41
3.18 pav. Asimetrinių konstrukcinių elementų standumo D_x priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n (konstrukcija D – S_k – A – ...)	42
3. 19 pav. Bandinių konstrukcijos	43
3. 20 pav. Trisluoksnės sijos (A – D – S_k) skerspjūvis ir normalinių įtempimų pasiskirstymas jame	43
3.21 pav. Trisluoksnės sijos (S_k – A – D) skerspjūvis ir normalinių įtempimų pasiskirstymas jame	44
3.22 pav. Trisluoksnės sijos (D – S_k – A) skerspjūvis ir normalinių įtempimų pasiskirstymas jame	44
3.23 pav. Įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ konstrukcijos A – D – S_k išoriniuose ir vidiniuose sluoksniuose	45
3.24 pav. Įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ konstrukcijos S_k – A – D išoriniuose ir vidiniuose sluoksniuose	47
3.25 pav. Įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ konstrukcijos D – S_k – A išoriniuose ir vidiniuose sluoksniuose	47
3.26 pav. Įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo sluoksnių skaičiaus n konstrukcijos A – D – S_k – ... išoriniuose ir vidiniuose sluoksniuose	49
3.27 pav. Įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo sluoksnių skaičiaus n konstrukcijos S_k – A – D – ... išoriniuose ir vidiniuose sluoksniuose	50
3.28 pav. Įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo sluoksnių skaičiaus n konstrukcijos D – S_k – A – ... išoriniuose ir vidiniuose sluoksniuose	51
4.1 pav. Trisluoksnės konstrukcijos	53
4.2 pav. Trisluoksnės (A – B – C) ir vienasluoksnės konstrukcijos skerspjūvis, kai konstrukcija sudaryta iš A, iš B, iš C medžiagos	54
4.3 pav. Trisluoksnės (C – A – B) ir vienasluoksnės konstrukcijos skerspjūvis, kai konstrukcija sudaryta iš A, iš B, iš C medžiagos	54
4.4 pav. Trisluoksnės (B – C – A) ir vienasluoksnės konstrukcijos skerspjūvis, kai konstrukcija sudaryta iš A, iš B, iš C medžiagos	54
4.5 pav. Sijos, skaičiuojant BEM, įtvirtinimo schema	54
4.6 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija A – B – C, redukuota pagal A) ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai	55
4.7 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija A – B – C, redukuota pagal B) ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai	56
4.8 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija A – B – C, redukuota pagal C) ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai	57
4.9 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija C – A – B, redukuota pagal A) ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai	58
4.10 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija C – A – B, redukuota pagal B) ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai	59
4.11 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija C – A – B, redukuota pagal C) ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai	60

4.12 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija B – C – A , redukuota pagal A) ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai	61
4.13 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija B – C – A , redukuota pagal B) ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai	62
4.14 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija B – C – A , redukuota pagal C) ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai	63

IVADAS

Mes nė vienas nenorime būti išlaidūs. Taip pat nenorime kurti ar naudoti konstrukcijų, kurios yra masyvios, griezdiškos. Taip pat veikia ir estetiškas faktorius, nes dažnai mums gražu atrodo tai, kas tobula, tikslinga, racionalu. Taigi, susiduriame su patikimumo ir ekonomiškumo problema, nes konstrukcijos turi būti patikimos ir racionalios.

Konstruktiniai elementai vertinami pagal:

- stiprumą (t.y., savybę nesuirti dėl mechaninių apkrovų);
- stabilumą (t.y., savybę išlaikyti savo pradinę pusiausvyros formą, po mechaninių trikdymų sugrįžti į pradinę pusiausvyrą);
- standumą (t.y., savybę priešintis deformacijai).

Konstrukcijos elementų mechaninės savybės (taip pat ir stiprumas, standumas, stabilumas) priklauso ne tik nuo geometrinės formos, didumo, bet ir nuo medžiagų, iš kurių tie elementai padaryti.

Daugelis konstrukcinių elementų (KE) gaminami iš vienos rūšies medžiagos (pvz.: plieno, spalvotųjų metalų, plastmasės). Šios medžiagos turi izotropinių ar anizotropinių stiprumo savybių (izotropinės medžiagos – tai medžiagos, kurios visomis linkmėmis turi vienodas fizines – mechanines savybes; anizotropinės – kurių savybės įvairiomis kryptimis yra skirtingos).

Tačiau naudojant vienos rūšies medžiagą dažniausiai negalima suderinti medžiagos stiprumo savybių su konstrukcijai keliamais kainos, masės ir kitais reikalavimais. Atsirandant naujoms kompoziciniams medžiagoms (KM) ir didėjant reikalavimams konstrukcijų stiprumui, standumui, stabilumui, masei, kainai vis dažniau yra naudojami daugiasluoksniai konstrukciniai elementai (DKE). Naujos KM, tokios kaip stiklo, anglies, boro plastikai, pasižymi ryškiomis anizotropinėmis savybėmis. Šių medžiagų panaudojimas DKE leidžia gauti norimą kryptimi reikiamas konstrukcijų savybes įvertinant apkrovų visumą, darbo aplinką ir kitus svarbius reikalavimus. Daugiasluoksnių konstrukcinių elementų projektavimo klausimai buvo nagrinėti [2 – 4, 8] darbuose, tačiau juose beveik nebuvo nagrinėtos asimetrinės, iš trijų medžiagų sudarytos konstrukcijos. Tad šias problemas aš panagrinėjau išsamiau.

Darbo tikslas – išnagrinėti daugiasluoksnių sijų neutraliojo sluoksnio, standumo ir įtempimų pasiskirstymo dėsninumus, keičiant sluoksnių geometrines charakteristikas, medžiagų išdėstymą konstrukcinio elemento skerspjūvyje, sluoksnių skaičiaus, esant asimetrinėms iš trijų medžiagų sudarytomis konstrukcijoms.

Darbo uždaviniai:

1. Suskaičiuoti, iliustruoti ir paaiškinti skirtingų konstrukcijų neutraliojo sluoksnio, standumo, įtempimų priklausomybes.
2. Sugretinti analitinius skaičiavimus su skaičiavimais BEM.

1. DAUGIASLUOKSNĖS KONSTRUKCIJOS IR JŲ EFEKTYVUMAS

1.1. DKE bendroji charakteristika ir jų panaudojimas

Hibridiniai konstrukciniai elementai (t.y., elementai, sudaryti iš dviejų ar daugiau skirtingų medžiagų) pirmiausia pradėti taikyti lėktuvuose, sklandytuvuose. Šiuo metu jie naudojami įvairios paskirties objektams: pradedant buitine technika, statybinėmis konstrukcijomis, automobiliais ir baigiant lėktuvų konstrukcijomis.

Lietuvoje KM pradėtos naudoti 1972m. Šiuo metu gaminant sklandytuvus yra naudojamos daugiasluoksnės hibridinės konstrukcijos, kurios yra sukomponuotos iš įvairių markių anglies plastikų, šalto ir karšto kietėjimo stiklaplasčių.

Norint sukurti patikimą konstrukciją, reikia pažinti mechanines konstrukcinių medžiagų savybes, mokėti panaudoti savybes išreikšti konstrukcijų skaičiavimuose.

Esant skirtingoms naudojamų medžiagų standumo charakteristikoms daugiasluoksniuose konstrukcijose, esant tempimui, lenkimui, atsiranda erdvinis įtempimų būvis. Yra svarbu nustatyti, kokių dydžių įtempimai įvairiomis kryptimis yra gaunami daugiasluoksneje konstrukcijoje, kiek šie įtempimai gali spartinti irimo procesus ir turėti įtakos konstrukcijos ilgaamžiškumui, kokie yra įtempimų pasiskirstymo dėsningumai, anomalinių zonų, kurios atsiranda dėl deformacijų suvaržymo konstrukcinio elemento tvirtinimo vietose, įtempimų dydžiai, ilgiai ir kt.

DKE stiprumą ir standumą nagrinėjo J. Bareišis, V. Paulauskas, V. Vasiljevas, D. Garuckas, A.K. Kvedaras, F. Bulavs, N. Tirans ir kt. [3, 4, 5, 8, 9].

DKE stiprumas, standumas priklauso nuo naudojamų medžiagų skaičiaus, medžiagų standumo charakteristikų, geometrinių parametrų, sluoksnių skaičiaus ir sluoksnių išdėstymo eiliškumo. Žinojimas kaip kinta KE stiprumo ir standumo parametrai priklausomai nuo išvardintų veiksnių įgalintų greičiau pasirinkti tinkamą gaminio (sudaryto iš DKE) konstrukcijos variantą.

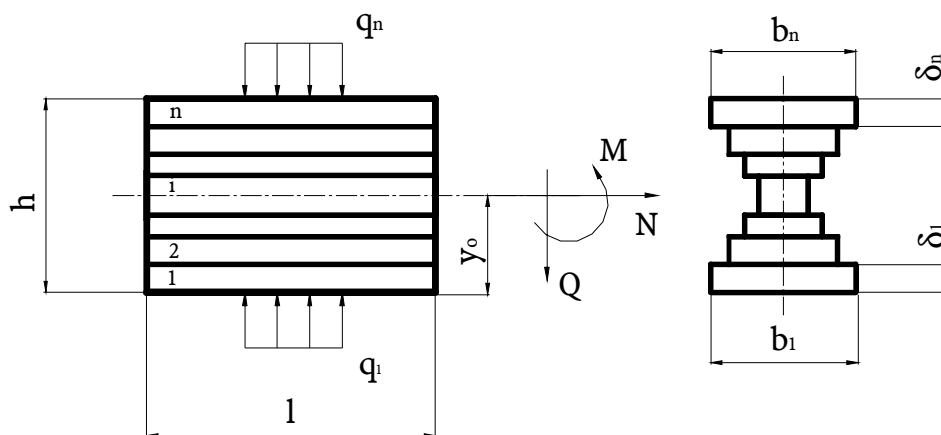
Konstruojant DKE iš kelių skirtingų medžiagų, kurios turi skirtingas ne tik stiprumo ir standumo charakteristikas, bet ir skirtingą lyginamąjį svorį ir masę, galima didelę konstrukcijų įvairovę su skirtingais parametrais. Taigi, derinant kompozicinių medžiagų stiprumo ir standumo reikalavimus su jų sluoksnių storiais, tankiais ir kaina, galima gauti maksimalaus stiprumo ir standumo ir minimalios masės ar kainos daugiasluoksnes konstrukcijas.

KM sudaro kompozicijas, kurios gaminiui suteikia tam tikrų savybių. Medžiagų bendras darbas kompozicijoje yra tolygus naujos medžiagos sukūrimui, kurios savybės skiriasi nuo ją sudarančių komponentų savybių.

Kaip minėjau, DKE naudojami įvairios paskirties objektams, tad platus ir įvairiapusis DKE naudojimas verčia viso pasaulio mokslininkus nagrinėti ir spręsti dėl DKE iškylančias problemas. Pavyzdžiui: Merilendo universitete atliekami tiltų kompozicinių konstrukcijų stiprumo ir nuovargio tyrimai, Arizonos universitete nagrinėjamas pažeidimų kaupimasis sluoksniuotose lėktuvo konstrukcijose ir kt.

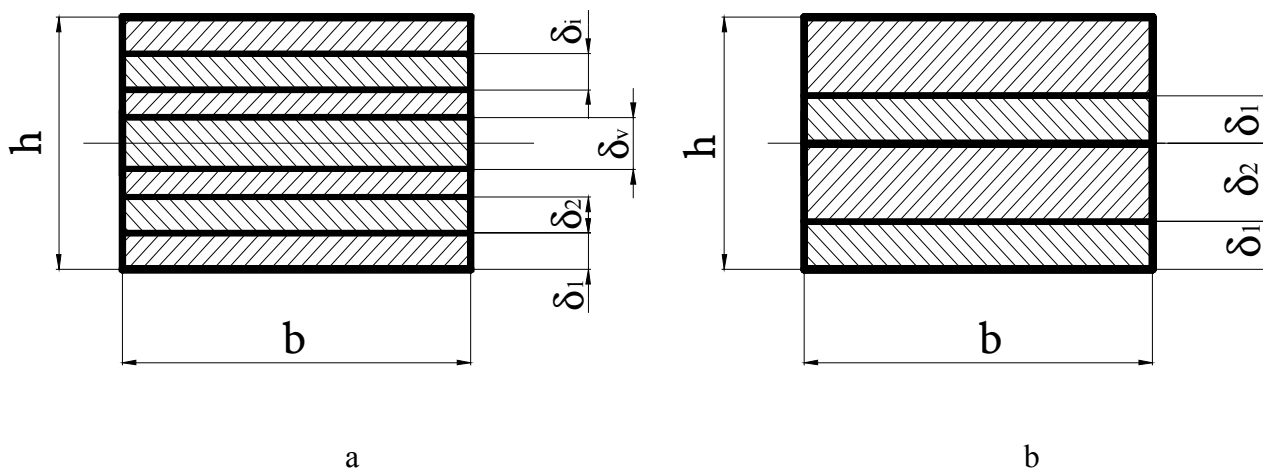
1.2. DKE struktūra

Bendroju atveju daugiasluksnį konstrukcinį elementą gali sudaryti įvairaus pločio b ir aukščio (storio) δ sluoksniai. Konstrukcinis elementas gali būti apkrautas tokiomis apkrovomis: ašine jėga N , skersine jėga Q , sloginiu q , lenkimo momentu M arba kombinuota apkrova (1.1 pav) [8].



1.1 pav. Daugiasluksniai konstrukciniai elementai

DKE stiprumo ir standumo savybių kitimo dėsningumai atskiroms elementų konstrukcijoms skiriasi priklausomai nuo konstrukcinio elemento sluoksnių medžiagos mechaninių savybių, medžiagų skaičiaus, sluoksnių skaičiaus (lyginis ar ne) ir kt. faktorių. Tad visi daugiasluksniai konstrukciniai elementai pagal jų savybių kitimo dėsningumą panašumą yra skirstomi į grupes ir tipus. Pagal konstrukcinio elemento sluoksnių simetriškumą ir sluoksnių skaičių, daugiasluksniai konstrukciniai elementai skirstomi į simetrinius ir asimetrinius konstrukcinius elementus (1.2 pav.).



1.2 pav. Simetrinių (a) ir asimetrinių (b) konstrukcinių elementų skerspjūviai

Simetriniai konstrukciniai elementai – tai konstrukciniai elementai turintys nelyginį sluoksnių skaičių (pvz. 3, 5, 7 ir t.t.), kurių vienodo storio atitinkamos medžiagos sluoksniai išsidėstę simetriškai vidurinio sluoksnio atžvilgiu [8].

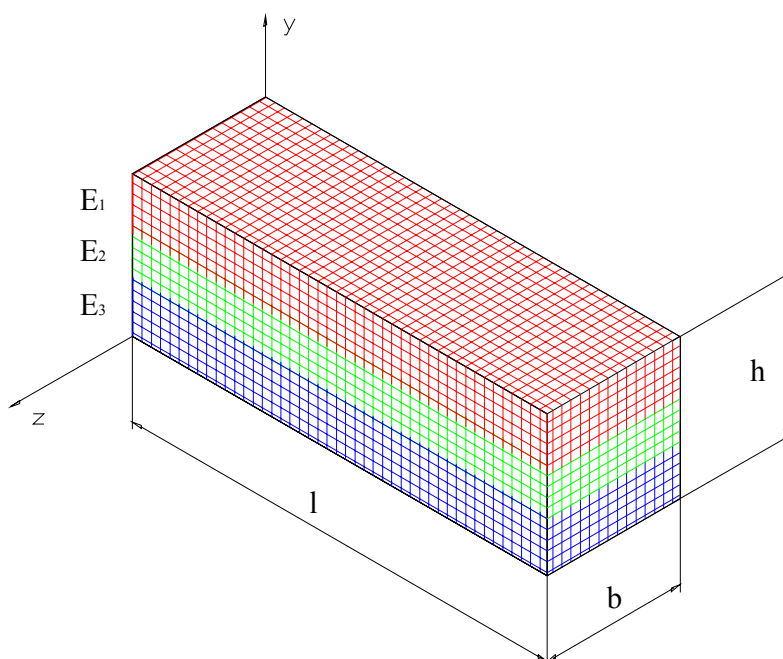
Asimetriniai konstrukciniai elementai – tai konstrukciniai elementai turintys lyginį sluoksnių skaičių (pvz. 2, 4, 6 ir t.t.), kurių sluoksniai yra skirtingų medžiagų ir (arba) skirtingų medžiagų sluoksniai atitinkamai kartojasi periodiškai.

Pagal daugiasluoksnio konstrukcinio elemento sluoksnio padėtį konstrukciniame elemente bei to sluoksnio medžiagos mechanines ir fizines savybes, simetriniai sluoksniuoti konstrukciniai elementai yra suskirstyti į tiesioginės ir atvirkštinės konstrukcijos elementus. Tiesioginės konstrukcijos konstrukciniai elementai – tai simetriniai daugiasluoksniai konstrukciniai elementai, kurių išorinio sluoksnio medžiagos tamprumo modulis E_1 yra didesnis už sekančio vidinio sluoksnio medžiagos tamprumo modulį E_2 (t.y. $E_1 > E_2$). Atvirkštinės konstrukcijos konstrukciniai elementai – tai simetriniai daugiasluoksniai konstrukciniai elementai, kurių išorinio sluoksnio medžiagos tamprumo modulis E_1 yra mažesnis už sekančio vidinio sluoksnio medžiagos tamprumo modulį E_2 (t.y. $E_1 < E_2$).

Simetriniai daugiasluoksniai konstrukciniai elementai priklausomai nuo stiprumo (σ_x, τ_{xy}) ir standumo (K, B, D) savybių dėsningumą skirtumo bei nuo išorinių sluoksnių skaičiaus vidurinio sluoksnio atžvilgiu yra suskirstyti į pirmos ir antros grupės konstrukcinius elementus. Pirmajai grupei priklauso konstrukciniai elementai, sudaryti iš 3, 7, 11 ir t. t. sluoksnių, t.y., turintys po nelyginį išorinių sluoksnių, išsidėsčiusių vidurinio sluoksnio atžvilgiu, skaičių. Antrajai grupei priklauso konstrukciniai elementai, sudaryti iš 5, 9, 13 ir t. t. sluoksnių, t.y., turintys po lyginį išorinių sluoksnių, išsidėsčiusių vidurinio sluoksnio atžvilgiu, skaičių.

1.3. DKE skaičiavimas BEM

Nagrinėjant daugiasluoksnes konstrukcijas, plyšio vystymąsi jose, sprendžiant kontaktinius uždavinius tarp sluoksniuotų elementų dažnai yra akcentuojamas baigtinių elementų metodo (BEM) taikymas [8]. BEM buvo sukurtas sprendžiant įtempimų analizės uždavinius. BEM – tai metodas, kuriame aproksimuojama funkcija formuojama iš mažoje srityje apibrėžtų paprastų funkcijų, kurių paprasta polinominė išraiška yra gauta pagal reikšmes elementą ribojančiuose mazguose. Tai yra, skaičiuojant BEM, kūnas suskaldomas į tam tikrą elementų skaičių; skaičiavimo tikslumas priklauso nuo elementų skaičiaus, tipo, elementų sutankinimo įtempimų padidėjimo zonose. 1.3 pav. pavaizduotas trisluoksnis konstrukcinis elementas, kurį sudarančių medžiagų tamprumo moduliai yra atitinkamai E_1, E_2, E_3 . Visas kūnas yra suskaidytas į tam tikrą elementų skaičių; kuo daugiau elementų, tuo tikslesni skaičiavimai BEM metodu.

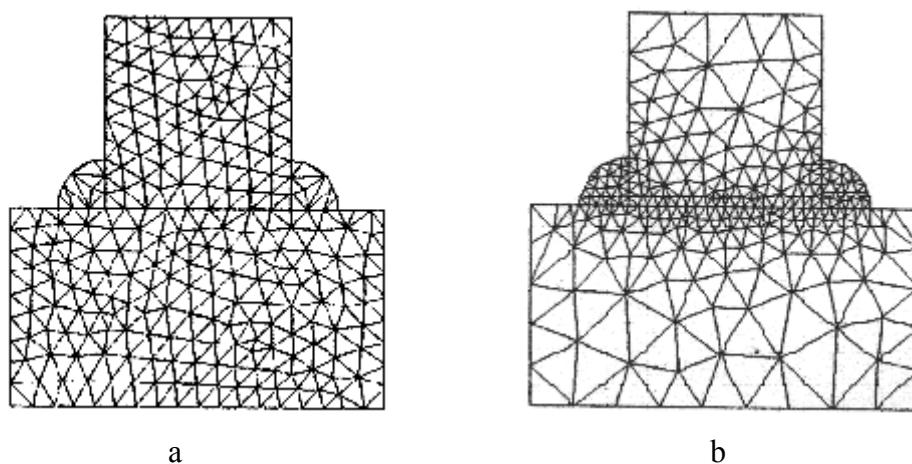


1.3 pav. DKE modelis skaičiuojant BEM

BEM yra naudojamas nagrinėjant daugiasluoksnes konstrukcijas, plyšio vystymąsi šiose konstrukcijose, taip pat sprendžiant kontaktinius uždavinius tarp sluoksniuotų elementų. BEM programos taip pat plačiai naudojamos įtempimų ir deformacijų pasiskirstymo dėsninėjimams nustatyti.

Šiandien BEM yra standartinė konstrukcinės ir skysčių mechanikos daugelio problemų tyrimo procedūra. Baigtiniai elementai mums leidžia apskaičiuoti reikalingas charakteristikas išvengiant būtinybės naudoti bandymams brangius fizikinius prototipus. Augant šio metodo supratimui daug pastangų paaukojama skaičiavimo greičio ir tinklelio kokybės pagerinimui. Vienas iš pagrindinių baigtinių elementų analizės rūpesčių yra baigtinių elementų tinklelio proporcingumas ir naudojamų baigtinių elementų tikslumas; taigi, papildomas optimizacinis procesas pagerina tinklelio kokybę ir taip yra gaunami geresni rezultatai.

Paprščiausias skaičiavimas naudojant BEM yra rupaus tinklelio sudarymas, tačiau tokiu atveju gaunamos didelės paklaidos. Tad geriausia yra pakeisti pirminį tinklelį nurodant apkrovimus, medžiagos savybes. Ši informacija leidžia sukurti dailesnį tinklelį apie kritines sritis (apie kampus, sritis, kuriose yra skirtingos medžiagų savybės). Sukūrus baigtinių elementų tinklelį su reikalinga papildoma informacija yra įvedamas ir kontrolinio atstumo supratimas. Kontrolinis atstumas apima du susijusius veiksnius: pakeistą trianguliaciją Δ ir funkciją H , kuri charakterizuojama analitiškai. Šie veiksniai leidžia nustatyti specifines tinklelio elementų savybes ir juose yra visuotinė informacija, susijusi su skirtingais aspektais: srities geometrija, medžiagų savybės, apkrovimo sąlygos [12].



1.4 pav. Pirminis tinklelis inžinerinei struktūrai su skirtingomis medžiagos sritimis: a) vienodas pirminis tinklelis, b) sub – optimalus pirminis tinklelis

1.4 pav. pavaizduoti tinkleliai parodo tinklelių sukūrimo galimybes. Abu tinkleliai turi vienodą elementų skaičių. Paveiksle a pavaizduotas tinklelis yra sukurtas tik pagal naudojamos figūros informaciją, t.y. tik pagal kontūrą. Paveiksle b pavaizduotas tinklelis, kurį sudarant buvo atsižvelgta ir į skirtingas medžiagų savybes. Iš šių paveikslų matyti, jog panaudojus papildomą informaciją galima gauti daug lankstesnį tinklelio sukūrimo procesą ir tai leidžia pasirinkti reikiamą tinklelio dydį kritinėse srityse.

Taigi, BEM universalus, tačiau apytikslis matematinis modelis.

1.4. Stiprumo ir standumo skaičiavimo būdai

I. Požėla, S. Tamulevičius, D. Girdauskienė (Fizikos katedra, Kauno technologijos universitetas) [10] pasiūlė supaprastintas lygtis deformacijoms ir įtempimams daugiasluoksniuose heterodariniuose (plokštelėse) apskaičiuoti. Naudodami Kirchhofo artinį, jie išsprendė vienmatį kubinės simetrijos darinių tamprumo uždavinį. Nevienalyčius įtempimus jie išreiškė pagrindinės plokštumos ilgine deformacija ir išlinkimo kreivumo spinduliu, specialiai tam tikslui parinkus pagrindinės plokštumos padėtį. Tai leido supaprastinti ieškomų įtempimų analitines išraiškas. Pasak I. Požėlos, S. Tamulevičiaus, D. Girdauskienės, dviašiai vidiniai įtempimai lygūs:

$$\sigma = (C_{11} + C_{12})(-e^* + e_0 + \chi_3 \cdot R^{-1}), \quad (1.1)$$

čia C_{11} ir C_{12} – medžiagos standumo koeficientai;
 e^* – dviašės savosios deformacijos tenzorius;
 e_0 – pagrindinės plokštumos dviašės deformacijos tenzorius;
 R – jos dviašio išlinkimo kreivumo spindulys ($R_1 = R_2 = R$).

e_0 ir R priklauso nuo apkrovų h_1 ir h_2 ir yra lygūs:

$$e_0 = ((D_{11} + D_{12})\eta_1 - B_{11} \cdot \eta_2)\Delta^{-1}; \quad (1.2)$$

$$R^{-1} = (B_{11} \cdot \eta_1 - (A_{11} + A_{12})\eta_2)\Delta^{-1}; \quad (1.3)$$

čia A, B, D – plokštelės standumai,

$$\Delta = (A_{11} + A_{12})(D_{11} + D_{12}) - B_{11}^2. \quad (1.4)$$

Plokštelės apkrovos η_1 ir η_2 yra apskaičiuojamos taip:

$$\eta_1 = \sum_{i=2}^N Y_i \cdot h_i \cdot e^*; \quad (1.5)$$

$$\eta_2 = -\frac{1}{2} \sum_{i=2}^N Y_i \cdot h_i (2H_i + h_i - 2\delta_1); \quad (1.6)$$

čia N – sluoksnių skaičius plokštelėje;

$Y_i = (C_{11} + C_{12})_i - i$ – tojo sluoksnio dviašis Jungo modulis;

h_i – jo storis;

$$H_i = \begin{cases} 0, & \text{jei } i = 1 \\ h_1 + h_2 + \dots, & \text{jei } i \geq 2 \end{cases} \quad (1.7)$$

δ_1 nusako pagrindinės plokštumos plokštelėje padėtį.

Taigi, pasinaudojus (1.1) – (1.7) lygtimis galime apskaičiuoti įtempimus bei deformacijas e_0 ir R .

S. P. Timošenko daugiasluoksniams konstrukcijoms pasiūlė redukuoto skerspjūvio metodą [11]. Šis metodas leidžia palengvinti sijos, pagamintos iš skirtingų medžiagų, tyrimą. Šio metodo esmė – sijos skerspjūvio skirtingų dalių (kurios yra pagamintos iš skirtingų medžiagų)

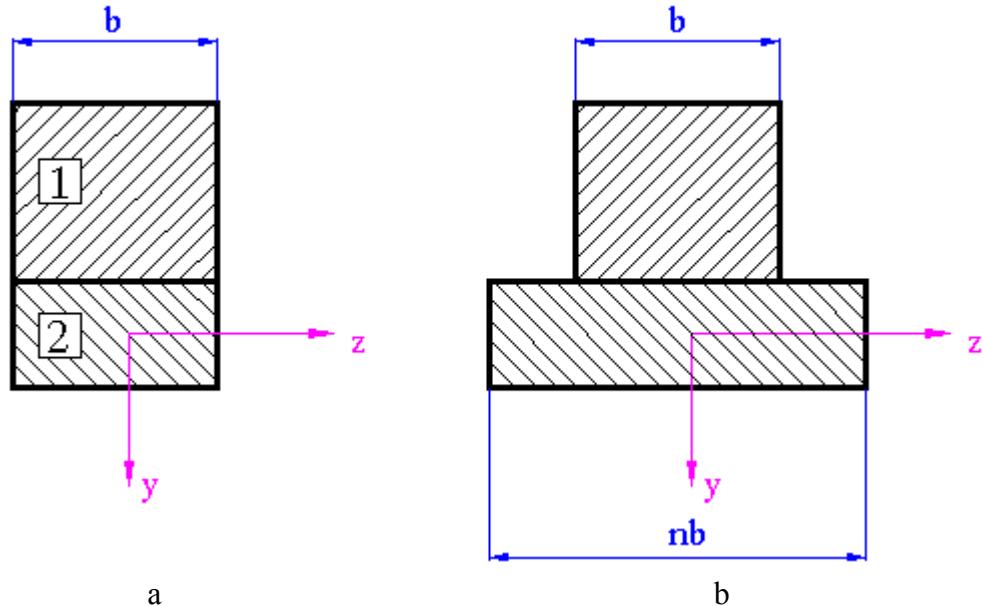
pertvarkymas į ekvivalentinį sijos skerspjūvį, kuris yra iš vienos medžiagos. Paskui, taip vadinamas redukuotas skerspjūvis yra nagrinėjamas taip pat, kaip ir vienos medžiagos sijos.

Tam, kad pradinės sijos skerspjūvis būtų ekvivalentinis redukuotam skerspjūviui, jis turi turėti tą pačią neutraliąją ašį ir tokią pat galimybę pasipriešinti lenkimo momentui. Tam, kad pritaikyti redukuoto skerspjūvio metodą lygybę $E_1 \int_1 y \cdot dF + E_2 \int_2 y \cdot dF = 0$ turime padalinti iš E_1 ir pažymėję $n = E_2 / E_1$, kur n yra taip vadinamas modulių santykis, gauname:

$$\int_1 y \cdot dF + \int_2 y \cdot n \cdot dF = 0. \quad (1.8)$$

Iš šios formulės matyti, jog neutraliosios ašies padėtis nepasikeis, jeigu kiekvieną medžiagos 2 (1.5 pav.) elementą padidinsime ploteliu dF koeficiento n sąskaita, esant sąlygom, kai atstumas y kiekvienam tokiam elementui lieka nepakitęs. Paprasčiau pasakius, skerspjūvį galime laikyti sudarytą iš dviejų dalių: iš plotelio 1, kuris pasilieka nepakitęs ir iš plotelio 2, kurio plotis padidėja n kartų. Tokiu būdu gaunamas naujas skerspjūvis, kuris yra sudarytas iš vienos medžiagos, t.y. iš medžiagos 1.

Redukuotas skerspjūvis sijai, parodytai 1.5 pav. a, pateiktas 1.5 pav. b. Dalis pjūvio (medžiaga 1) lieka nepakitusi, o kita dalis (medžiaga 2) padidėja n kartų (šiuo atveju yra imama, jog $n > 1$, tačiau tai nėra privaloma sąlyga). Tad galima laikyti, kad redukuotas skerspjūvis yra sudarytas iš medžiagos 1. Redukuoto skerspjūvio neutralioji ašis bus ten pat, kai ir pradinės sijos. Be to, redukuotas skerspjūvis, kaip ir pradinis pjūvis turės tokią pat galimybę pasipriešinti lenkimo momentui.



1.5 pav. Sija, sudaryta iš dviejų skirtingų medžiagų: a) skerspjūvis; b) redukuotas pjūvis

Redukuotam skerspjūviui yra teisinga lygybė:

$$\sigma_x = \chi \cdot E_1 \cdot y. \quad (1.9)$$

Tuo tarpu momentas

$$M = \int \sigma_x \cdot y \cdot dF = \int_1 \sigma_x \cdot y \cdot dF + \int_2 \sigma_x \cdot y \cdot dF = \chi \cdot E_1 \int_1 y^2 \cdot dF + \chi \cdot E_2 \int_2 y^2 \cdot dF = \chi(E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2) \quad (1.10)$$

Ši išraiška sutampa su pradinio skerspjūvio momento išraiška, tad pradinės ir redukuotos sijos momentai yra lygūs.

Redukuoto skerspjūvio įtempimus galime rasti kaip ir sijos, kuri yra sudaryta iš vienos medžiagos. Redukuoto skerspjūvio įtempimai yra randami taip:

$$\sigma_{x1} = \frac{M \cdot y}{I_{re}}, \quad (1.11)$$

čia I_{re} – redukuoto skerspjūvio inercijos momentas neutralios ašies atžvilgiu ($I_{re} = I_1 + nI_2$).

Ši išraiška sutampa su pradinio skerspjūvio įtempimų išraiška, tad įtempimai medžiagoje 1 pradiniame sijos skerspjūvyje yra tokie pat kaip ir gautame redukuotame skerspjūvyje. Žinoma, medžiagai 2 pradiniame sijos skerspjūvyje panašūs tvirtinimai bus neteisingi. Norint gauti įtempimus pradiniame sijos skerspjūvyje, reikia įtempimus redukuotoje sijoje padauginti iš n . Tad iš to seka, kad kai redukuotas skerspjūvis sudarytas iš medžiagos 1, tai įtempimai medžiagoje 1 bus “tikri, realūs”, bet įtempimai toje sijos dalyje, kuri buvo sudaryta iš medžiagos 2, pakinta dėl modulių santykio n .

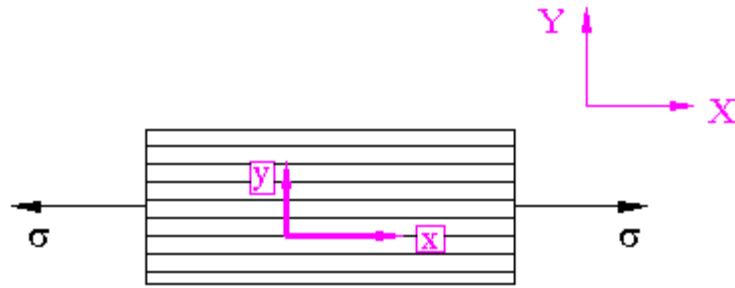
Redukuoto skerspjūvio metodas lengvai gali būti taikomas ir tuo atveju, kai sija yra sudaryta iš daugiau nei dviejų medžiagų. Taip pat galima redukuoti pirminę siją ir prie sijos, kurios tamprumo modulis E yra laisvai pasirenkamas: šiuo atveju visos pirminės sijos skerspjūvio dalys turi būti redukuojamos prie pasirinktos fiktyvios medžiagos.

A. Žiliukas taip pat pasiūlė sluoksniuotų kompozitų stiprumo skaičiavimo metodą [13]. Įtempimų analizei yra naudojamos lokalsios koordinatės (x, y) ir globaliosios koordinatės (X, Y) . Kai pluoštas yra orientuotas globaliųjų ašių X kryptimi (1.6 pav.), tai anizotropinio kūno tamprumo moduliai kryptimis x, y yra E_x ir E_y , o Puasono koeficientai – ν_x ir ν_y . Įtempimai apskaičiuojami taip:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x} - \frac{\nu_y \cdot \sigma_y}{E_y}; \\ \varepsilon_y &= \frac{\sigma_y}{E_y} - \frac{\nu_x \cdot \sigma_x}{E_x}; \end{aligned} \quad (1.12)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}.$$

Būtina pažymėti, jog $\nu_x / E_x = \nu_y / E_y$.



1.6 pav. Kompozitas, orientuotas viena kryptimi

Įtempimų ir deformacijų ryšys yra užrašomas matricos forma

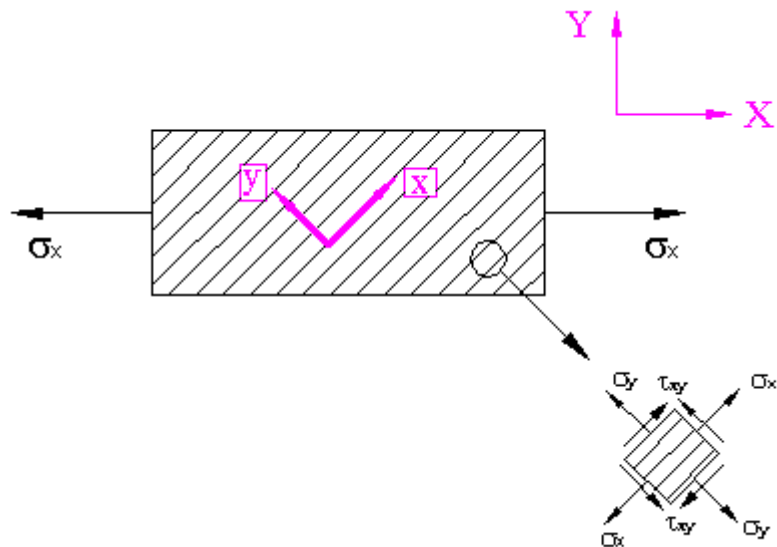
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\nu_y/E_y & 0 \\ -\nu_x/E_x & 1/E_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{xy} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.13)$$

arba sutrumpintai $\{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\}$;
čia $[S]$ – darnos matrica.

Įtempimai $\{\sigma\} = [Q]\{\varepsilon\} = [S]^{-1}\{\varepsilon\}$;
čia $[Q]$ – standumo matrica.

Taigi, standumo matrica yra atvirkštinė darnos matricai:
 $[Q] = [S]^{-1}$.

Kai lokalsiosios koordinatės (x, y) nesutampa su globaliosiomis (X, Y) koordinatėmis (1.7pav.), tai globaliasias koordinates reikia transformuoti į lokaliasias koordinates.



1.7 pav. Kampu orientuotas kompozitas

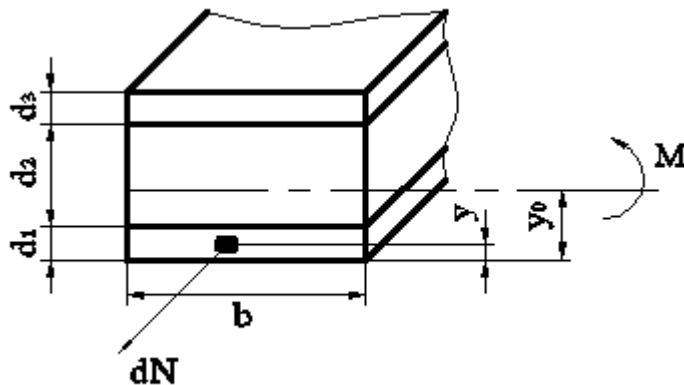
Šiuo atveju standumo matrica $[Q]$ globalinėse koordinatėse bus lygi:

$$\left[\bar{Q}\right] = \left[\bar{T}_\sigma\right]^{-1} [Q][T_\varepsilon]; \quad (1.16)$$

čia $[T_\sigma]$ ir $[T_\varepsilon]$ yra transformuotos matricos.

$$\text{Arba } \left[\bar{S}\right] = [Q]^{-1}. \quad (1.17)$$

J. Bareišis sijų neutralaus sluoksnio koordinatę y_0 pasiūlė rasti laikant, kad sijos elementas, parodytas 1.8 pav. yra pusiausvyroje [1]. Šis elementas yra veikiamas išorinių jėgų momento M ir vidinių jėgų dN , elemente dA , kuriame kyla normaliniai įtempimai σ_x .



1.8 pav. Trisluoksnės sijos elementas

Neutralaus sluoksnio koordinatę daugiasluoksnei sijai, pasak J. Bareišio, galima rasti pagal šią lygybę:

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n B_i \cdot \delta_i + 2 \sum_{i=2}^n \left(B_i \cdot \sum_{j=1}^{i-1} \delta_j \right)}{2 \sum_{i=1}^n B_i}. \quad (1.18)$$

Normaliniai įtempimai daugiasluoksnės sijos bet kuriame sluoksnyje, veikiant ašinei apkrovai ir lenkimo momentui yra apskaičiuojamos taip:

$$\sigma_{xi} = E_{xi} \left(\frac{N_x}{B} + \frac{M_x}{D} \cdot y_i \right); \quad (1.19)$$

čia D – sijos standumas lenkiant. Jis gali būti išreikštas kaip apibendrintų visos sijos tamprumo modulio E_k ir inercijos momento I_k sandauga:

$$D = (EI)_k = E_k \cdot I_k = \sum_{i=1}^n E_{xi} \cdot I_i. \quad (1.20)$$

Apibendrintas sijos tamprumo modulis E_k yra lygus:

$$E_k = \sum_{i=1}^n E_{xi} \cdot \frac{I_i}{I_k} = E_{x1} \cdot \frac{I_1}{I_k} + E_{x2} \cdot \frac{I_2}{I_k} + \dots + E_{xn} \cdot \frac{I_n}{I_k}. \quad (1.21)$$

Kai $Q_{(x)} \neq \text{const}$ tarp daugiasluoksnės sijos sluoksnių kyla normaliniai įtempimai σ_y . Jie randami iš lygybės

$$\sigma_{yi} = \frac{q}{b_i \cdot D} (y_i \cdot y_0 \cdot H_i - \frac{1}{2}(y_i + y_0) \cdot L_i + \frac{1}{3}T_i) - \frac{b_1 \cdot p_1}{b}, \quad (1.22)$$

$$\text{kur } q = b_1 \cdot p_1 - b_n \cdot p_2; \quad (1.23)$$

$$H_i = \sum_{j=1}^i B_j; \quad (1.24)$$

$$L_i = \sum_{j=1}^i B_j (y_j + y_{j-1}); \quad (1.25)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^i B_j (y_j^2 + y_{j-1} \cdot y_j + y_{j-1}^2); \quad (1.26)$$

čia p_1, p_2 – slėgiai, veikiantys į b_1 ir b_n – pločio sluoksnius.

Tangentiniai įtempimai, kylantys daugiasluoksnės sijos bet kuriame jos horizontaliniame pjūvyje yra apskaičiuojami iš lygybės:

$$\tau_i = \frac{Q \cdot C_{(y)}}{D \cdot b_{(y)}}; \quad (1.27)$$

$$\text{kur } C_i = 0,5 \sum_{j=1}^i B_j (y_{j-1} + y_j) = \int_0^y B \cdot y \cdot dy; \quad (1.28)$$

čia b_y – sijos plotis nagrinėjamame horizontaliniame pjūvyje.

Sijos standumas šlyčiai yra apskaičiuojamas pagal formulę:

$$K = \frac{h \cdot D}{\int_0^h \left(\frac{C_y \cdot dy}{b \cdot G_{xy}} \right)}. \quad (1.29)$$

2. DAUGIASLUOKSNIŲ SIJŲ (DS) SKAIČIAVIMO METODIKA ESANT TAMPRIAM DEFORMAVIMUI

2.1. Naudojamos prielaidos, medžiagos, konstrukcijos

DKE skaičiavimo metodikoje yra laikomasi šių prielaidų:

1. Deformuojamo konstrukcinio elemento skersiniai pjūviai lieka plokšti ir statmeni išilginiams sijos sluoksniams, nepriklausomai nuo to, ar sluoksnio medžiaga yra linijiniškai tampri.
2. Sluoksnio mechaninės charakteristikos priklauso nuo kompozito armuojančios ir rišamosios medžiagos, kaip visumos, savybių.
3. Sluoksnių sujungimo vietose nėra praslydimo.
4. Sluoksnius sudarančių medžiagų Puasono koeficientai yra vienodi.

Skaičiavimams atlikti, pasirinkau iš trijų medžiagų sudarytą nesimetrinį bandinį. Medžiagų (karšto kietėjimo stiklo plastiko, epoksidinės dervos, anglies plastiko) fizinės ir mechaninės savybės pateiktos 2.1 lent. [8].

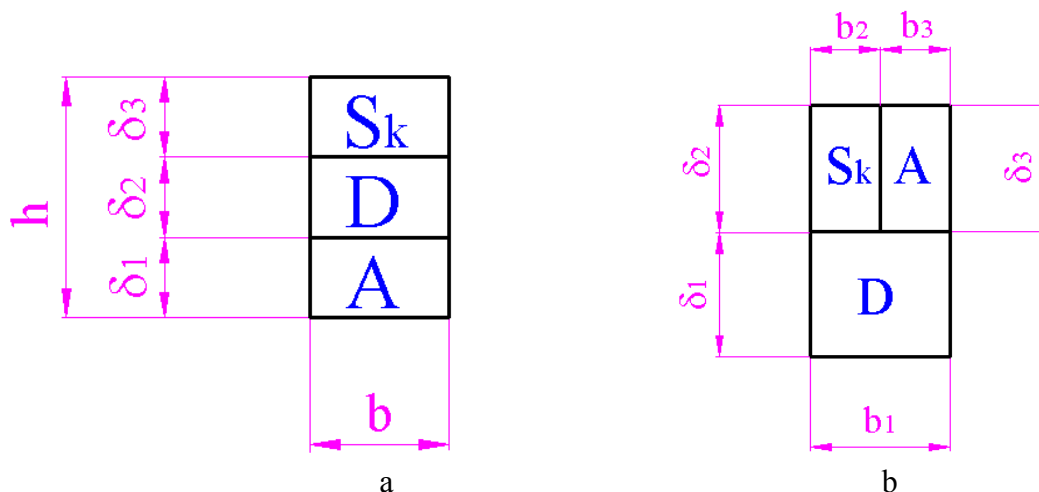
2.1 lentelė

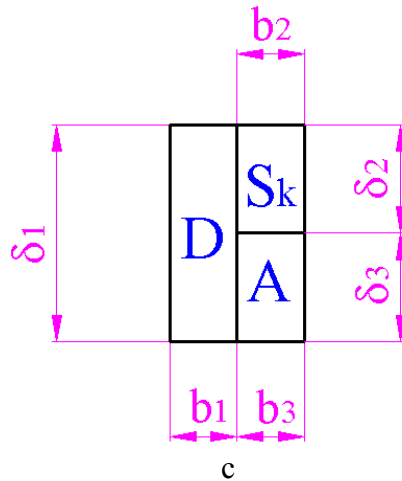
Medžiagų fizinės ir mechaninės savybės, kai $T = 25^{\circ}\text{C}$

Fizinės ir mechaninės savybės	Karšto kietėjimo stiklo plastikas S_k	Epoksidinė derva D	Anglies plastikas A
σ_u [MPa]	775	22	775
E [GPa]	20	1,6	60

Bandinio aukštis $h = 120$ mm, plotis $b = 50$ mm, ilgis $l = 1000$ mm.

Pasirinkau tris bandinio formas: pirmu atveju visos medžiagos yra išdėstytos vertikaliai viena už kitos (2.1 pav. a); antru atveju – karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksnis (S_k) ir anglies plastiko sluoksnis (A) yra išdėstyti horizontaliai vienas kito atžvilgiu, o vertikaliai šių medžiagų atžvilgiu yra epoksidinės dervos sluoksnis (2.1 pav. b); trečiu atveju – karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksnis (S_k) ir anglies plastiko sluoksnis (A) yra išdėstyti vertikaliai vienas kito atžvilgiu, o horizontaliai šių abiejų medžiagų atžvilgiu yra epoksidinės dervos sluoksnis (2.1 pav. c).





2.1 pav. Bandinio konstrukcijos (formos)

2.2. Neutraliojo sluoksnio padėties skaičiavimas

Nesimetrinėse daugiasluoksnėse konstrukcijose neutralios ašies padėtis nesutampa su skerspjūvio geometrine ašimi. Neutralios ašies padėtis taip pat nėra pastovi. Jos padėtis keičiasi priklausomai nuo konstrukcijos standumo ir sluoksnių storių. Neutralios ašies padėtis analitiškai aprašomas lygybe:

$$y_n = \frac{\sum_{i=1}^n B_{yi} \cdot \delta_i + 2 \sum_{i=2}^n \left(B_{yi} \cdot \sum_{j=1}^{i-1} \delta_j \right)}{2 \sum_{i=1}^n B_{yi}}; \quad (2.1)$$

$$x_n = \frac{\sum_{i=1}^n B_{xi} \cdot c_i + 2 \sum_{i=2}^n \left(B_{xi} \cdot \sum_{j=1}^{i-1} c_j \right)}{2 \sum_{i=1}^n B_{xi}}; \quad (2.2)$$

čia B_{xi} , B_{yi} (B_i) – i -tojo sluoksnio standumas x ir y ašių kryptimi, N;
 δ_i – i -tojo sluoksnio storis, m;
 b_i – i -tojo sluoksnio plotis, m;
 c_i – skaičiuojamasis x – są ašies kryptimi sluoksnio plotis, m.

Sluoksnio ašinis standumas yra lygus: $B_i = E_i \cdot A_i$, (2.3)

čia E_i – sluoksnio tamprumo modulis, Pa;

A_i – sluoksnio plotas, m²; $A_i = \delta_i \cdot b_i$. (2.4)

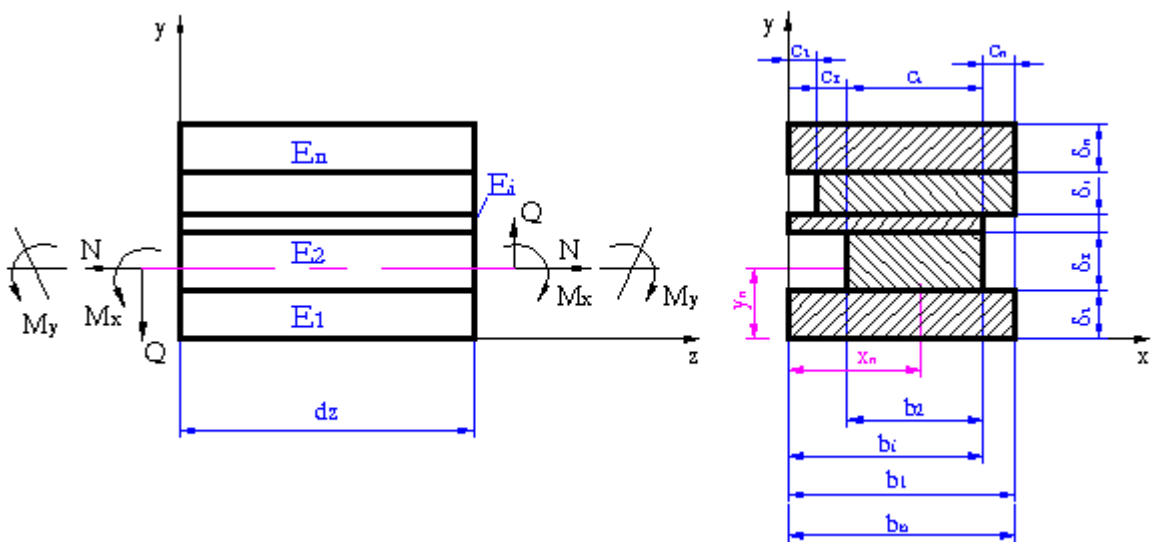
Taigi, norint surasti neutraliojo sluoksnio padėtį daugiasluoksniame konstrukciniame elemente, užtenka žinoti konstrukciją sudarančių medžiagų sluoksnių tamprumo modulius ir tų sluoksnių geometrinius parametrus.

Tačiau, jei kuris nors sluoksnis pagal x ar y koordinatę yra sudarytas iš dviejų medžiagų, tai to sluoksnio standumas B_i (B_{xi} , B_{yi}) yra skaičiuojamas atsižvelgiant į naudojamų medžiagų standumą. Pavyzdžiui, jeigu turime bandinį, kurio skerspjūvis parodytas 2.2 pav., tai jo neutralios padėties koordinatės apskaičiuojamos taip:

$$y_n = \frac{\sum_{i=1}^n B_i \cdot \delta_i + 2 \sum_{i=2}^n \left(B_i \cdot \sum_{j=1}^{i-1} \delta_j \right)}{2 \sum_{i=1}^n B_i} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i \cdot \delta_i^2 \cdot E_i + 2 \sum_{i=2}^n \left(b_i \cdot E_i \cdot \delta_i \cdot \sum_{j=1}^{i-1} \delta_j \right)}{2 \sum_{i=1}^n b_i \cdot \delta_i \cdot E_i};$$

$$x_n = \frac{\sum_{i=1}^n \left(c_i^2 \left(\sum_{i=1}^n \delta_i \cdot E_i \right) \right) + 2 \sum_{i=2}^n \left(c_i \cdot \sum_{j=1}^{i-1} c_j \left(\sum_{i=1}^n \delta_i \cdot E_i \right) \right)}{2 \sum_{i=1}^n c_i \left(\sum_{i=1}^n \delta_i \cdot E_i \right)}$$

Toje vietoje, kur yra tuščia, ten $E_i = 0$.



2.2. pav. Bandinio skerspjūvis

2.3. Standumo ir įtempimų skaičiavimas

Lenkiamose sijose labai didelę reikšmę turi išorinių sluoksnių standumas D . Standumas lenkiamose sijose priklauso ne tik nuo naudojamų medžiagų tamprumo modulių, bet ir nuo inercijos momentų:

$$D = E_k \cdot I_k = \sum_{i=1}^n E_i \cdot I_i, \quad (2.5)$$

čia E_k, E_i – atitinkamai, konstrukcijos ir i – tojo sluoksnio tamprumo modulis, Pa ;
 I_k, I_i – konstrukcijos ir i – tojo sluoksnio inercijos momentas, m⁴ .

Inercijos i – tojo sluoksnio momentas neutralios ašies atžvilgiu:

$$I_{xi} = \frac{b_i \cdot \delta_i^3}{12} + (y_i^*)^2 \cdot b_i \cdot \delta_i \quad (\text{keičiantis sluoksnių storiui}), \quad (2.6)$$

$$I_{yi} = \frac{\delta_i \cdot b_i^3}{12} + (x_i^*)^2 \cdot b_i \cdot \delta_i \quad (\text{keičiantis sluoksnių pločiui}); \quad (2.7)$$

čia y_i^*, x_i^* – atstumas nuo neutraliosios ašies iki nagrinėjamo sluoksnio vidurio, m .

$$y_i^* = y_n - 0,5 \cdot \delta_i - \sum_{m=1}^{i-1} \delta_m \quad (\text{keičiantis sluoksnių storiui}), \quad (2.8)$$

$$x_i^* = x_n - 0,5 \cdot b_i - \sum_{m=1}^{i-1} b_m \quad (\text{keičiantis sluoksnių pločiui}). \quad (2.9)$$

Normaliniai įtempimai bet kuriame lenkiamos daugiasluoksnės sijos taške apskaičiuojami pagal formulę:

$$\sigma_i = \frac{M \cdot y_i}{D} \cdot E_i, \quad (2.10)$$

čia E_i – i -tojo sluoksnio tamprumo modulis, Pa ;
 D – sijos standumas, Nm² ;
 M – momentas, Nm ;
 y_i – atstumas nuo neutraliosios linijos iki nagrinėjamo sluoksnio, m .

$$y_i = \left| y_n - \sum_{m=1}^{i-1} \delta_m \right|. \quad (2.11)$$

Skersinio lenkimo atveju, sijos pjūviuose veikia lenkimo ir skersinės įrašos. To pasekoje sijos skerspjūvyje atsiranda ne tik normaliniai, bet ir tangentiniai įtempimai. Tangentiniai įtempimai yra apskaičiuojami pagal formulę:

$$\tau_{xy} = \frac{Q_x \cdot C_{(y)}}{D \cdot b_{(y)}}. \quad (2.12)$$

3. DKE STANDUMO IR STIPRUMO TYRIMAS

3.1. Neutraliųjų sluoksnių padėties tyrimas

3.1.1. Neutraliųjų sluoksnių padėties analitinis skaičiavimas

2.1 pav. a pavaizduotos konstrukcijos x_n, y_n koordinatės (pagal 2.1 – 2.4 formules) atitinkamai lygios:

$$x_n = \frac{(\delta_1 \cdot b \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b \cdot E_3) \cdot b}{2(\delta_1 \cdot b \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b \cdot E_3)}, \quad (3.1)$$

t.y. x ašies atžvilgiu 2.1 pav. a pavaizduota konstrukcija yra vienasluoksnė, bet sudaryta iš trijų medžiagų, tad:

$$\sum_{i=1}^n B_{xi} = \delta_1 \cdot b \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b \cdot E_3.$$

$$y_n = \frac{\delta_1 \cdot b \cdot E_1 \cdot \delta_1 + \delta_2 \cdot b \cdot E_2 \cdot \delta_2 + \delta_3 \cdot b \cdot E_3 \cdot \delta_3 + 2(\delta_2 \cdot b \cdot E_2 \cdot \delta_1 + \delta_3 \cdot b \cdot E_3 (\delta_1 + \delta_2))}{2(\delta_1 \cdot b \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b \cdot E_3)},$$

t.y. y - ko ašies atžvilgiu 2.1 pav. a pavaizduota konstrukcija yra trisluoksnė, tad:

$$\sum_{i=1}^n B_{yi} = \delta_1 \cdot b \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b \cdot E_3.$$

2.1 pav. b pavaizduotos konstrukcijos x_n, y_n koordinatės atitinkamai lygios:

$$x_n = \frac{(\delta_1 \cdot b_2 \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2) b_2 + (\delta_1 \cdot b_3 \cdot E_1 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3) b_3 + 2((\delta_1 \cdot b_3 \cdot E_1 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3) b_2)}{2(\delta_1 \cdot b_2 \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2 + \delta_1 \cdot b_3 \cdot E_1 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3)},$$

t.y. x ašies atžvilgiu 2.1 pav. b pavaizduota konstrukcija yra dvisluoksnė, bet sudaryta iš trijų medžiagų, tad:

$$\sum_{i=1}^n B_{xi} = \delta_1 \cdot b_2 \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2 + \delta_1 \cdot b_3 \cdot E_1 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3.$$

$$y_n = \frac{\delta_1 \cdot b_1 \cdot E_1 \cdot \delta_1 + (\delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3) \delta_2 + 2((\delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3) \delta_1)}{2(\delta_1 \cdot b_1 \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3)},$$

t.y., y ašies atžvilgiu 2.1 pav. b pavaizduota konstrukcija yra dvisluoksnė, bet sudaryta iš trijų medžiagų, tad:

$$\sum_{i=1}^n B_{yi} = \delta_1 \cdot b_1 \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3.$$

2.1 pav. c pavaizduotos konstrukcijos x_n, y_n koordinatės atitinkamai lygios:

$$x_n = \frac{\delta_1 \cdot b_1 \cdot E_1 \cdot b_1 + (\delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3) b_2 + 2((\delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3) b_1)}{2(\delta_1 \cdot b_1 \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3)},$$

t.y. x ašies atžvilgiu 2.1 pav. c pavaizduota konstrukcija yra dvisluoksnė, bet sudaryta iš trijų medžiagų, tad:

$$\sum_{i=1}^n B_{xi} = \delta_1 \cdot b_1 \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3.$$

$$y_n = \frac{(\delta_2 \cdot b_1 \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2) \delta_2 + (\delta_3 \cdot b_1 \cdot E_1 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3) \delta_3 + 2((\delta_2 \cdot b_1 \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2) \delta_3)}{2(\delta_2 \cdot b_1 \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b_1 \cdot E_1 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3)},$$

t.y., y ašies atžvilgiu 2.1 pav. b pavaizduota konstrukcija yra dvisluoksnė, bet sudaryta iš trijų medžiagų, tad:

$$\sum_{i=1}^n B_{yi} = \delta_2 \cdot b_1 \cdot E_1 + \delta_2 \cdot b_2 \cdot E_2 + \delta_3 \cdot b_1 \cdot E_1 + \delta_3 \cdot b_3 \cdot E_3.$$

Skerspjuvio geometrinės ašies ir neutraliosios ašies padėties nesutapimą nusako šių dydžių santykis:

$$K_y = \frac{y_o}{y_n}; \quad (3.2)$$

$$K_x = \frac{x_o}{x_n}; \quad (3.3)$$

čia y_o ir x_o – skerspjuvio geometrinio centro koordinatės, m ;

y_n, x_n - neutralios ašies padėties koordinatės (skerspjuvio standumo centro koordinatės), m.

Santykinis sluoksnių storio koeficientas yra lygus:

$$\psi_y = \frac{\sum \delta_{lyg}}{h}; \quad (3.4)$$

$$\psi_x = \frac{\sum b_{lyg}}{b}; \quad (3.5)$$

$$\psi_x = 0 \dots 1; \quad \psi_y = 0 \dots 1,$$

čia $\sum \delta_{lyg}$ ir $\sum b_{lyg}$ – atitinkamai lydinių sluoksnių storių ir lyginių sluoksnių plocių sumos, m ;

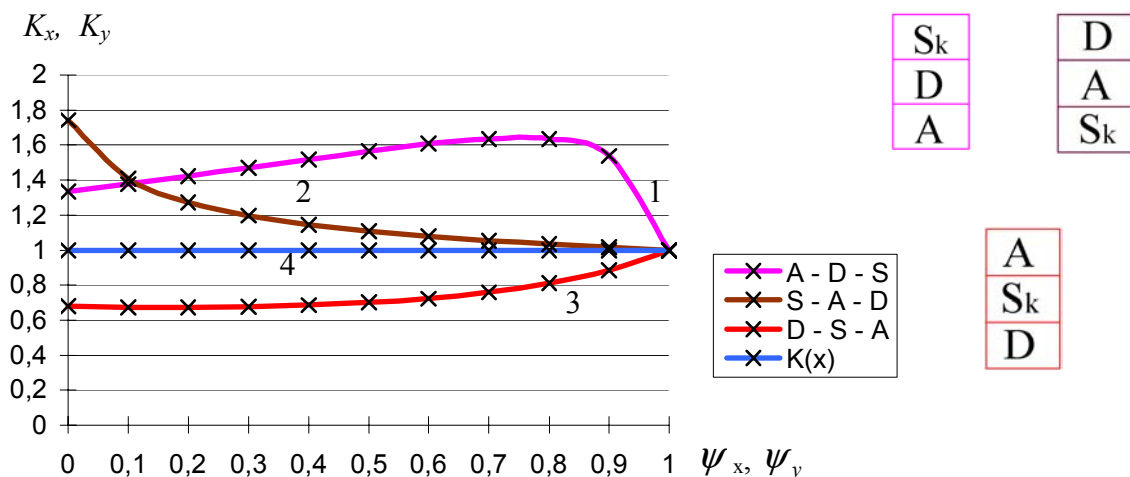
h – konstrukcijos aukštis, m ;

b – konstrukcijos plotis, m .

Taigi, nagrinėsiu tris konstrukcijas (2.1 pav. a, b, c). Visais atvejais $h = \text{const}$, $b = \text{const}$, $l = \text{const}$.

3.1.2. Neutraliųjų sluoksnių padėties kitimas priklausomai nuo sluoksnių storio

Pirmiausia norėčiau panagrinėti konstrukciją, parodytą 2.1 pav. a. Nagrinėsiu tris variantus $A - D - S_k$, $S_k - A - D$, $D - S_k - A$, kuriuose keičiau vidurinio sluoksnio storį, t.y. $\delta_2 = 0 \dots h$. Laikiau, jog išoriniai sluoksniai yra tarpusavyje lygūs. Šios konstrukcijos neutralios ašies padėties koeficientų K_x , K_y priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento yra pavaizduota 3.1 pav., o rezultatai pateikti priedo 1 lentelėje.



3.1 pav. Asimetrinių trislauksnių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficientų K_y (1 – 3 kreivės) ir K_x (4 kreivė) priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficientų ψ_y (1 – 3 kreivės) ir ψ_x (4 kreivė): 1 - ma kreivė – konstrukcija $A - D - S_k$; 2 - ra kreivė – konstrukcija $S_k - A - D$; 3 - čia kreivė – konstrukcija $D - S_k - A$; 4 - ta kreivė – konstrukcijos $A - D - S_k$, $S_k - A - D$, $D - S_k - A$

Pagal (3.1) ir (3.3) formules matyti, jog esant konstrukcijai, pavaizduotai 2.1 pav. a, neutralios ašies padėties koeficientas $K_x = 1$, t.y. geometrinė ir neutralioji ašys sutampa (4 kreivė - $K_x = f(\psi_x)$).

Kai sluoksnių storio koeficientas $\psi_y = 1$, konstrukcija visais trim variantais yra sudaryta iš vienos medžiagos, atitinkamai: $A - D - S_k$ - iš epoksidinės dervos, $S_k - A - D$ - iš anglies plastiko, $D - S_k - A$ - iš karšto kietėjimo stiklo plastiko. O šios neutralioji ašis (y_n) sutampa su skerspjūvio geometrine ašimi (y_0), tad visais atvejais, kai $\psi_y = 1$, $K_y = 1$.

Konstrukcija $A - D - S_k$ (1 kreivė). Kai $\psi_y = 0$, vadinasi turime dvisluosnę konstrukciją $A - S_k$. Kaip jau minėjau, išorinių sluoksnių storiai yra lygūs. Kadangi anglies plastiko tamprumo modulis yra didesnis nei karšto kietėjimo stiklo plastiko ($60 \cdot 10^9 \text{ Pa} > 20 \cdot 10^9 \text{ Pa}$), tai neutralioji ašis bus žemiau geometrinės ašies (anglies plastikas yra apačioje, tad ir neutralioji ašis pasislinks šio sluoksnio kryptimi), vadinasi $K_y > 1$. Atsiradus dervai, t.y., kai $\psi_y = 0,1 \dots 0,9$ (t.y. didėjant medžiagos, kuri turi mažiausią iš visų mano nagrinėjamų medžiagų tamprumo modulį, kiekiui), neutralioji ašis dar pasislenka nuo geometrinės ašies į didžiausią tamprumo modulį turintį anglies plastiko sluoksnį. Šios kreivės maksimumas, t.y. $K_y = 1,64$ yra kai $\psi_y = 0,7$. Šios kreivės minimumas, t.y. $K_y = 1$, yra kai $\psi_y = 1$.

Konstrukcija $S_k - A - D$ (2 kreivė). Kai $\psi_y = 0$, turime dvisluosnę konstrukciją $S_k - D$. Kadangi karšto kietėjimo stiklo plastiko tamprumo modulis yra didesnis nei epoksidinės dervos ($20 \cdot 10^9 > 1,6 \cdot 10^9$), tai neutralioji ašis bus žemiau geometrinės ašies ir $K_y > 1$. Atsiradus angliui, t.y.,

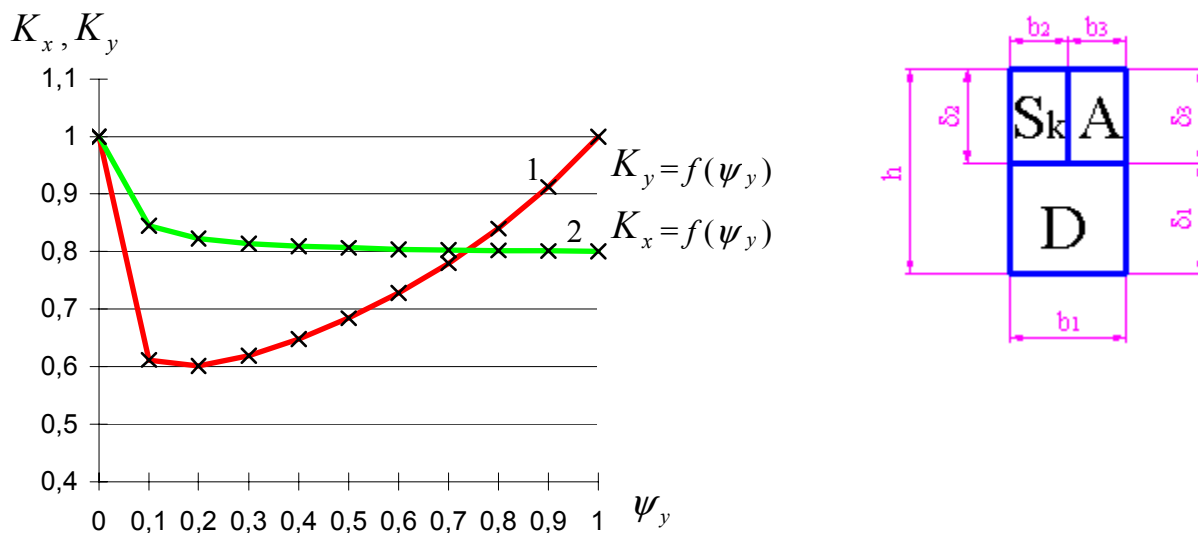
kai $\psi_y = 0,1 \dots 0,9$ (t.y. didėjant medžiagos, kuri turi didžiausią iš visų mano nagrinėjamų medžiagų tamprumo modulį, kiekiui), neutralioji ašis vis labiau artėja prie geometrinės ašies (t.y., neutralioji ašis didėjant didžiausią tamprumo modulį turinčiam anglies sluoksniui slenka link anglies sluoksniu). Šios kreivės maksimumas, t.y. $K_y = 1,742$ yra kai $\psi_y = 0$. Šios kreivės minimumas, t.y. $K_y = 1$, yra kai $\psi_y = 1$.

Esant $\psi_y = 0,11$ susikerta 1 – ma ir 2 – ra kreivės, t.y. konstrukcijų A – D – S_k ir S_k – A – D neutraliosios ašys vienodai nutolusios nuo geometrinės ašies.

Konstrukcija D – S_k – A (3 kreivė). Kai $\psi_y = 0$, turime dvisluosnę konstrukciją D - A . Kadangi anglies plastiko tamprumo modulis yra didesnis nei epoksidinės dervos ($60 \cdot 10^9 > 1,6 \cdot 10^9$), tai neutralioji ašis bus aukščiau geometrinės ašies ir $K_y < 1$ (anglies sluoksnis juk yra viršuje). Atsiradus karšto kietėjimo stiklo plastikui, t.y., kai $\psi_y = 0,1 \dots 0,9$ mažėja mūsų atveju didžiausia, o taip pat ir mažiausią tamprumo modulį turinčių medžiagų sluoksnių storiai. Mažėjant anglies plastikui neutralioji ašis artėja prie stiklo plastiko sluoksniu (kurio tamprumo modulis mūsų atveju yra vidutinis), o tuo pačiu neutralioji ašis artėja ir prie geometrinės ašies. Šios kreivės maksimumas, t.y. $K_y = 1$, yra kai $\psi_y = 1$. Šios kreivės minimumas, t.y. $K_y = 0,671$ yra kai $\psi_y = 0,2$.

Taigi, esant 2.1 pav. a parodytai konstrukcijai neutralios ašies padėties koeficientas K_x nepriklauso nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_x ir $K_x = 1$, t.y. duotai konstrukcijai neutrali ašis visuomet sutampa su geometrine ašimi. O neutralios ašies padėties koeficientas K_y priklauso nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_y . Šio koeficiento kitimas taip pat priklauso ir nuo konstrukciją sudarančių medžiagų.

Taip pat norėčiau panagrinti konstrukciją, parodytą 2.1 pav. b. Šioje konstrukcijoje nagrinėsiu atskirus atvejus, kai δ_1 kinta nuo 0 iki h. Taip pat laikau, jog $\delta_2 = \delta_3$; $b_2 = b_3 = 0,5 b_1 = 0,025$ mm. Šios konstrukcijos neutralios ašies padėties koeficientų K_x ir K_y priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_y ($\psi_x = 0,5 = \text{const}$) yra pavaizduota 3.2 pav., o rezultatai pateikti priedo 2 lentelėje.



3.2 pav. Asimetrinių dvisluoksnių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficientų K_y (1 - ma kreivė) ir K_x (2 - ra kreivė) priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_y (keičiant medžiagų sluoksnių storius) ($\psi_x = 0,5$)

3.2 paveiksle 1 – oji kreivė rodo priklausomybę $K_y = f(\psi_y)$, o 2 – oji - $K_x = f(\psi_y)$. Iš pirmosios kreivės matyti, jog kai $\psi_y = 0$ ir kai $\psi_y = 1$, tai $K_y = 1$ (šiuose taškuose yra kreivės maksimumas). T.y., abiem atvejais neutralioji ašis sutampa su skerspjuvio geometrine ašimi. Šios kreivės minimumas, t.y. $K_y = 0,6$ yra kai $\psi_y = 0,2$ (t.y., minimumas yra esant dvisluoksnei konstrukcijai (y ašies atžvilgiu), kai epoksidinės dervos sluoksnio storis yra pakankamai mažas, neutralioji ašis yra aukščiau geometrinės ašies atžvilgiu). Didėjant epoksidinės dervos sluoksnio storiui, mažėja didesnį tamprumo modulį turinčių medžiagų storiai (kurios yra viršuje), tad neutralioji ašis leidžiasi žemyn ir artėja prie geometrinės ašies.

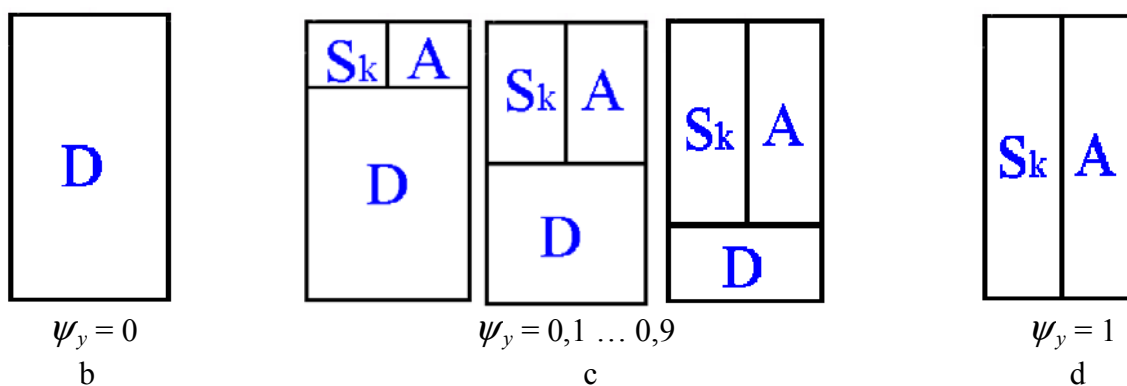
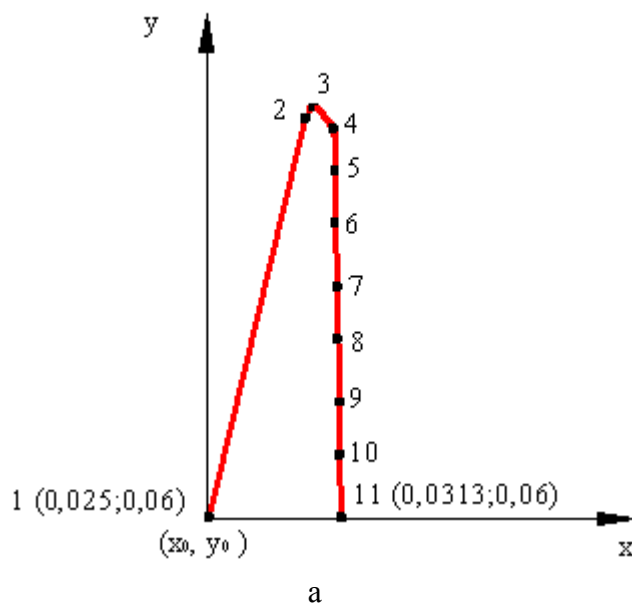
Iš antrosios kreivės matyti, jog kai $\psi_y = 0$, tai ir $K_x = 1$. T.y., kai $\psi_y = 0$, bandinys yra sudarytas tik iš epoksidinės dervos, ir sijos neutralioji ašis sutampa su skerspjuvio geometrine ašimi, vadinasi $K_x = 1$. Kai $\psi_y = 0 \dots 0,9$ jau turime dvisluoksne konstrukciją, sudarytą iš trijų medžiagų (x ašies atžvilgiu) ir neutralioji ašis tolsta nuo geometrinės ašies x_0 , nes antrojo sluoksnio (sudaryto iš anglies plastiko ir epoksidinės dervos) tamprumo modulis yra didesnis nei pirmojo (sudaryto iš stiklo plastiko ir epoksidinės dervos). Kai $\psi_y = 1$, gauname šios kreivės minimumo tašką, t.y. $K_x = 0,8$. T.y., turime dvisluoksne konstrukciją, sudarytą iš karšto kietėjimo stiklo plastiko ir anglies plastiko. Kadangi anglies plastiko tamprumo modulis yra didesnis nei karšto kietėjimo stiklo plastiko, tai neutralioji ašis yra labiausiai nutolusi nuo geometrinės ašies, tad K_x yra mažiausias.

Kai $\psi_y = 0,73$ kreivės $K_y = f(\psi_y)$ ir $K_x = f(\psi_y)$ susikerta. T.y., kai $\psi_y = 0,73$ neutralioji ašis x_n yra nutolusi nuo geometrinės ašies x_0 tokiu pat atstumu, kaip ir neutralioji ašis y_n yra nutolusi nuo geometrinės ašies y_0 .

Taigi, esant 2.1 pav. b parodytai konstrukcijai neutralios ašies padėties koeficientai K_x ir K_y priklauso nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_y . Šių koeficientų kitimas taip pat priklauso ir nuo konstrukciją sudarančių medžiagų.

Pagal Priede pateiktos 2 lentelės duomenis galima pavaizduoti kaip kito standumo centras (neutralios ašies padėtis) 2.1 pav. b pavaizduotos konstrukcijos, kintant santykinio sluoksnių storio koeficientui ψ_y ($\psi_x = 0,5 = \text{const}$) (3.3 pav.).

3.3 pav. a pateiktas 2.1 pav. b pavaizduotos konstrukcijos standumo centro kitimo grafikas. Taškas 1 – tai neutralios ašies koordinatė padėtis, kai $\psi_y = 0$, t.y. kai turime vienasluoksne konstrukciją (sluoksnis sudarytas tik iš epoksidinės dervos (3.3 pav. b)). Šiuo atveju neutralios ašies koordinatė padėtis sutampa su konstrukcijos geometrinės ašies koordinatėmis (x_0, y_0). Atsiradus sluoksniui, sudarytam iš karšto kietėjimo stiklo plastiko ir anglies plastiko standumo centro koordinatės pakyla į viršų ir pasislenka į dešinę, t.y. link didžiausią tamprumo modulį turinčio anglies plastiko (3.3 pav. a taškai 2 ir 3, $\psi_y = 0,1$ ir $0,2$). Mažėjant epoksidinės dervos sluoksniui ($\psi_y = 0,3 - 0,9$), standumo centro koordinatė kitimui įtakos turi anglies plastikas, t.y. konstrukcijos neutraliosios linijos koordinatės leidžiasi žemyn (y ašies atžvilgiu) ir slenka į dešinę pusę (x ašies atžvilgiu) (3.3 pav. a taškai 4 – 10). Kai $\psi_y = 1$ (3.3 pav. d), turime konstrukciją, sudarytą iš karšto kietėjimo stiklo plastiko ir anglies plastiko, o standumo centro koordinatės yra taške 11 (3.3 pav. a), t.y. y_n sutampa su y_0 nes y ašies atžvilgiu turime vienasluoksne konstrukciją (neutralioji ašis sutampa su geometrine ašimi), o x_n yra dešiniau nei x_0 , nes x ašies atžvilgiu turime dvisluoksne konstrukciją, ir didesnį tamprumo modulį turintis anglies plastikas yra dešinėje pusėje (neutralioji ašis slenka tolyn į dešinę pusę nuo geometrinės ašies).



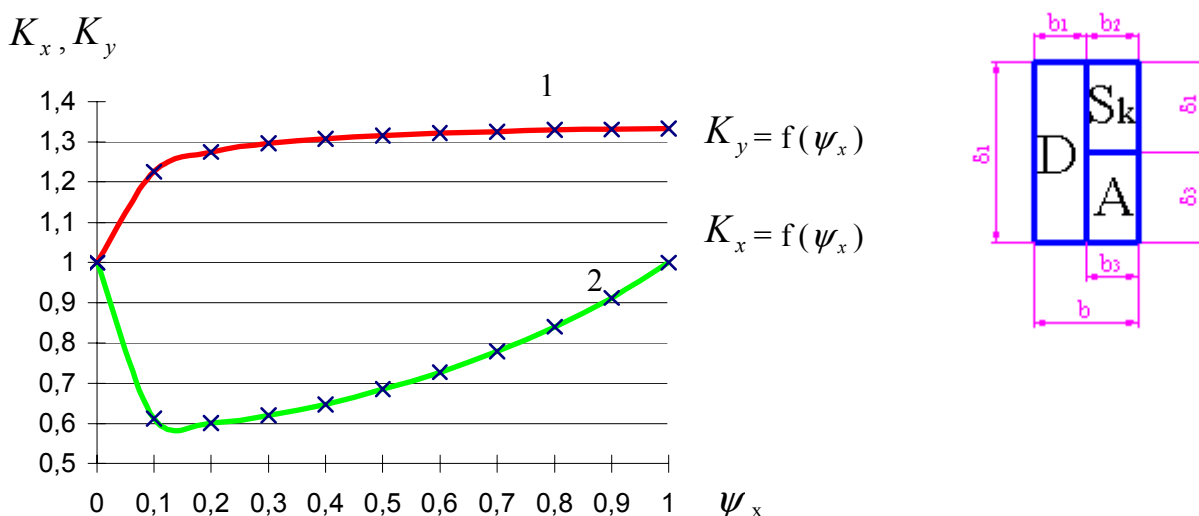
3.3 pav. a) standumo centro kitimo grafikas; b) konstrukcija, kai $\psi_y = 0$ (taškas 1); c) konstrukcija, kai $\psi_y = 0,1 \dots 0,9$ (taškai 2 – 10); d) konstrukcija, kai $\psi_y = 1$ (taškas 11)

Taip pat dar norėčiau panagrinti konstrukciją, parodytą 2.1 pav. c. Šioje konstrukcijoje nagrinėsiu atskirus atvejus, kai b_1 kinta nuo b iki 0. Taip pat laikiau, jog $\delta_2 = \delta_3 = 0,06$ mm ; $b_2 = b_3 = \text{const}$. Šios konstrukcijos neutralios ašies padėties koeficientų K_x ir K_y priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento yra pavaizduota 3.4 pav., o skaičiavimo duomenys pateikti priedo 3 lentelėje.

3.4 paveiksle 1 – oji kreivė rodo priklausomybę $K_y = f(\psi_x)$, o 2 – oji - $K_x = f(\psi_x)$ ($\psi_y = 0,5 = \text{const}$). Iš pirmosios kreivės matyti, jog kai $\psi_x = 0$, tai $K_y = 1$ (tai kreivės minimumo taškas). T.y., kai $\psi_x = 0$, bandinys yra sudarytas tik iš epoksidinės dervos, ir šios neutralioji ašis (y_n) sutampa su skerspjūvio geometrine ašimi (y_0). Kai $\psi_x = 0,1 \dots 0,9$ jau turime dvisluksnę konstrukciją, sudarytą iš trijų medžiagų (y ašies atžvilgiu) ir neutralioji ašis (y_n) leidžiasi žemyn (geometrinės y_0 ašies atžvilgiu), nes pirmojo sluoksniu tamprumo modulis yra didesnis nei antrojo. Kai $\psi_x = 1$ $K_y = 1,33$ (tai kreivės maksimumo taškas). T.y., turime dvisluksnę konstrukciją: yra karšto kietėjimo stiklo plastiko ir anglies plastiko sluoksniai. Kadangi anglies plastiko tamprumo

modulis yra didesnis nei karšto kietėjimo stiklo plastiko, tai neutralioji ašis (y_n) dar labiau tolsta nuo geometrinės ašies (y_0), t.y. slenka anglies plastiko sluoksnio link.

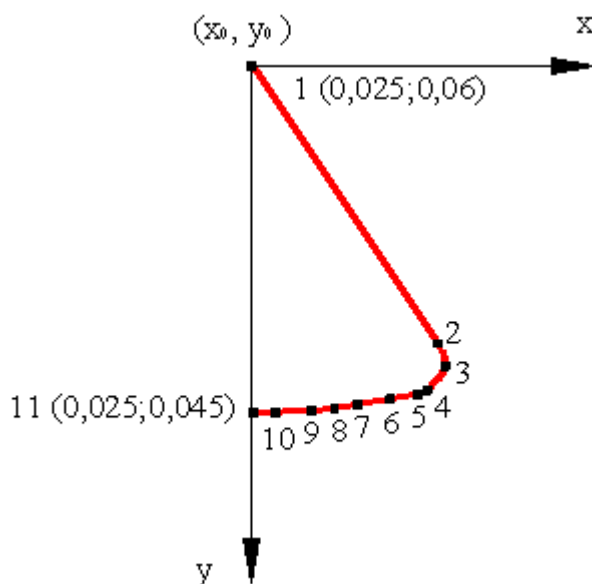
Iš antrosios kreivės matyti, jog kai $\psi_x = 0$ ir kai $\psi_x = 1$, tai $K_y = 1$, t.y., abejais atvejais sijos neutralioji ašis (x_n) sutampa su skerspjūvio geometrine ašimi (x_0). Tik kai $\psi_x = 0$, turime bandinį tik iš epoksidinės dervos sluoksnio, o kai $\psi_x = 1$, tai x ašimi taip pat turime vienasluoksnę konstrukciją (tik sudarytą iš dviejų medžiagų: stiklo plastiko ir anglies plastiko sluoksnių). Šiuose taškuose yra kreivės maksimumas. Šios kreivės minimumas, t.y. $K_x = 0,6$ yra kai $\psi_x = 0,2$ (t.y., minimumas yra esant dvisluoksnei konstrukcijai, sudarytai iš trijų medžiagų (x ašies atžvilgiu), kai atsiradus naujam sluoksniui (sudarytam iš anglies ir stiklo plastikų) neutralioji ašis x_n yra dešiniau neutraliosios ašies x_0 atžvilgiu, t.y. slenka link didesni tamprumo modulį turinčio antrojo sluoksnio. Mažėjant epoksidinės dervos sluoksnio pločiui, didėja didesni tamprumo modulį turinčių medžiagų pločiai (t.y. plėtėja antrasis sluoksnis), tad neutralioji ašis x_n slinks į kairę (nes plėtėja antrasis sluoksnis) ir artės prie geometrinės x_0 ašies.



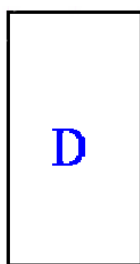
3.4 pav. Asimetrinių dvisluoksnių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficientų K_x , K_y priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_x (keičiant medžiagų pločius) ($\psi_y = 0,5$)

Taigi, esant 2.1 pav. c parodytai konstrukcijai neutralios ašies padėties koeficientai K_x ir K_y priklauso nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_x . Šių koeficientų kitimas taip pat priklauso ir nuo konstrukciją sudarančių medžiagų (t.y. nuo jų tamprumo modulių).

Pagal priede pateiktos 3 lentelės duomenis galima pavaizduoti kaip kito standumo centras (neutralios ašies padėtis) 2.1 pav. c pavaizduotos konstrukcijos, kintant santykinio sluoksnių storio koeficientui ψ_x ($\psi_y = 0,5 = \text{const}$) (3.5 pav.).

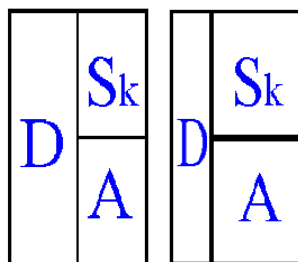


a



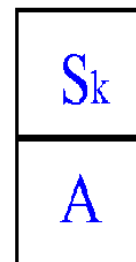
$$\psi_x = 0$$

b



$$\psi_x = 0,1 \dots 0,9$$

c



$$\psi_x = 1$$

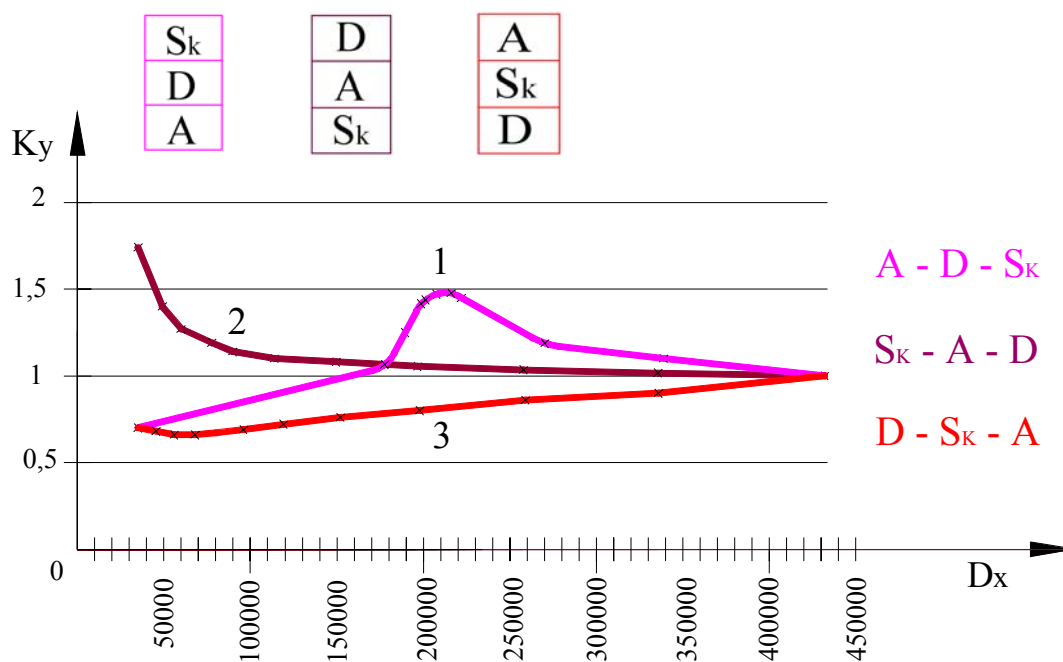
d

3.5 pav. a) standumo centro kitimo grafikas; b) konstrukcija, kai $\psi_x = 0$ (taškas 1); c) konstrukcija, kai $\psi_x = 0,1 \dots 0,9$ (taškai 2 - 10); d) konstrukcija, kai $\psi_x = 1$ (taškas 11)

3.5 pav. a pateiktas 2.1 pav. c pavaizduotos konstrukcijos standumo centro kitimo grafikas. Kai $\psi_x = 0$, turime vienasluoksnę konstrukciją (sluoksnis sudarytas tik iš epoksidinės dervos (3.5 pav. b)). Šiuo atveju neutralios ašies koordinatė padėtis sutampa su konstrukcijos geometrinės ašies koordinatėmis (x_0, y_0) (taškas 1). Atsiradus sluoksniui, sudarytam iš karšto kietėjimo stiklo plastiko ir anglies plastiko standumo centro koordinatės leidžiasi žemyn ir pasislenka į dešinę, t.y. link didžiausią tamprumo modulį turinčio anglies plastiko (3.5 pav. a taškai 2 ir 3; $\psi_x = 0,1$ ir $0,2$). Mažėjant epoksidinės dervos sluoksniui ($\psi_x = 0,3 - 0,9$), standumo centro koordinatė kitimui įtakos turi anglies plastikas, t.y. konstrukcijos neutraliosios linijos koordinatės leidžiasi žemyn (y ašies atžvilgiu) ir slenka į kairę pusę (x ašies atžvilgiu) (3.5 pav. a taškai 4 – 10). Kai $\psi_x = 1$ turime konstrukciją, sudarytą iš karšto kietėjimo stiklo plastiko ir anglies plastiko, o standumo centro koordinatės yra taške 11 (3.5 pav. a), t.y. x_n sutampa su x_0 nes x ašies atžvilgiu turime vienasluoksnę konstrukciją (neutralioji ašis sutampa su geometrine ašimi), o y_n yra žemiau nei y_0 , nes y ašies atžvilgiu turime dvisluoksnę konstrukciją, ir didesnį tamprumo modulį turintis anglies plastikas yra apačioje (neutralioji ašis slenka žemyn į kairę pusę nuo geometrinės ašies).

3.1.3. Neutraliųjų sluoksnių padėties kitimas priklausomai nuo sijos standumo

Taip pat norėčiau panagrinėti neutraliojo sluoksnio padėties priklausomybę nuo sijos standumo. 3.6 pav. parodyta trisluoksnių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybė nuo standumo D_x : 1 - oji kreivė – konstrukcija A – D – S_k , 2 - oji kreivė – konstrukcija S_k – A – D, 3 - ioji kreivė – konstrukcija D – S_k – A. Šioms konstrukcijoms bendra tai, kad visose trijose vienodai kinta tų pačių medžiagų sluoksnių storiai (anglies plastiko sluoksnis kinta nuo 0 iki h). Skaičiavimo rezultatai pateikti priedo 4 lentelėje.



3.6 pav. Trisluoksnių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybė nuo standumo D_x

Iš 1 – osios kreivės matyti, jog konstrukcijos A – D – S_k mažiausias standumas $D_x = 35440 \text{ Nm}^2$ yra, kai $K_y = 0,7$ t.y. šiuo atveju turime tik iš epoksidinės dervos ir stiklo plastiko sudarytą konstrukciją. Atsiradus ir didėjant anglies plastiko sluoksnio storiui (tada ψ mažėja), didėjant K_y didėja ir konstrukcijos standumas D_x . Esant didžiausiam neutralios ašies padėties koeficientui, t.y. $K_y = 1,46$ standumas $D_x = 215101 \text{ Nm}^2$. Tai yra, kai anglies plastiko sluoksnio storis yra pakankamai didelis ($\delta = 72 \text{ mm}$). Dar labiau didėjant šiam sluoksnio storiui, standumui ir neutralios ašies padėties koeficientui įtakos turi anglies plastiko sluoksnio storio didėjimas, o stiklo plastiko ir epoksidinės dervos sluoksnių storiai mažėja, tad ir jų įtaka vis mažesnė, t.y. mažėjant neutralios ašies padėties koeficientui K_y , standumas D_x didėja. Didžiausias šios konstrukcijos standumas t.y. $D_x = 432000 \text{ Nm}^2$ bus, kai $K_y = 1$. Tuomet turėsime vienasluoksnę konstrukciją, sudarytą tik iš anglies plastiko.

Iš 2 – osios kreivės matyti, jog konstrukcijos S_k – A – D mažiausias standumas taip pat bus $D_x = 35440 \text{ Nm}^2$, tik jau kai $K_y = 1,7$ (t.y. kai turėsime dvisluoksnę konstrukciją sudarytą iš epoksidinės dervos ir stiklo plastiko medžiagų). Palyginus 1 – mos ir 2 – ros kreivių konstrukcijas, matome, jog standumas $D_x = 35440 \text{ Nm}^2$ esant dvisluoksnei konstrukcijai, sudarytai iš epoksidinės

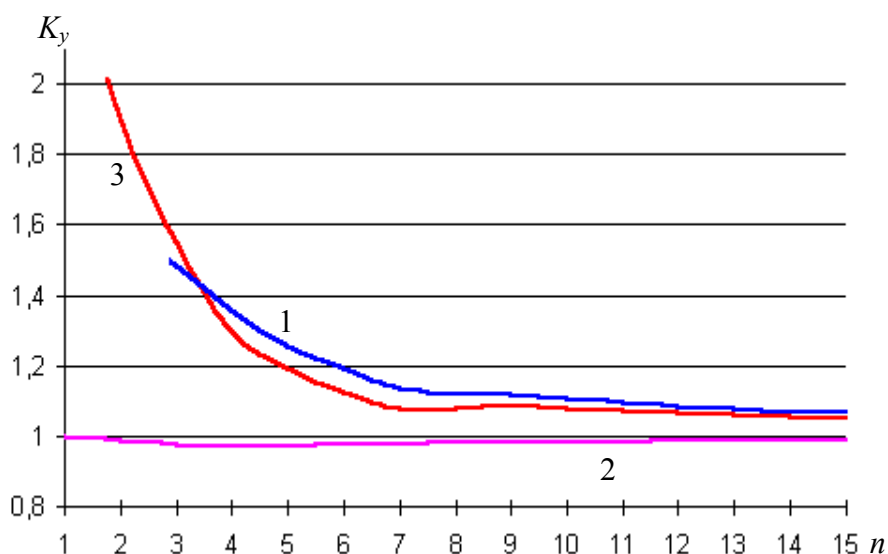
dervos ir stiklo plastiko medžiagų, tačiau nesvarbu kaip tos medžiagos išdėstytos: nesvarbu kuri medžiaga yra viršutiniame, kuri apatiniame sluoksnyje. Atsiradus ir didėjant anglies plastiko sluoksnio storiui (tada ψ didėja), mažėjant K_y didėja konstrukcijos standumas D_x . Didžiausias šios konstrukcijos standumas t.y. $D_x = 432000 \text{ Nm}^2$ bus, kai $K_y = 1$ (t.y. esant vienasluoksnei konstrukcijai, sudarytai tik iš anglies plastiko medžiagos).

Iš 3 - čios kreivės matyti, jog konstrukcijos D – S_k – A mažiausias standumas, t.y. $D_x = 35440 \text{ Nm}^2$ bus, kai $K_y = 1,7$ (t.y. esant analogiškai 2 - rai kreivei). Didėjant anglies plastiko sluoksnio storiui (tada ψ mažėja), didėjant K_y taip pat didėja ir konstrukcijos standumas D_x . Didžiausias standumas t.y. $D_x = 432000 \text{ Nm}^2$ bus, kai $K_y = 1$ (t.y. esant vienasluoksnei konstrukcijai).

Tokiu būdu galima padaryti išvadą, jog tiesioginio ryšio tarp sluoksnio storio koeficiento K_y ir standumo D nėra, nes tas priklausys ir nuo konstrukcijos tipo, t.y. medžiagos išdėstymo konstrukcijoje.

3.1.4. Neutraliųjų sluoksnių padėties kitimas priklausomai nuo sluoksnių skaičiaus

2.1 pav. a parodyto bandinio neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybės nuo sluoksnių skaičiaus n yra parodytos 3.7 pav., 3.9 pav., 3.10 pav. (bandinio forma tokia pat, tik skiriasi tarpusavio medžiagų išdėstymas). Skaičiavimo rezultatai pateikti priedo 5 lentelėje.

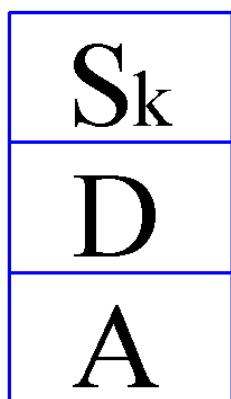


3.7 pav. Asimetrinių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n (konstrukcija A – D – S_k – ...): 1 – m ; m ; m , 2 – $m + 1$; m ; m , 3 – $m + 1$; $m + 1$; m (m – vienos medžiagos sluoksnių skaičius)

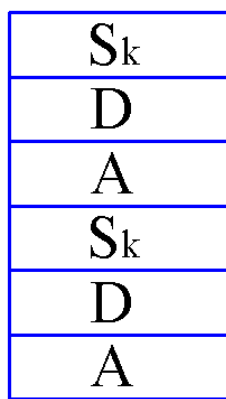
3.7 pav. pateikta 2.1 pav. a pavaizduotos konstrukcijos A – D – S_k – ... neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n . 1 – oje kreivėje pateikta šių parametų priklausomybė, kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis skirtingų medžiagų sluoksnių, t.y., kiek yra karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksnių, tiek pat yra epoksidinės dervos sluoksnių, tiek pat ir anglies plastiko sluoksnių. 2 – oje kreivėje pateikta šių parametų priklausomybė, kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis epoksidinės dervos ir karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksnių (m) ir vienu daugiau anglies plastiko sluoksniu ($m + 1$). 3 – čioje kreivėje pateikta neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybės nuo konstrukcinio

elemento sluoksnių skaičiaus n , kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis epoksidinės dervos ir anglies sluoksnių ($m + 1$) ir vienu mažiau karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksniu (m).

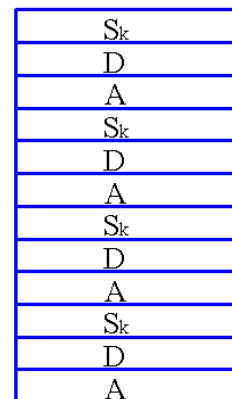
Esant vienodam konstrukciją sudarančių medžiagų sluoksnių skaičiui (1 kreivė), tokios konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra anglies ir karšto kietėjimo stiklo plastiko (3.8 pav. a). Kadangi anglies plastiko tamprumo modulis yra didesnis, tai jis ir turi didesnę reikšmę koeficiento K_y priklausomybei (esant tokiai konstrukcijai, neutralioji ašis visada yra žemiau geometrinės ašies, tad koeficientas K_y yra visada daugiau už 1).



n = 3



n = 6

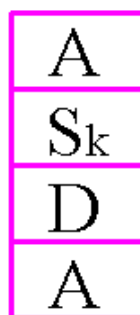


n = 9

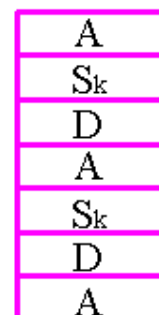
a



n = 1

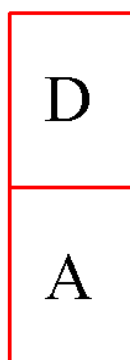


n = 4

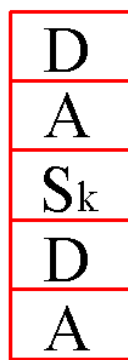


n = 7

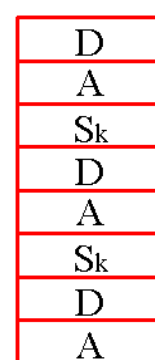
b



n = 2



n = 5



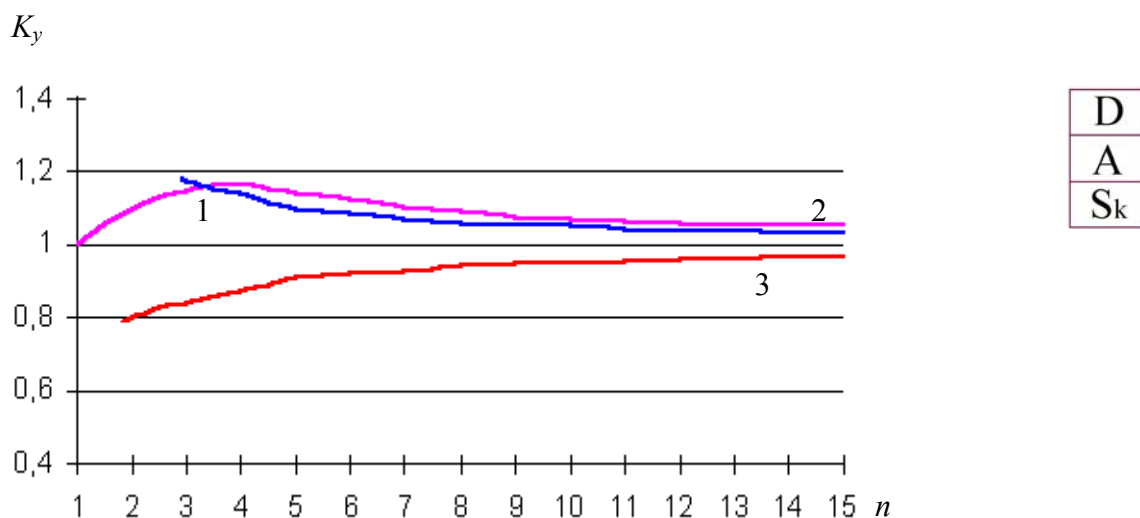
n = 8

c

3.8 pav. Konstrukcijos (priklausomai nuo sluoksnių skaičiaus)

Esant konstrukcijoms $A - D - S_k - A$, $A - D - S_k - A - D - S_k - A$ ir t.t., tai yra kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis epoksidinės dervos ir anglies plastiko sluoksnių ir vienu daugiau karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksnių (2 kreivė), tai konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra didžiausią tamprumo modulį turintis anglies plastikas (3.8 pav, b). Jis ir turi didžiausią įtaką. Tad šiuo atveju neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybė nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n yra beveik tiesė, t.y. konstrukcinių elementų neutralioji ašis beveik sutampa su skerspjūvio geometrine ašimi.

Kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis epoksidinės dervos ir anglies plastiko sluoksnių ir vienu mažiau karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksniu (3 kreivė), tai tokios konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra anglies ir dervos plastiko (3.8 pav, c), ir analogiškai 1 kreivės paaiškinimui koeficientas K_y yra visada daugiau už 1.



3.9 pav. Asimetrinių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n (konstrukcija $S_k - A - D - \dots$): 1 – m ; m ; m , 2 – $m + 1$; m ; m , 3 – $m + 1$; $m + 1$; m (m – vienos medžiagos sluoksnių skaičius)

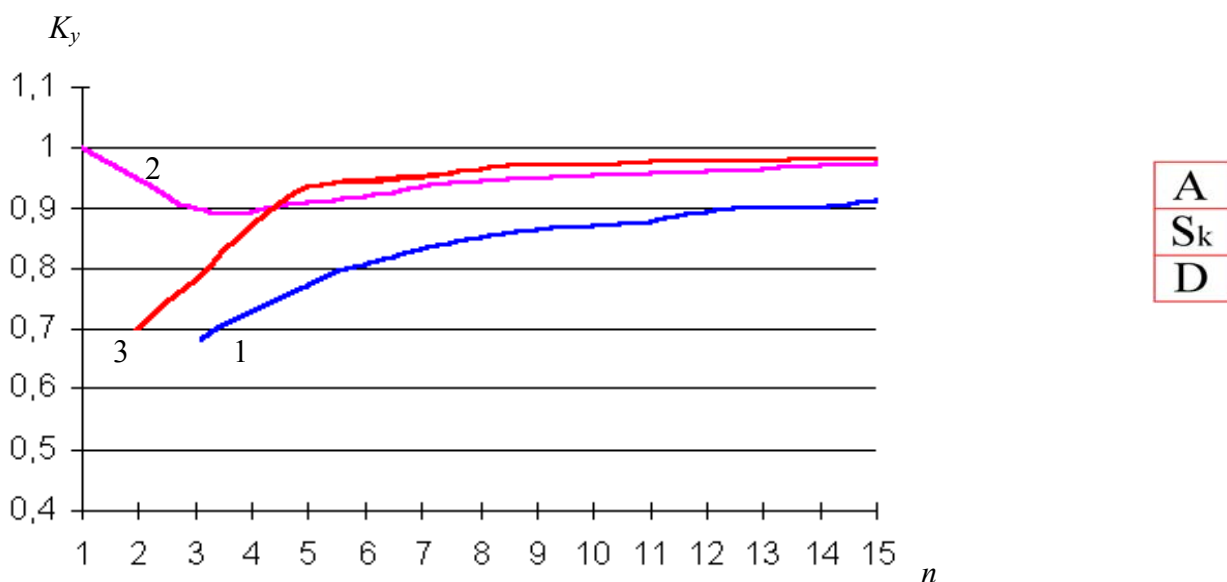
3.9 pav. pateikta 2.1 pav. a pavaizduotos konstrukcijos $S_k - A - D - \dots$ neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n . 1 – oje kreivėje pateikta šių parametų priklausomybė, kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis skirtingų medžiagų sluoksnių, t.y., yra vienodas kiekis karšto kietėjimo stiklo plastiko, epoksidinės dervos ir anglies plastiko sluoksnių. 2 – oje kreivėje pateikta šių parametų priklausomybė, kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis dervos ir anglies plastiko sluoksnių (m) ir vienu daugiau karšto kietėjimo stiklo plastiko ($m + 1$). 3 – čioje kreivėje pateikta neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n , kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis karšto kietėjimo stiklo plastiko ir anglies plastiko sluoksnių ($m + 1$) ir vienu mažiau epoksidinės dervos sluoksniu (m).

Esant vienodam konstrukciją sudarančių medžiagų sluoksnių skaičiui (1 kreivė), tokios konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra dervos ir karšto kietėjimo stiklo plastiko. Kadangi karšto kietėjimo stiklo plastiko tamprumo modulis yra didesnis, tai jis ir turi didesnę reikšmę koeficiento K_y priklausomybei (kadangi karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksnis yra apačioje, neutralioji ašis visada yra žemiau geometrinės ašies, tad koeficientas K_y yra visada daugiau už 1).

Esant konstrukcijoms, kai jas sudaro vienodas kiekis dervos ir anglies plastiko sluoksnių ir vienu daugiau karšto kietėjimo stiklo plastiko (2 kreivė), tai konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra karšto kietėjimo stiklo plastikas. Kai šioje konstrukcijoje yra tik vienas karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksnis, tai dervos ir anglies plastiko sluoksnių nebus ir turėsime viensluoksnę konstrukciją, tad $K_y = 1$. Didėjant karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksniui, tuo pačiu proporcingai didėja ir dervos bei anglies plastiko sluoksniai. Kadangi išoriniai sluoksniai yra sudaryti iš karšto kietėjimo stiklo plastiko, tai į juos galime nekreipti dėmesio (galioja pusiausvyra) ir pavyzdžiui, jei turime konstrukciją $S_k - A - D - S_k$ ir atmetus vienodus išorinius sluoksnius, gauname, jog turime dvisluoksnę konstrukciją; kadangi didesnę tamprumo modulį turintis anglies plastikas yra žemiau nei epoksidinės dervos plastikas, tai neutralioji ašis yra žemiau geometrinės ašies, o koeficientas K_y yra daugiau už 1.

Kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis karšto kietėjimo stiklo plastiko ir anglies plastiko sluoksnių ir vienu mažiau epoksidinės dervos sluoksniu (3 kreivė), tai tokios konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra anglies ir stiklo plastiko. Kadangi didesnę tamprumo modulį turintis anglies plastikas yra viršuje, tai neutralioji ašis yra aukščiau geometrinės ašies ir koeficientas K_y yra mažiau už 1.

3.10 pav. pateikta 2.1 pav. a pavaizduotos konstrukcijos $D - S_k - A - \dots$ neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n . 1 – oje kreivėje pateikta šių parametų priklausomybė, kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis skirtingų medžiagų sluoksnių, 2 – oje kreivėje pateikta šių parametų priklausomybė, kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis anglies ir karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksniai (m) ir vienu daugiau epoksidinės dervos sluoksniu ($m + 1$). 3 – čioje - kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis karšto kietėjimo stiklo plastiko ir dervos sluoksnių ($m + 1$) ir vienu mažiau anglies sluoksniu (m).



3.10 pav. Asimetrinių konstrukcinių elementų neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n (konstrukcija $D - S_k - A - \dots$): 1 – $m; m; m$, 2 – $m + 1; m; m$, 3 – $m + 1; m + 1; m$ (m – vienos medžiagos sluoksnių skaičius)

Esant vienodam konstrukciją sudarančių medžiagų sluoksnių skaičiui (1 kreivė), tokios konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra dervos ir anglies plastiko. Kadangi anglies plastiko tamprumo modulis yra didesnis ir anglies sluoksnis yra viršuje, tai neutralioji ašis bus aukščiau geometrinės ašies, tad koeficientas K_y yra mažiau už 1.

Esant konstrukcijoms, kai jas sudaro vienodas kiekis anglies ir karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksniai ir vienu daugiau dervos sluoksniu (2 kreivė), tai konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra epoksidinės dervos plastikas. Kai šioje konstrukcijoje yra tik epoksidinės dervos plastiko sluoksnis, tai stiklo ir anglies plastiko sluoksnių nebus ir turėsime viensluksnę konstrukciją, t. y., $K_y = 1$. Didėjant dervos plastiko sluoksniui, tuo pačiu didėja ir stiklo bei anglies plastiko sluoksniai. Jei nekreiptumėme dėmesio į išorinius sluoksnius (tokiu atveju pusiausvyra vis tiek yra išlaikoma) ir pavyzdžiui, jei turime konstrukciją $D - S_k - A - D$ ir atmetus vienodus išorinius sluoksnius, gauname, jog turime dvisluksnę konstrukciją; kadangi didesnę tamprumo modulį turintis anglies plastikas yra aukščiau nei stiklo plastikas, tai neutralioji ašis yra aukščiau geometrinės ašies, o koeficientas K_y yra mažiau už 1.

Kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis karšto kietėjimo stiklo plastiko ir dervos sluoksnių ir vienu mažiau anglies plastiko sluoksniu (3 kreivė), tai tokios konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra dervos ir stiklo plastiko. Kadangi didesnę tamprumo modulį turintis stiklo plastikas yra viršuje, tai neutralioji ašis yra aukščiau geometrinės ašies, o koeficientas K_y yra mažiau už 1.

Iš 3.7 pav. matyti, jog kai didžiausią tamprumo modulį turintis anglies plastikas yra išoriniame apatiniame sluoksnyje, tai neutralios ašies padėties koeficiento K_y beveik visos reikšmės yra daugiau už 1 (t.y. geometrinė ašis yra aukščiau nei neutralioji ašis). Kai didžiausią tamprumo modulį turintis anglies plastikas yra viduriniuose sluoksniuose, tai neutralios ašies padėties koeficiento K_y reikšmės svyruoja nuo 0,96 iki 1,2 (3.9 pav.) (t.y. yra truputį daugiau ar mažiau už 1). Kai didžiausią tamprumo modulį turintis anglies plastikas yra išoriniame viršutiniame sluoksnyje, tai neutralios ašies padėties koeficiento K_y reikšmės yra mažiau už 1 (3.10 pav.) (t.y. geometrinė ašis yra žemiau nei neutralioji ašis).

Taigi, iš visų šių kreivių (3.7 pav., 3.9 pav., 3.10 pav.) matyti, jog nesvarbu koks medžiagų išsidėstymas ir kiek yra sluoksnių, visų konstrukcijų neutralios ašies padėties koeficiento K_y priklausomybės artėja prie tiesės $K_y = 1$, t.y., konstrukcinių elementų neutralioji ašis artėja prie skerspjūvio geometrinės ašies.

Iš pateiktų grafikų matyti, jog neutralios linijos padėtis y_n priklauso nuo konstrukciją sudarančių medžiagų sluoksnio parametro ψ (3.1 pav., 3.2 pav., 3.4 pav.) ir nuo sluoksnių skaičiaus n (3.7 pav., 3.9 pav., 3.10 pav.).

3.2. Daugiasluksnės sijos standumo tyrimas

3.2.1. Sluoksnių storio įtaka

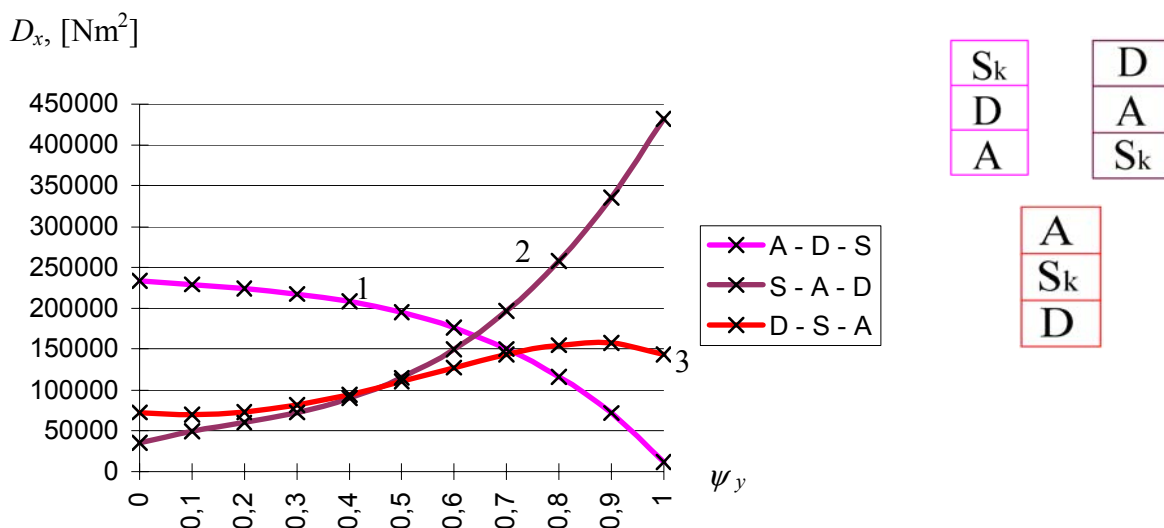
3.11 pav. pavaizduota sijos standumo D priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ esant 2.1 pav. a parodytai konstrukcijos formai (skiriasi tik medžiagų išdėstymas). Skaičiavimo rezultatai pateikti priedo 6 lentelėje.

Konstrukcija $A - D - S_k$ (1 kreivė). Kai $\psi_y = 0$ turime dvisluksnę konstrukciją $A - S_k$. Atsiradus dervai ir didėjant jos kiekiui, t.y., kai $\psi_y = 0,1 \dots 0,9$ standumas mažėja, nes iš visų naudojamų medžiagų dervos tamprumo modulis yra mažiausias. Kai sluoksnių storio koeficientas $\psi_y = 1$, konstrukcija yra sudaryta iš vienos medžiagos - iš epoksidinės dervos, tad šios kreivės

kreivės minimumas, t.y. $D_x = 11520 \text{ Nm}^2$ yra kai $\psi = 1$. Šios kreivės maksimumas, t.y. $D_x = 234000 \text{ Nm}^2$ yra kai $\psi = 0$.

Konstrukcija $S_k - A - D$ (2 kreivė). Kai $\psi_y = 0$, turime dvisluosnę konstrukciją $S_k - D$. Atsiradus angliai, t.y., kai $\psi_y = 0,1 \dots 0,9$ konstrukcijos standumas didėja, nes anglies tamprumo modulis yra didžiausias. O kai $\psi_y = 1$, turime vienasluoksnę konstrukciją, kuri sudaryta iš anglies plastiko, tad ir šios kreivės maksimumas, t.y. $D_x = 432000 \text{ Nm}^2$ yra kai $\psi_y = 1$. Šios kreivės minimumas, t.y. $D_x = 35440 \text{ Nm}^2$, yra kai $\psi_y = 0$.

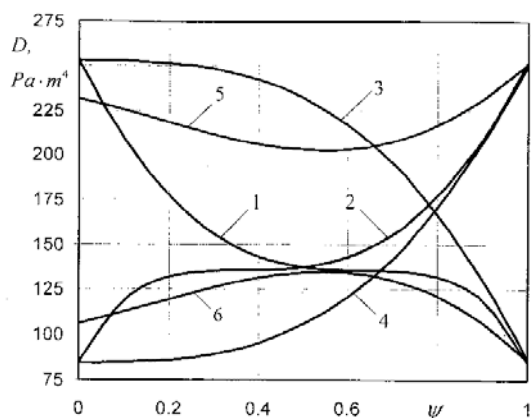
Konstrukcija $D - S_k - A$ (3 kreivė). Kai $\psi_y = 0$, turime dvisluosnę konstrukciją $D - A$. Atsiradus karšto kietėjimo stiklo plastikui, t.y., kai $\psi_y = 0,1 \dots 0,9$ standumas didėja, tačiau ne taip "žaibiškai" kaip 2 kreivėje. Taip yra todėl, kad stiklo plastiko tamprumo modulis yra vidutinis palyginus su kitų dviejų naudojamų medžiagų tamprumo moduliais. Ir nors didėja vidutinį tamprumo modulį turinčio stiklo plastiko ir mažėja mažiausią tamprumo modulį turinčios dervos, tačiau mažėja ir didžiausią tamprumo modulį turinčio anglies plastiko. Šios kreivės maksimumas, t.y. $D_x = 157188 \text{ Nm}^2$, yra kai $\psi_y = 0,9$. Šios kreivės minimumas, t.y. $D_x = 69844 \text{ Nm}^2$ yra kai $\psi_y = 0,2$.



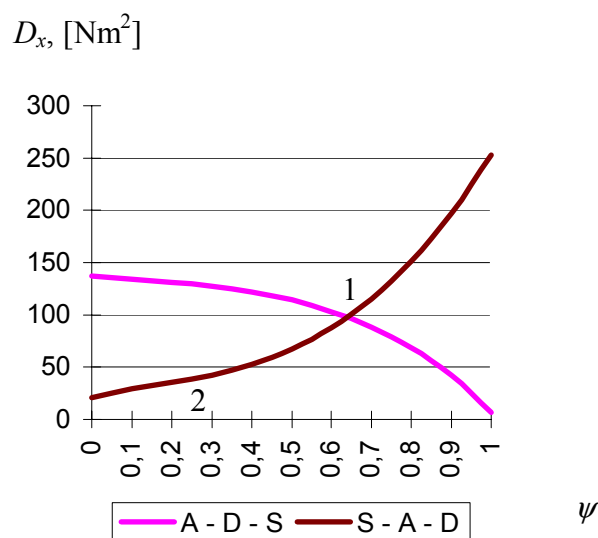
3.11 pav. Asimetrinių trisluoksnių konstrukcinių elementų standumo D_x priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_y

Kaip matyti iš 3.11 pav. pavaizduotų kreivių, standumas labai pakinta, kai $\psi_y = 0,5 \dots 1$. Pavyzdžiui, esant konstrukcijai $A - D - S_k$ (1 kreivė), standumas šiame intervale sumažėjo net 82%; esant konstrukcijai $S_k - A - D$ (2 kreivė), standumas šiame intervale padidėjo net 80%; o esant konstrukcijai $D - S_k - A$ (3 kreivė), standumas padidėjo 54% (tik $\psi_y = 0,5 \dots 0,9$).

Tuo pačiu norėčiau palyginti [1] pateiktus įvairių grupių sluoksniuotų konstrukcinių elementų, suformuotų iš anglies A ir stiklo S_k plastikų (3.12 pav.) ir mano naudotų konstrukcijų $A - D - S_k$ ir $S_k - A - D$ (3.13 pav.) standumo D_y priklausomybės nuo parametro ψ_y grafikais. 3.13 pav. yra pateikta konstrukcijų $A - D - S_k$ ir $S_k - A - D$ standumo D_y priklausomybės nuo parametro ψ_y esant tokiems pat konstrukcijos parametrų kaip ir [8], t.y. $b = 15 \text{ mm}$, $h = 15 \text{ mm}$.



3.12 pav. Įvairių grupių sluoksniuotų konstrukcinių elementų, suformuotų iš anglies A ir stiklo S_k plastikų, standumo D priklausomybės nuo santykinio storio parametro ψ : 1, 2 – asimetrinėms 2-jų sluoksnių konstrukcijoms; 3, 4 – simetrinėms pirmos grupės 3-jų sluoksnių tiesioginei ir atvirkštinei konstrukcijoms; 5, 6 – simetrinėms antros grupės 5-kių sluoksnių tiesioginei ir atvirkštinei konstrukcijoms

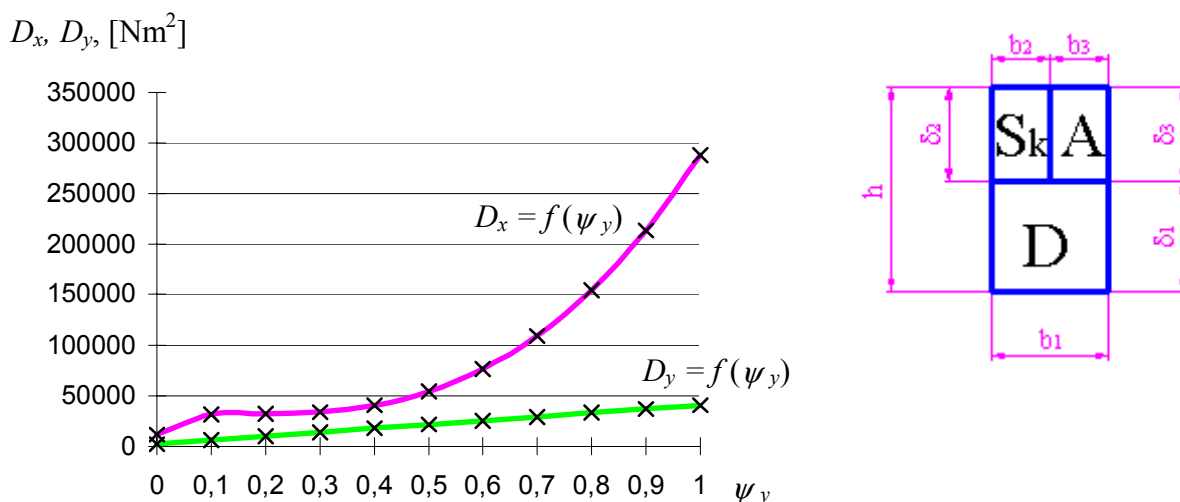


3.13 pav. Asimetrinių trisluksnių konstrukcinių elementų standumo D priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_y

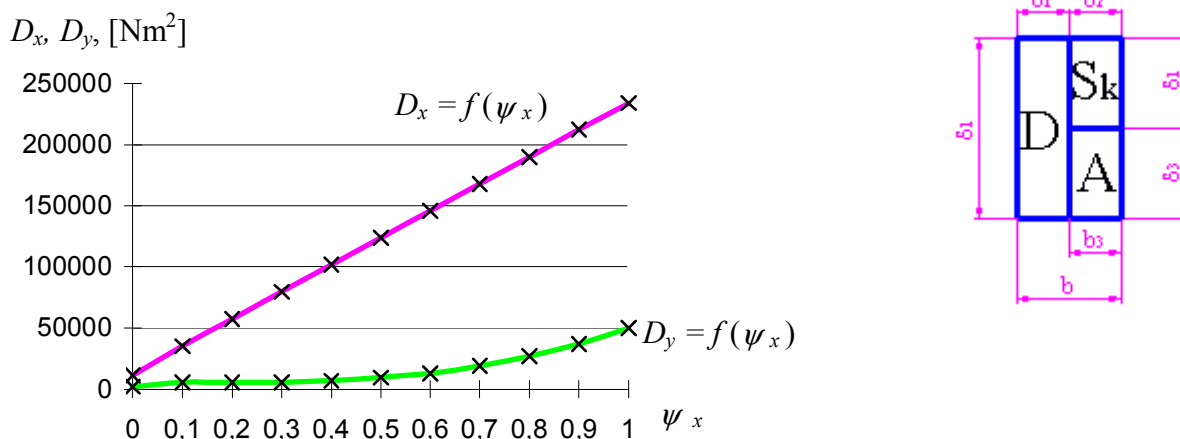
Pagal 3.12 pav. pateiktą 3 – čią kreivę ir 3.13 pav. pateiktą 1 – mą kreivę matome, jog ir esant simetrinei pirmos grupės 3-jų sluoksnių tiesioginei ($E_1 > E_2$), ir asimetrinei trijų sluoksnių ($A - D - S_k$) konstrukcijai, kurios $E_1 > E_2$, $E_2 < E_3$, didėjant santykinio sluoksnių storio koeficientui ψ_y , standumas mažėja. O pagal 3.12 pav. pateiktą 4 – tą kreivę ir 3.13 pav. pateiktą 2 – rą kreivę matome, jog ir esant simetrinei pirmos grupės 3-jų sluoksnių atvirkštinei ($E_1 < E_2$), ir asimetrinei trijų sluoksnių ($S_k - A - D$) konstrukcijai, kurios $E_1 < E_2$, $E_2 > E_3$, didėjant santykinio sluoksnių storio koeficientui ψ_y , standumas didėja.

Iš asimetrinių ir simetrinių daugiasluoksnių sijų standumų analizės matyti, jog jėginėse konstrukcijose netikslinga taikyti asimetrines konstrukcijas, nes esant tom pačiom santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_y reikšmėms, tai pačiai konstrukcijos sąlyginei kainai kaip ir simetrinėse konstrukcijose, negalima gauti analogiško standumo. Taip pat geriau yra naudoti asimetrines 2-jų sluoksnių konstrukcijas (3.12 pav. 1, 2 kreivės), negu asimetrines 3-jų sluoksnių konstrukcijas (3.13 pav. 1, 2 kreivės). Tačiau jei konstrukcijos $S_k - A - D$ $\psi_y = 0,9 \dots 1$ (3.13 pav. 2 – ra kreivė), tai ją naudoti yra žymiai tikslingiau, negu simetrinę pirmos grupės 3-jų sluoksnių atvirkštinę konstrukciją $S_k - A - S_k$ (3.12 pav. 4 – ta kreivė), nes abiem atvejais standumas yra $D_x = 200 \dots 250 \text{ Nm}^2$, o konstrukcijos $S_k - A - D$ savikaina yra mažesnė, nes karšto kietėjimo stiklo plastikas yra pakeičiamas epoksidine derva.

3.14 pav. pavaizduota sijos standumo D_x, D_y priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_y ($\psi_x = 0,5$) esant 2.1 pav. b parodytai konstrukcijos formai, t.y., keičiant konstrukciją sudarančių medžiagų sluoksnių aukščius (skaičiavimo rezultatai pateikti priedo 7 lentelėje). Taigi, šiuo atveju standumas D_x ir pagal x ašį ir pagal y ašį. Kreivė $D_x = f(\psi_y)$ intervale $\psi_y = 0 \dots 0,5$ padidėja nedaug, o jau intervale $\psi_y = 0,5 \dots 1$ padidėja net 85%. Šios kreivės maksimumas, t.y. $D_x = 288000 \text{ Nm}^2$, yra kai $\psi_y = 1$, o minimumas, t.y. $D_x = 11520 \text{ Nm}^2$ yra kai $\psi_y = 0$. Priklausomybė $D_y = f(\psi_y)$ yra atvaizduota tiese, t.y., standumas, didėjant santykinio sluoksnių storio koeficientui ψ_y , didėja proporcingai. Šios tiesės maksimumas, t.y. $D_y = 40625 \text{ Nm}^2$, yra kai $\psi_y = 1$, o minimumas, t.y. $D_y = 11520 \text{ Nm}^2$ yra kai $\psi_y = 0$.



3.14 pav. Konstrukcinių elementų standumo D_x, D_y priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_y ($\psi_x = 0,5 = \text{const}$)



3.15 pav. Konstrukcinių elementų standumo D_x, D_y priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_x ($\psi_y = 0,5 = \text{const}$)

3.15 pav. pavaizduota sijos standumo D_x, D_y priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ_x ($\psi_y = 0,5$), esant 2.1 pav. c parodytai konstrukcijos formai, t.y., keičiant konstrukciją sudarančių medžiagų sluoksnių pločius (skaičiavimo rezultatai pateikti priedo 8 lentelėje). Kreivė $D_y = f(\psi_x)$ intervale $\psi_x = 0 \dots 0,5$ padidėja nedaug, o jau intervale $\psi_x = 0,5 \dots 1$ padidėja net 85%. Šios kreivės maksimumas, t.y. $D_y = 50000 \text{ Nm}^2$, yra kai $\psi_x = 1$, o minimumas, t.y. $D_y = 2000 \text{ Nm}^2$ yra kai $\psi_x = 0$. Priklausomybė $D_x = f(\psi_x)$ yra atvaizduota tiese, t.y., standumas didėja proporcingai. Šios tiesės maksimumas, t.y. $D_x = 234000 \text{ Nm}^2$, yra kai $\psi_x = 1$, o minimumas, t.y. $D_x = 11520 \text{ Nm}^2$ yra kai $\psi_x = 0$.

Pagal 3.11 pav. pateiktus grafikus matome, jog geriausia būtų naudoti konstrukciją A – D – S_k (1 kreivė), kai $\psi = 0,64$ ($D_x = 170000 \text{ Nm}^2$). Nors konstrukcijos S_k – A – D standumas taip pat $D_x = 170000 \text{ Nm}^2$, kai $\psi = 0,64$ (2 kreivė), tačiau jos neapsimoka naudoti ekonominiu požiūriu, t.y. konstrukcijos A – D – S_k yra mažesnė savikaina, nes čia yra didžiausias dervos sluoksnio storis.

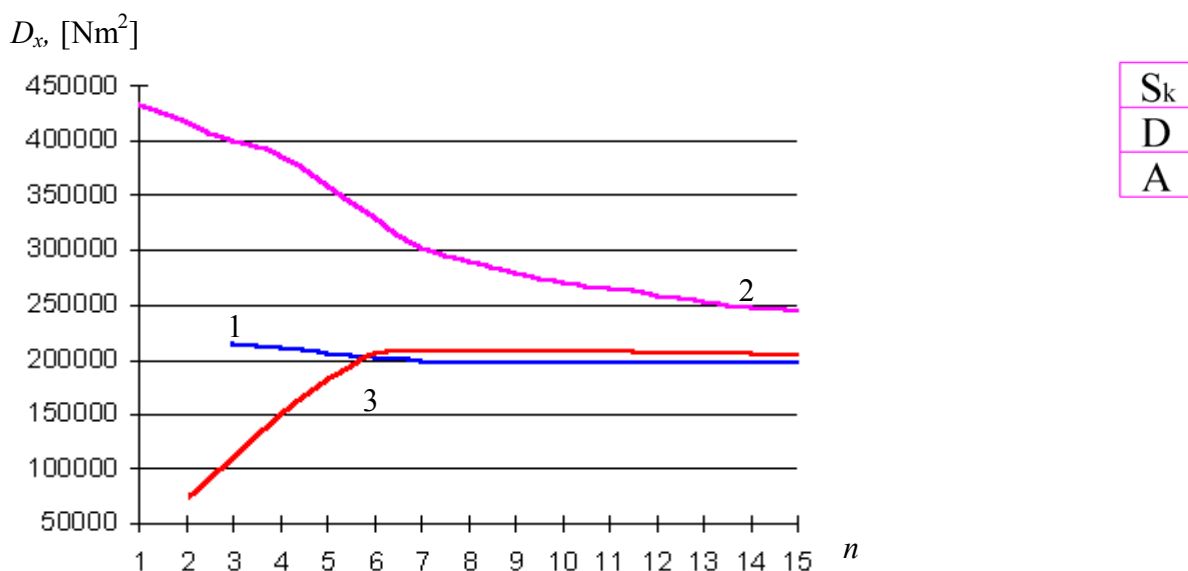
Iš 3.14 pav. ir 3.15 pav. matyti, jog labiau apsimoka naudoti 2.1 pav. c parodytą konstrukciją, nes standumas (3.15 pav.), kintant sluoksnių storio koeficientui, abiem kryptimis yra didesnis nei 2.1 pav. b parodytos konstrukcijos (3.14 pav.). Be to, iš 3.15 pav. matyti, jog 2.1 pav. b

pavaizduotos konstrukcijos, kai sluoksnių storio koeficientas $\psi_y = 0 \dots 0.5$, tai standumas D_x , D_y padidėja labai nedaug, t.y. mažėjantis dervos sluoksnis beveik neturi įtakos standumui (o juk mažėjant dervos sluoksnio storiui, didėja stiklo plastiko ir anglies plastiko sluoksnių storiai, o šios medžiagos yra brangesnės už dervos plastiką). Tuo tarpu iš 3.15 pav. matyti, jog 2.1 pav. c pateiktos konstrukcijos standumas, kai $\psi_x = 0 \dots 0.5$, padidėja labiau.

3.2.2. Sluoksnių skaičiaus įtaka

Standumas D taip pat priklauso nuo konstrukciją sudarančių medžiagų sluoksnių kiekio. 3.16 pav., 3.17 pav., 3.18 pav. pavaizduota asimetrinių trisluoksnių konstrukcinių elementų standumo D_x priklausomybė nuo sluoksnių n . Skaičiavimo rezultatai pateikti priedo 9 lentelėje.

Konstrukcija A – D – S_k (3.16 pav.). 1 – oje kreivėje pateikta D_x priklausomybė, kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis skirtingų medžiagų sluoksnių, t.y., karšto kietėjimo stiklo plastiko, epoksidinės dervos ir anglies plastiko yra vienodas kiekis sluoksnių. 2 – oje kreivėje pateikta D_x priklausomybė, kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis epoksidinės dervos ir karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksnių (m) ir vienu daugiau anglies plastiko sluoksniu ($m + 1$). 3 – čioje kreivėje pateikta D_x priklausomybė nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n , kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis epoksidinės dervos ir anglies sluoksnių ($m + 1$) ir vienu mažiau karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksniu (m).



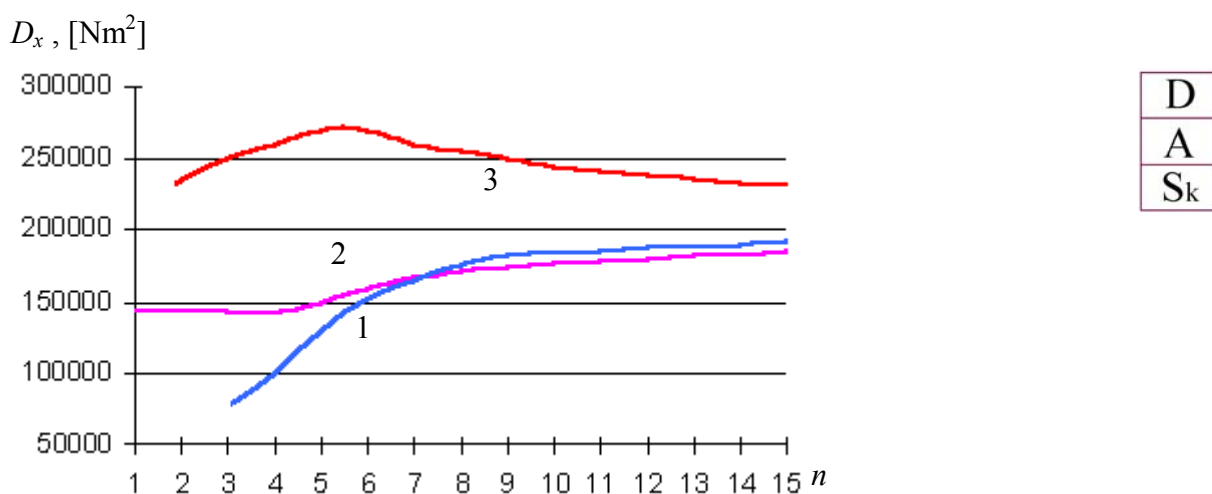
3.16 pav. Asimetrinių konstrukcinių elementų standumo D_x priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n (konstrukcija A – D – S_k – ...): 1 – m ; m ; m , 2 – $m + 1$; m ; m , 3 – $m + 1$; $m + 1$; m (m – vienos medžiagos sluoksnių skaičius)

Esant vienodam konstrukciją sudarančių medžiagų sluoksnių skaičiui (1 kreivė), tokios konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra anglies ir karšto kietėjimo stiklo plastiko (2.9 pav, a). Didėjant sluoksnių skaičiui ($n = 3, 6, 9, 12 \dots$), standumas, nors ir nežymiai, bet mažėja.

Kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis epoksidinės dervos ir anglies plastiko sluoksnių ir vienu daugiau karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksnių (2 kreivė), tai konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra didžiausią tamprumo modulį turintis anglies plastikas (2.9 pav, b). Tad ir standumas yra didesnis (2 – ra kreivė yra aukščiau nei 1 – ma ir 3 – čia). Didžiausias standumas yra, kai konstrukciją sudaro vien tik anglis ($D = 432000 \text{ Nm}^2$). Didėjant sluoksnių skaičiui ($n = 1, 4, 7, 10 \dots$), standumas mažėja (labai didelis sumažėjimas, kai konstrukcija yra sudaryta iš keturių ir septynių sluoksnių).

Kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis epoksidinės dervos ir anglies plastiko sluoksnių ir vienu mažiau karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksniu (3 kreivė), tai tokios konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra anglies ir dervos plastiko (2.9 pav, c). Didėjant sluoksnių skaičiui ($n = 2, 5, 8, 11\dots$), standumas didėja. Didžiausias standumo padidėjimas gaunamas, kai konstrukciją sudaro du ir penki sluoksniai.

Konstrukcija $S_k - A - D$ (3.17 pav.). 1 – oje kreivėje pateikta D priklausomybė, kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis skirtingų medžiagų sluoksnių, t.y., yra vienodas kiekis karšto kietėjimo stiklo plastiko, epoksidinės dervos ir anglies plastiko sluoksnių. 2 – oje kreivėje pateikta D priklausomybė, kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis dervos ir anglies plastiko sluoksnių (m) ir vienu daugiau karšto kietėjimo stiklo plastiko ($m + 1$). 3 – čioje kreivėje pateikta D priklausomybė nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n , kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis karšto kietėjimo stiklo plastiko ir anglies plastiko sluoksnių ($m + 1$) ir vienu mažiau epoksidinės dervos sluoksniu (m).



3.17 pav. Asimetrinių konstrukcinių elementų standumo D_x priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n (konstrukcija $S_k - A - D - \dots$): 1 – m ; m ; $m, 2 - m + 1; m; m, 3 - m + 1; m + 1; m$ (m – vienos medžiagos sluoksnių skaičius)

Esant vienodam konstrukciją sudarančių medžiagų sluoksnių skaičiui (1 kreivė), tokios konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra dervos ir karšto kietėjimo stiklo plastiko. Didėjant sluoksnių skaičiui ($n = 3, 6, 9, 12 \dots$), standumas didėja. Didžiausias standumo padidėjimas gaunamas, kai konstrukciją sudaro trys ir šeši sluoksniai.

Esant konstrukcijoms, kai jas sudaro vienodas kiekis dervos ir anglies plastiko sluoksnių ir vienu daugiau karšto kietėjimo stiklo plastiko (2 kreivė), tai konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra karšto kietėjimo stiklo plastikas. Didėjant sluoksnių skaičiui ($n = 1, 4, 7, 10\dots$), standumas, nors ir nežymiai, didėja.

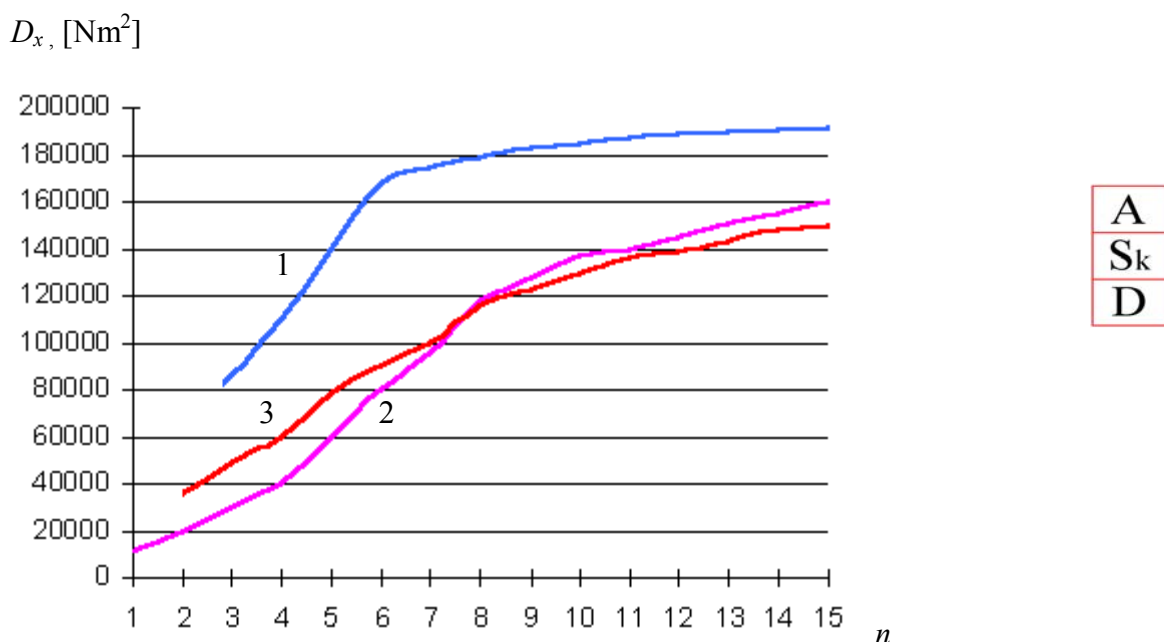
Kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis karšto kietėjimo stiklo plastiko ir anglies plastiko sluoksnių ir vienu mažiau epoksidinės dervos sluoksniu (3 kreivė), tai tokios konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra anglies ir stiklo plastiko, t.y. didžiausią ir vidutinio didumo tamprumo modulį turinčios medžiagos; tad 3 – čia kreivė yra aukščiau nei 1 – ma ar 2 – ra kreivės. Iš pradžių ($n = 2, 5$), standumas padidėja, o dar labiau didėjant sluoksnių skaičiui, jis pradeda mažėti.

Konstrukcija $D - S_k - A$ (3.18 pav.). 1 – oje kreivėje pateikta D_x priklausomybė, kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis skirtingų medžiagų sluoksnių, 2 – oje kreivėje pateikta D_x priklausomybė, kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis anglies ir karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksnių (m) ir vienu daugiau epoksidinės dervos sluoksniu ($m + 1$). 3 – čioje - kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis karšto kietėjimo stiklo plastiko ir dervos sluoksnių ($m + 1$) ir vienu mažiau anglies sluoksniu (m).

Esant vienodam konstrukciją sudarančių medžiagų sluoksnių skaičiui (1 kreivė), tokios konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra dervos ir anglies plastiko. Didėjant sluoksnių skaičiui ($n = 3, 6, 9, 12 \dots$), standumas didėja. Didžiausias standumo padidėjimas gaunamas, kai konstrukciją sudaro trys ir šeši sluoksniai.

Esant konstrukcijoms, kai jas sudaro vienodas kiekis anglies ir karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksniai ir vienu daugiau dervos sluoksniu (2 kreivė), tai konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra epoksidinės dervos plastikas (t.y., mažiausią tamprumo modulį turinčios medžiagos). Tad 2 – ra kreivė yra žemiausiai lyginant su 1 – ma ir 3 – čia. Didėjant sluoksnių skaičiui ($n = 1, 4, 7, 10 \dots$), standumas didėja. Didžiausias standumo padidėjimas gaunamas, kai konstrukciją sudaro keturi ir septyni sluoksniai.

Kai konstrukciją sudaro vienodas kiekis karšto kietėjimo stiklo plastiko ir dervos sluoksnių ir vienu mažiau anglies plastiko sluoksniu (3 kreivė), tai tokios konstrukcijos išoriniuose sluoksniuose yra dervos ir stiklo plastiko. Didėjant sluoksnių skaičiui ($n = 2, 5, 8, 11 \dots$), standumas didėja.



3.18 pav. Asimetrinių konstrukcinių elementų standumo D_x priklausomybės nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n (konstrukcija D – S_k – A – ...): 1 – m ; m ; m , 2 – $m + 1$; m ; m , 3 – $m + 1$; $m + 1$; m (m – vienos medžiagos sluoksnių skaičius)

Iš 3.16 pav., 3.17 pav., 3.18 pav. matyti, jog konstrukcinių elementų standumas D priklauso nuo konstrukcinio elemento sluoksnių skaičiaus n . Įdomiausia tai, jog turint konstrukciją, sudarytą iš šių medžiagų: epoksidinės dervos, anglies plastiko, karšto kietėjimo stiklo plastiko, nepriklausomai koku eiliškumu bus išdėstytos šios medžiagos, didėjant sluoksnių skaičiui, konstrukcijos standumas artėja prie 200000 Nm^2 , t.y. esant sluoksnių skaičiui > 15 sluoksnių išdėstymo tvarka įtakos neturi.

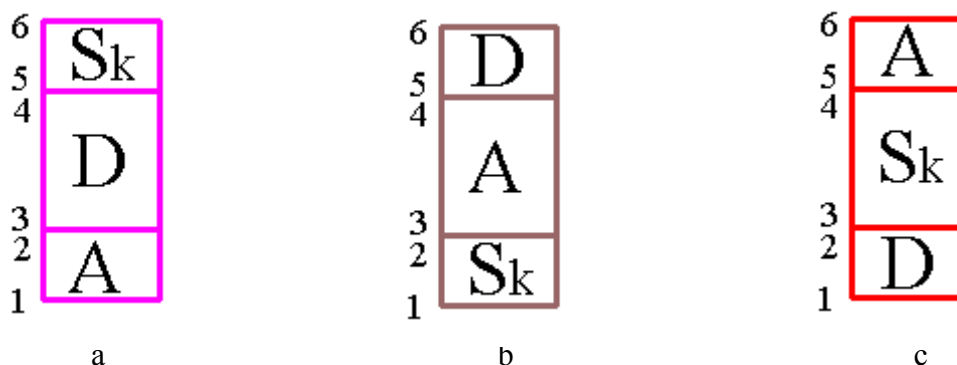
3.3. Stiprumo tyrimas

3.3.1. Normalinių įtempimų pasiskirstymas DKE skerspjūvyje

Daugiasluoksniu konstrukcinio elemento skerspjūvyje pereinant iš vieno sijos sluoksnio į kitą tų sluoksnių kontakto zonoje santykis $M \cdot y_i / D = const$, tai iš 2.10 lygties matome, jog įtempimų dydis priklauso tik nuo sluoksnio medžiagos tamprumo modulio. Vadinasi, sluoksnių kontakto zonoje, sekančiame sluoksnyje kylantys normaliniai įtempimai yra apskaičiuojami taip:

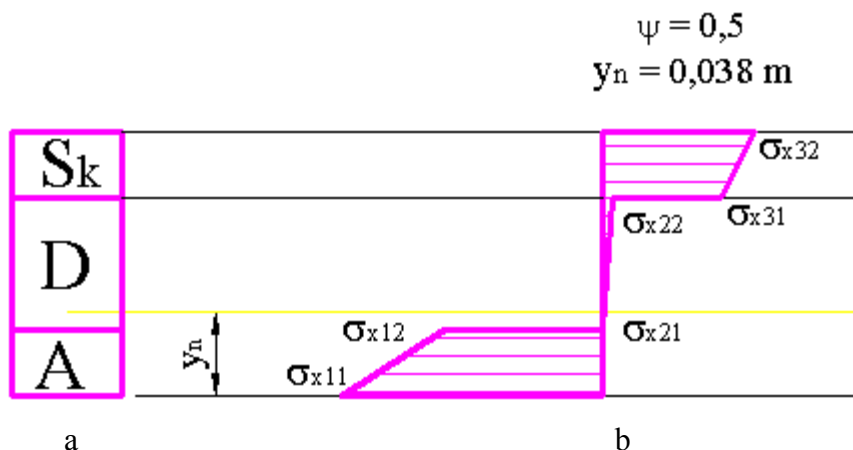
$$\sigma_{i+1} = \sigma_i \cdot \frac{E_{i+1}}{E_i}. \quad (3.6)$$

T.y. pereinant iš vieno sijos sluoksnio į kitą visada gaunamas įtempimų šuolis, kuris yra proporcingas tų sluoksnių tamprumo modulių santykiui. Taigi, normalinių įtempimų dydis daugiasluoksniėje sijoje priklauso ir nuo išorinės apkrovos, ir nuo sijos standumo, ir nuo medžiagos tamprumo modulio skaičiuojamame pjūvyje. 3.19 pav. parodytos bandinių konstrukcijos ir jose pažymėti taškai, kuriuose skaičiavau įtempimus. Priėmiau, jog sija lenkiama jėga $F = 10$ kN, vadinasi, lenkimo momentas $M = F \cdot l_l = 10000 \cdot 0,5 = 5000$ Nm. Skaičiavimo rezultatai pateikti priede 10 lentelėje, 11 lentelėje ir 12 lentelėje.



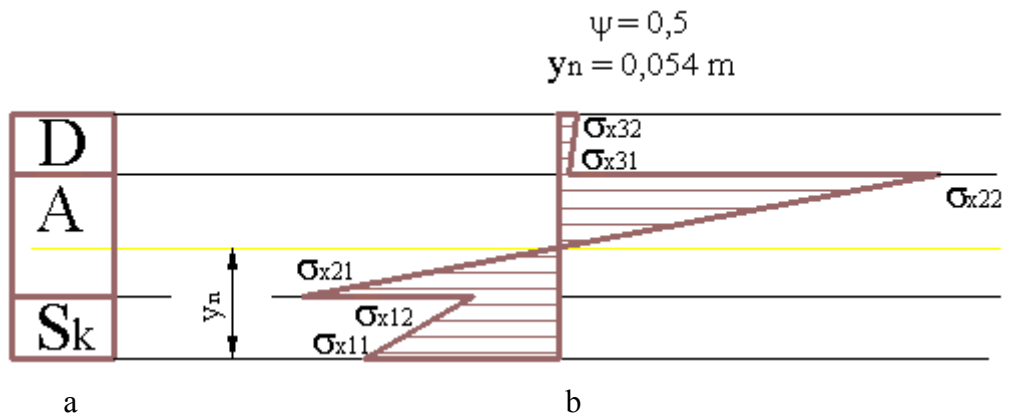
3.19 pav. Bandinių konstrukcijos: taškas 1 - σ_{x11} ; taškas 2 - σ_{x12} ; taškas 3 - σ_{x21} ; taškas 4 - σ_{x22} ; taškas 5 - σ_{x31} ; taškas 6 - σ_{x32}

3.20 pav. pavaizduotas trisluoksniės (A – D – Sk) sijos skerspjūvis (a) ir normalinių įtempimų pasiskirstymas jame (b), kai $E_1 > E_2$, $E_3 > E_2$; $\psi = 0,5$; $y_n = 0,038$ m (skaičiavimo rezultatai priedo 10 lentelėje).



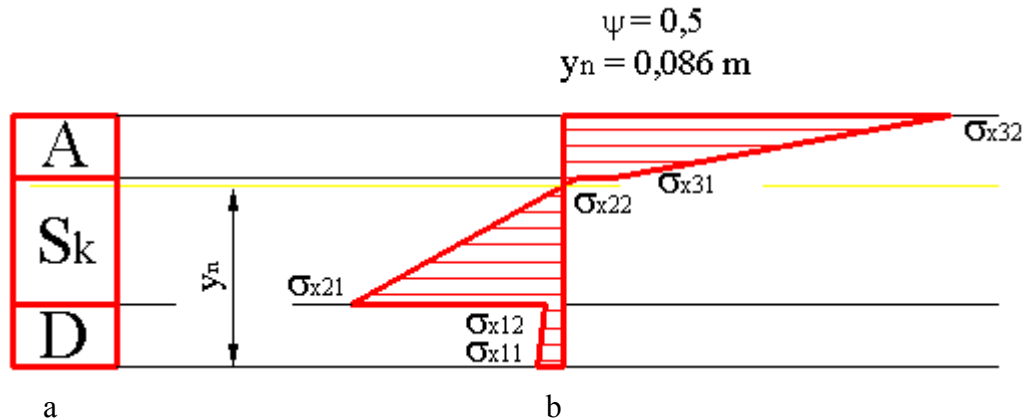
3.20 pav. Trisluoksniės sijos (A – D – Sk) skerspjūvis (a) ir normalinių įtempimų pasiskirstymas jame (b)

3.21 pav. pavaizduotas trisluoksnės ($S_k - A - D$) sijos skerspjūvis (a) ir normalinių įtempimų pasiskirstymas jame (b), kai $E_1 < E_2$, $E_3 < E_2$; $\psi = 0,5$; $y_n = 0,054$ m (skaičiavimo rezultatai priedo 11 lentelėje).



3.21 pav. Trisluoksnės sijos ($S_k - A - D$) skerspjūvis (a) ir normalinių įtempimų pasiskirstymas jame (b)

3.22 pav. pavaizduotas trisluoksnės ($D - S_k - A$) sijos skerspjūvis (a) ir normalinių įtempimų pasiskirstymas jame (b), kai $E_1 < E_2$, $E_3 > E_2$; $\psi = 0,5$; $y_n = 0,086$ m (skaičiavimo rezultatai priedo 12 lentelėje).

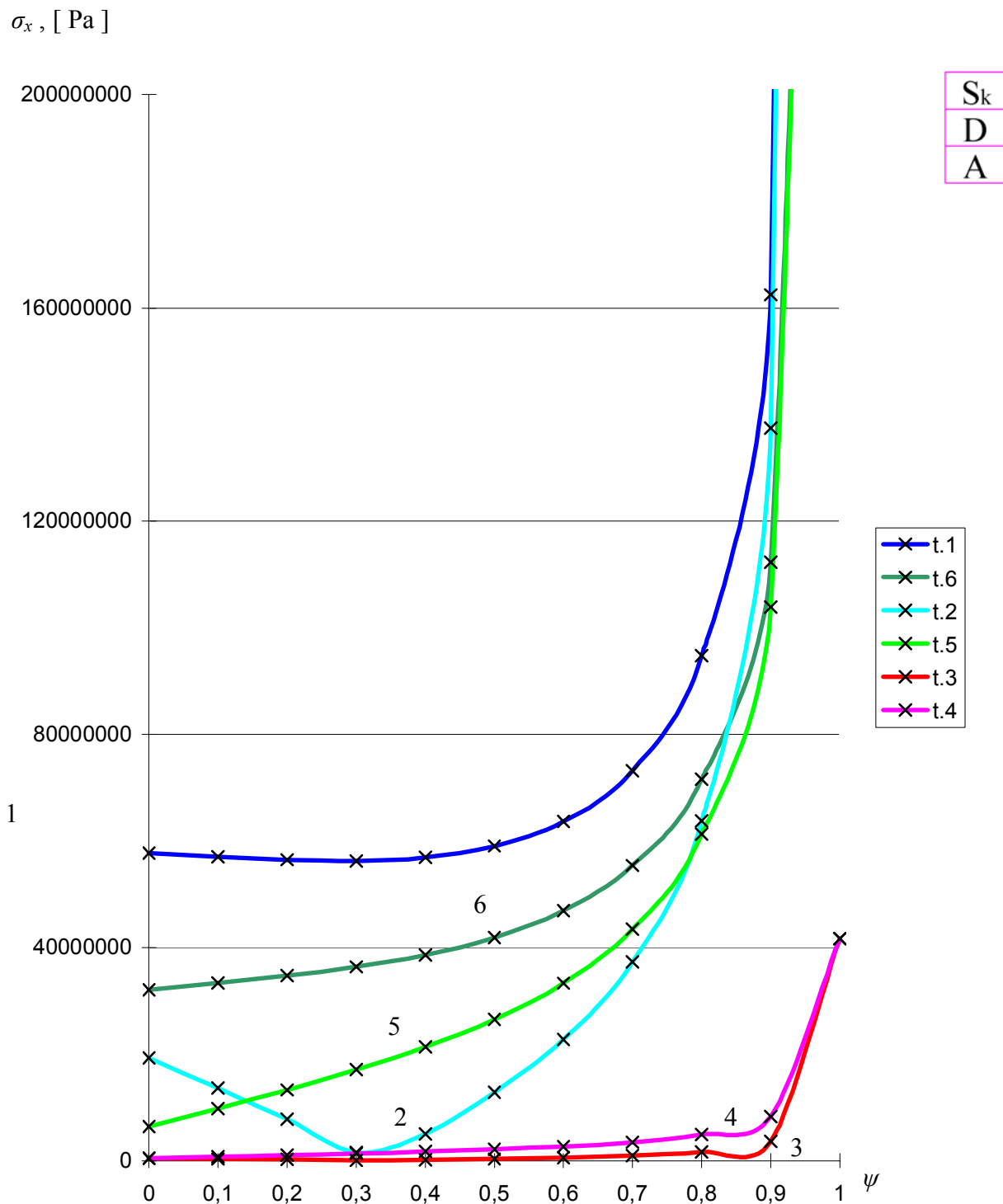


3.22 pav. Trisluoksnės sijos ($D - S_k - A$) skerspjūvis (a) ir normalinių įtempimų pasiskirstymas jame (b)

Taigi, kaip matome iš 3.20 pav., 3.21 pav., 3.22 pav., priklausomai nuo to, ar einama iš didesnį tamprumo modulį turinčios medžiagos ar iš mažesnį, skiriasi normalinio įtempimo diagramų pobūdis. Jei einama į mažesnį tamprumo modulį turinčios medžiagos sluoksnį, tai įtempimai sumažėja, jei į didesnį – padidėja.

3.3.2. Sluoksnių storio įtaka įtempimams

Iš 2.10 lygties matyti, jog normalinių įtempimų dydis yra tiesiog proporcingas sluoksnio medžiagos tamprumo moduliui ir atstumui nuo nagrinėjamo pjūvio neutralaus sluoksnio, ir atvirkščiai proporcingas standumo kitimui. O kaip normaliniai įtempimai priklauso nuo sluoksnių storio koeficiento ψ ?



3.23 pav. Įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ konstrukcijos A – D – S_k išoriniuose (1 ir 6 taškai) ir vidiniuose sluoksniuose (2 – 5 taškai): 1 – t.1 (σ_{x11}); 2 – t.2 (σ_{x12}); 3 – t.3 (σ_{x21}); 4 – t.4 (σ_{x22}); 5 – t.5 (σ_{x31}); 6 – t.6 (σ_{x32})

3.23 pav. pavaizduota įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ konstrukcijos A – D – S_k išoriniuose ir vidiniuose sluoksniuose. Skaičiavimo rezultatai pateikti priedo 10 lentelėje.

1 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ taške 1; 2 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo ψ taške 2 (3.19 pav. a). Kai $\psi = 0 \dots 0,3$ (atsiradus epoksidinės dervos sluoksniui), įtempimai taškuose 1 ir 2 sumažėja. Tik taške 1 šis sumažėjimas yra labai nedidelis. Dar labiau didėjant epoksidinės dervos sluoksniui δ_2 ($\psi = 0,3 \dots 1$) įtempimai taškuose 1 ir 2 padidėja.

3 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ taške 3; 4 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo ψ taške 4 (3.19 pav. a). Didėjant ψ įtempimai kontakto plokštumos taškuose 3 ir 4 palaipsniui didėja, nes kontakto plokštuma artėja prie neutralios linijos. Kai $\psi = 1$ (turint vienasluoksnę konstrukciją), šis skirtumas lygus 0, tad kreivės susikerta.

5 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ taške 5; 6 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo ψ taške 6 (3.19 pav. a). Didėjant ψ įtempimai taškuose 5 ir 6 palaipsniui didėja.

Kreivės 2 ir 5 susikerta, kai $\psi = 0,78$. T.y., kontakto plokštuma sutampa su neutraliaja linija.

Maksimalus lenkimo įtempimas σ_x yra didesnio tamprumo modulio medžiagos sluoksnyje ir esant mažiausiam jo storiui, t.y. kai $\psi = 0,9$ (1 kreivė), $\sigma_x = 162,4$ MPa.

3.24 pav. pavaizduota įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ konstrukcijos S_k – A – D išoriniuose ir vidiniuose sluoksniuose. Skaičiavimo rezultatai pateikti priedo 11 lentelėje.

1 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ taške 1 (3.19 pav. b). Didėjant ψ įtempimai taške 1 mažėja.

2 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo ψ taške 2 (3.19 pav. b). Kai $\psi = 0 \dots 0,2$ (atsiradus anglies plastiko sluoksniui), įtempimai taške 2 sumažėja. Dar labiau didėjant anglies plastiko sluoksniui δ_2 ($\psi = 0,2 \dots 1$) įtempimai taške 2 padidėja. Tačiau, kai $\psi = 0,2 \dots 1$ įtempimai taške 2 vis tik yra mažesni, negu kai $\psi = 0$.

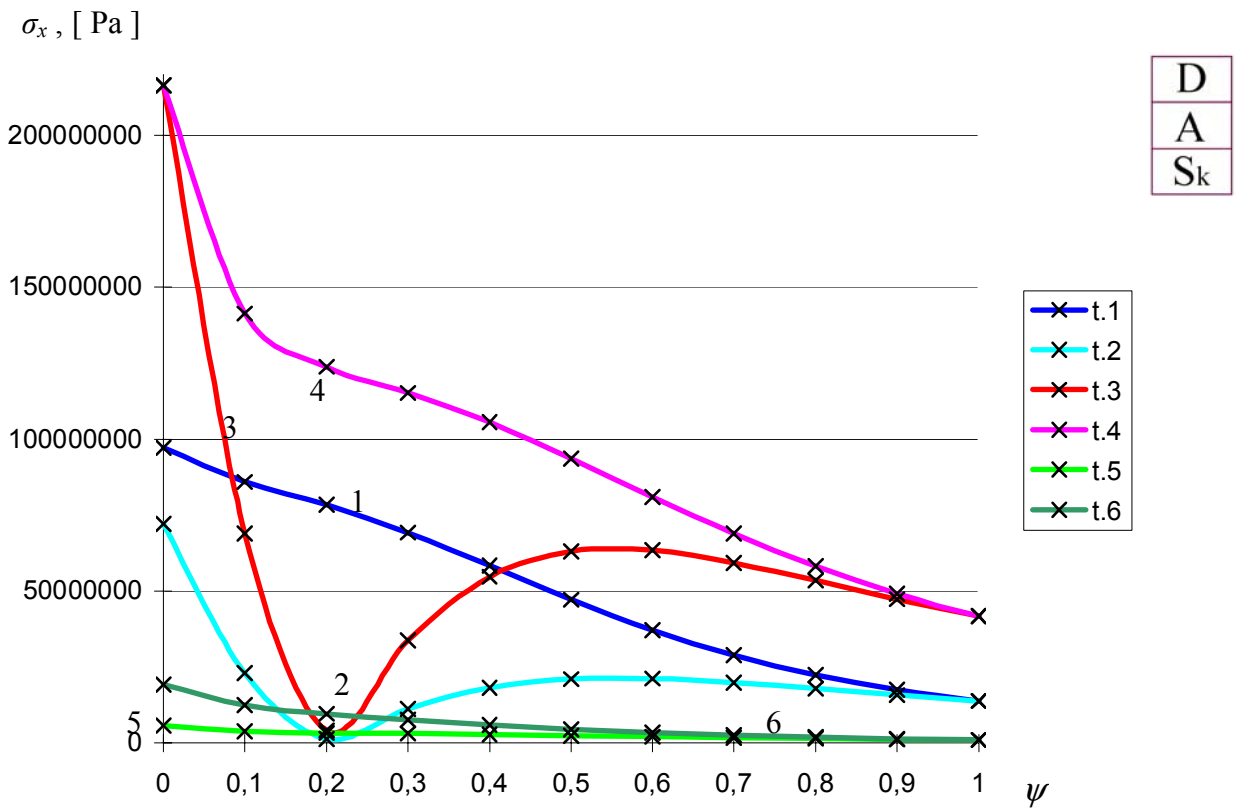
3 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ taške 3 (3.19 pav. b). Kai $\psi = 0 \dots 0,2$ įtempimai taške 3 sumažėja. Dar labiau didėjant ψ ($\psi = 0,2 \dots 1$) įtempimai taške 3 padidėja.

4 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo ψ taške 4 (3.19 pav. b). Didėjant ψ įtempimai taške 4 palaipsniui mažėja.

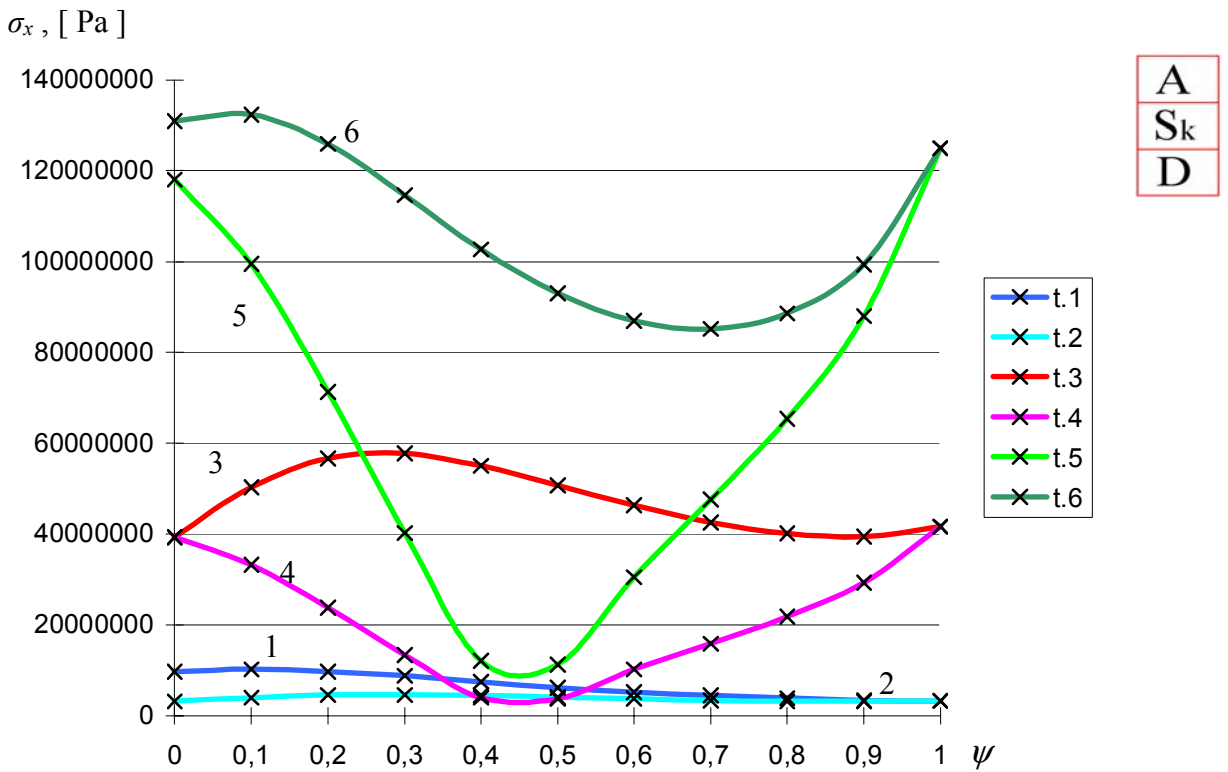
5 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ taške 5; 6 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo ψ taške 6 (3.19 pav. b). Didėjant ψ įtempimai taškuose 5 ir 6 palaipsniui mažėja.

Kreivės 2 ir 5 susikerta, kai $\psi = 0,24$. T.y., kai kontakto plokštuma sutampa su neutraliaja linija.

Maksimalus lenkimo įtempimas σ_x yra didesnio tamprumo modulio medžiagos sluoksnyje ir esant mažiausiam jo storiui, t.y. kai $\psi = 0,1$ (4 kreivė), $\sigma_x = 141,3$ MPa.



3.24 pav. Įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ konstrukcijos $S_k - A - D$ išoriniuose (1 ir 6 taškai) ir vidiniuose sluoksniuose (2 – 5 taškai): 1 – t.1 (σ_{x11}); 2 – t.2 (σ_{x12}); 3 – t.3 (σ_{x21}); 4 – t.4 (σ_{x22}); 5 – t.5 (σ_{x31}); 6 – t.6 (σ_{x32})



3.25 pav. Įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ konstrukcijos $D - S_k - A$ išoriniuose (1 ir 6 taškai) ir vidiniuose sluoksniuose (2 – 5 taškai): 1 – t.1 (σ_{x11}); 2 – t.2 (σ_{x12}); 3 – t.3 (σ_{x21}); 4 – t.4 (σ_{x22}); 5 – t.5 (σ_{x31}); 6 – t.6 (σ_{x32})

3.25 pav. pavaizduota įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ konstrukcijos D – S_k – A išoriniuose ir vidiniuose sluoksniuose. Skaičiavimo rezultatai pateikti priedo 12 lentelėje.

1 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ taške 1 (3.19 pav. c). Kai $\psi = 0 \dots 0,1$ (atsiradus karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksniui), įtempimai taške 1 nežymiai padidėja. Dar labiau didėjant ψ ($\psi = 0,1 \dots 1$) įtempimai taške 1 mažėja.

2 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo ψ taške 2 (3.19 pav. c). Kai $\psi = 0 \dots 0,3$ įtempimai taške 2 nežymiai padidėja. Dar labiau didėjant karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksniui δ_2 ($\psi = 0,3 \dots 1$) įtempimai taške 2 nežymiai sumažėja.

3 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ taške 3 (3.19 pav. c). Kai $\psi = 0 \dots 0,3$ įtempimai taške 3 padidėja. Dar labiau didėjant ψ įtempimai taške 3 mažėja.

4 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo ψ taške 4 (3.19 pav. c). Kai $\psi = 0 \dots 0,4$ įtempimai taške 4 mažėja. Dar labiau didėjant ψ ($\psi = 0,4 \dots 1$) įtempimai taške 4 didėja.

5 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo santykinio sluoksnių storio koeficiento ψ taške 5 (3.19 pav. c). Kai $\psi = 0 \dots 0,5$ įtempimai taške 5 mažėja. Dar labiau didėjant ψ ($\psi = 0,5 \dots 1$) įtempimai taške 5 didėja.

6 kreivė – įtempimo σ_x kitimo priklausomybė nuo ψ taške 6 (3.19 pav. c). Tik atsiradus nedideliame karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksniui, normaliais įtempimais taške 6 truputį padidėja. Kai $\psi = 0,1 \dots 0,7$ įtempimai taške 6 mažėja. Dar labiau didėjant ψ ($\psi = 0,7 \dots 1$) įtempimai taške 6 didėja.

Iš 3.23 pav., 3.24 pav., 3.25 pav. matyti, jog didžiausias normalinių įtempimų kitimas yra didžiausią tamprumo modulį turinčios anglies plastiko sluoksnyje. Intensyviausiai kinta kontakto įtempimas: konstrukcijoje A – D – S_k 2 kreivė (3.23 pav.), konstrukcijoje S_k – A – D 3 ir 4 kreivės (3.24 pav.), konstrukcijoje D – S_k – A 5 kreivė (3.25 pav.).

Taip pat iš 3.23 pav., 3.24 pav., 3.25 pav. matyti, jog mažiausi įtempimai yra konstrukcijoje D – S_k – A (3.25 pav.). Ir tikslingiausia būtų naudoti šią konstrukciją, kai $\psi = 0,4 \dots 0,7$. Šiame intervale išorinių sluoksnių įtempimai kinta $\sigma_{x11} = 7,5 \dots 4,4$ MPa ir $\sigma_{x32} = 102,7 \dots 85,2$ MPa. Be to, šią konstrukciją apsimoka naudoti ir ekonominiu požiūriu, nes joje didžiausią dalį užima karšto kietėjimo stiklo plastikas (o jis yra pigesnis nei anglies plastikas).

3.3.3. Sluoksnių skaičiaus įtaka įtempimams

Asimetrinėse konstrukcijose, kintant sluoksnių skaičiui, kinta skerspjūvio neutralios ašies padėtis. Kadangi standumas D apskaičiuojamas neutraliosios ašies padėties atžvilgiu, tai kiekvieno sluoksniu normalinių įtempimų reikšmės kiekviename sluoksnyje kinta pagal skirtingą priklausomybę.

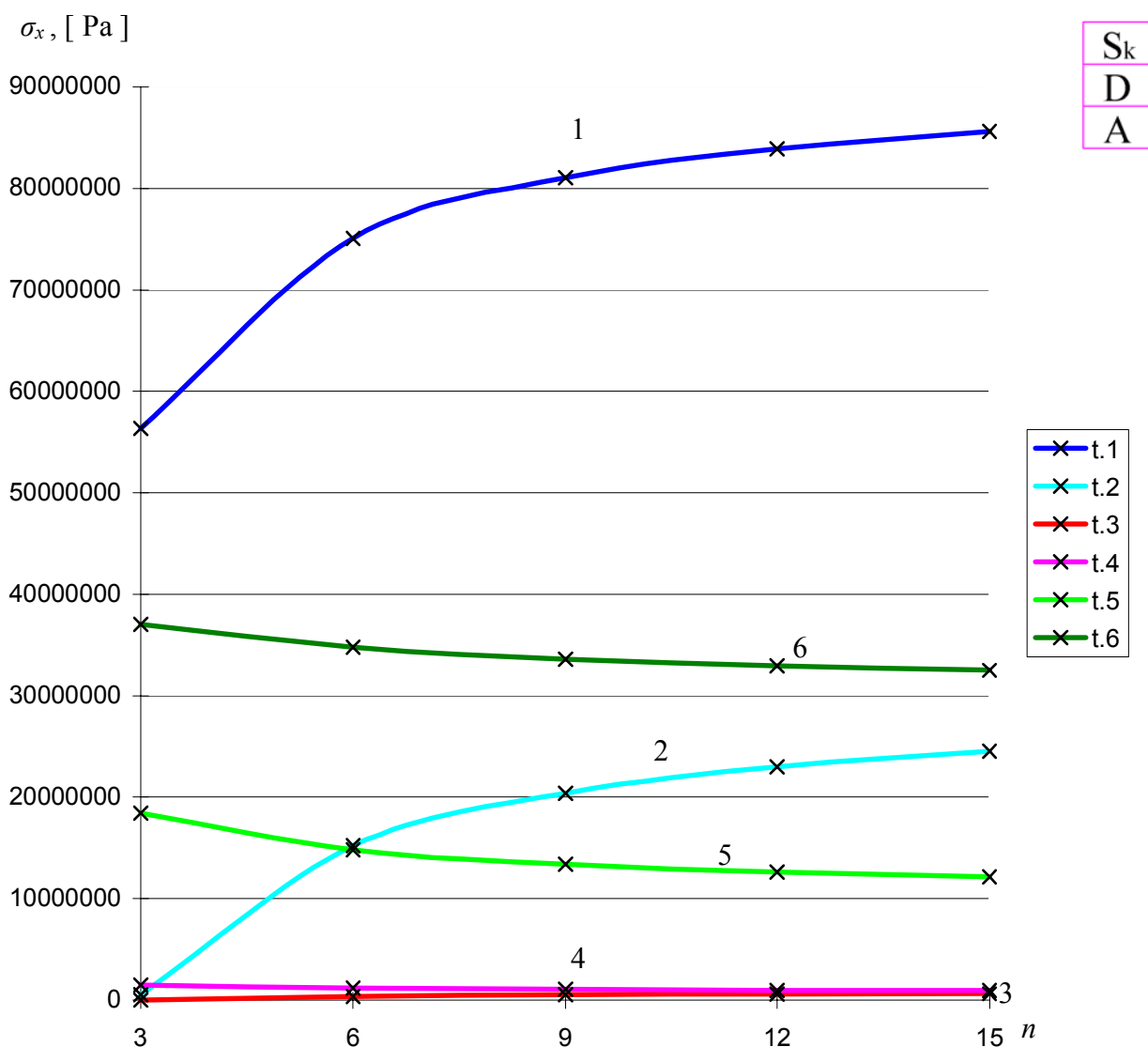
3.26 pav. parodytos įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo sluoksnių skaičiaus n konstrukcijos A – D – S_k – ... išoriniuose ir vidiniuose sluoksniuose. Skaičiavimo rezultatai pateikti priedo 13 lentelėje.

Kreivės 1 ir 2 parodo įtempimo σ_x kitimo priklausomybę nuo sluoksnių skaičiaus atitinkamai taškuose 1 ir 2 (3.19 pav. a), t.y. anglies plastiko sluoksnyje. Didėjant sluoksnių skaičiui įtempimai šiuose taškuose didėja. Mažiausi įtempimai yra kai turime trisluoksnę konstrukciją: $\sigma_{x11} = 56$ MPa, $\sigma_{x12} = 0,55$ MPa.

Kreivės 3 ir 4 parodo įtempimo σ_x kitimo priklausomybę nuo sluoksnių skaičiaus atitinkamai taškuose 3 ir 4 (3.19 pav. a), t.y. epoksidinės dervos sluoksnyje. Šiuose taškuose įtempimai kinta nežymiai, palyginus su kitais taškais. Didėjant sluoksnių skaičiui įtempimai σ_{x21} didėja, o įtempimai σ_{x22} nežymiai mažėja. Mažiausi įtempimai taške 3 yra kai turime trisluoksnę konstrukciją - $\sigma_{x21} = 0,01$ MPa, o didžiausi įtempimai taške 4 yra kai turime trisluoksnę konstrukciją - $\sigma_{x22} = 1,5$ MPa.

Kreivės 5 ir 6 parodo įtempimo σ_x kitimo priklausomybę nuo sluoksnių skaičiaus atitinkamai taškuose 5 ir 6 (3.19 pav. a), t.y. karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksnyje. Šiuose taškuose didėjant sluoksnių skaičiui įtempimai mažėja. Didžiausi įtempimai yra kai turime trisluoksnę konstrukciją: $\sigma_{x31} = 18,4$ MPa, $\sigma_{x32} = 37$ MPa.

Iš 3.26 pav. matyti, jog įtempimo σ_x kitimo dėsningumas iki 9 nėra tolygus. Sluoksnių skaičiui esant didesniai nei 9, $f = \sigma_x (n)$ praktiškai kinta pagal tiesinę priklausomybę.



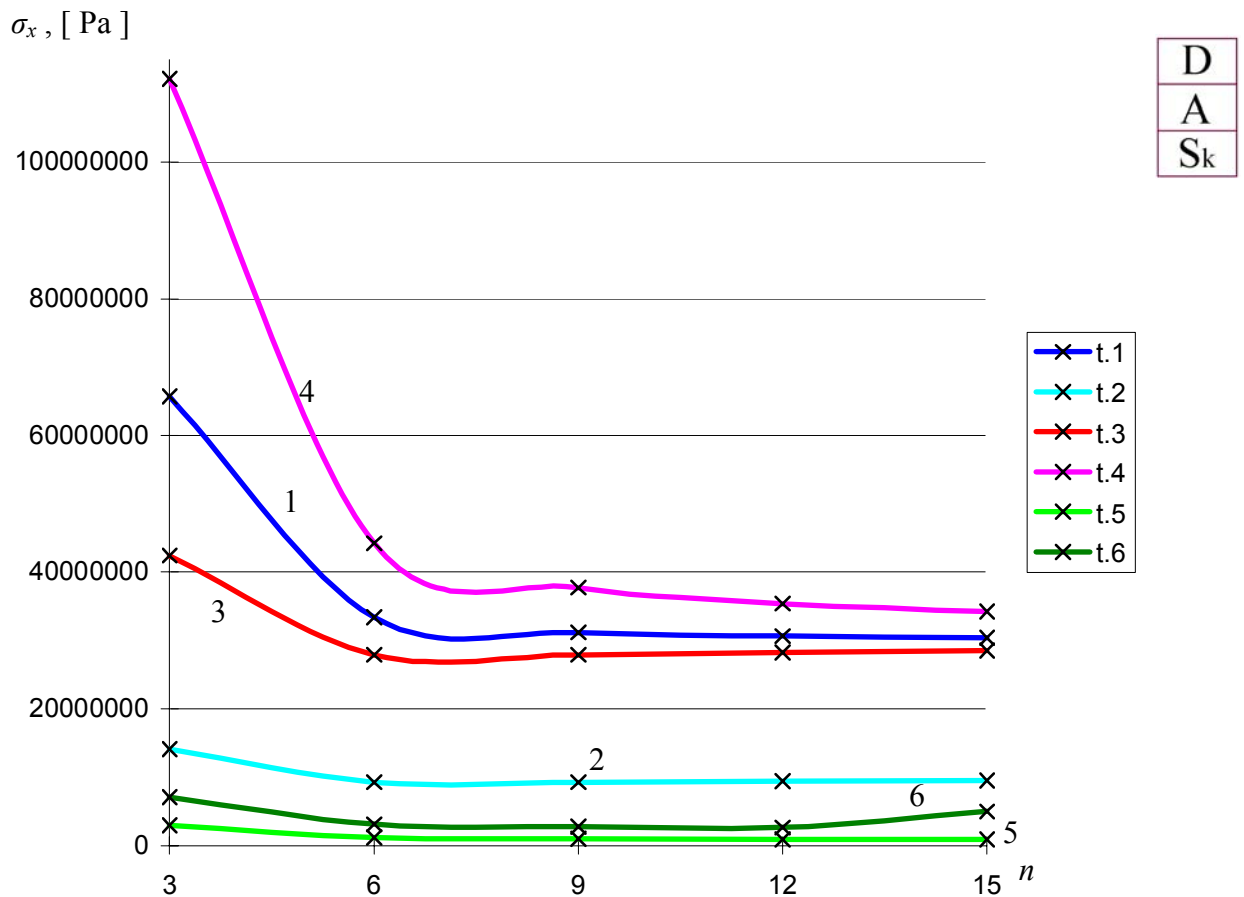
3.26 pav. Įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo sluoksnių skaičiaus n konstrukcijos A – D – S_k – ... išoriniuose (1 ir 6 taškai) ir vidiniuose sluoksniuose (2 – 5 taškai): 1 – t.1 (σ_{x11}); 2 – t.2 (σ_{x12}); 3 – t.3 (σ_{x21}); 4 – t.4 (σ_{x22}); 5 – t.5 (σ_{x31}); 6 – t.6 (σ_{x32})

3.27 pav. parodytos įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo sluoksnių skaičiaus n konstrukcijos $S_k - A - D - \dots$ išoriniuose ir vidiniuose sluoksniuose. Skaičiavimo rezultatai pateikti priedo 14 lentelėje.

Kreivės 1 ir 2 parodo įtempimo σ_x kitimo priklausomybę nuo sluoksnių skaičiaus atitinkamai taškuose 1 ir 2 (3.19 pav. b), t.y. karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksnyje. Didėjant sluoksnių skaičiui įtempimai šiuose taškuose mažėja. Įtempimai labai sumažėja taške 1, kai sluoksnių skaičius padidinamas nuo 3 iki 6. Didžiausi įtempimai yra kai turime trisluksnę konstrukciją: $\sigma_{x11} = 66 \text{ MPa}$, $\sigma_{x12} = 14 \text{ MPa}$.

Kreivės 3 ir 4 parodo įtempimo σ_x kitimo priklausomybę nuo sluoksnių skaičiaus atitinkamai taškuose 3 ir 4 (3.19 pav. b), t.y. anglies plastiko sluoksnyje. Didėjant sluoksnių skaičiui įtempimai σ_{x21} iš pradžių sumažėja, o esant daugiau nei 6 sluoksniams nežymiai padidėja, o įtempimai σ_{x22} mažėja. Didžiausi įtempimai yra kai turime trisluksnę konstrukciją: $\sigma_{x21} = 42 \text{ MPa}$, $\sigma_{x22} = 112 \text{ MPa}$.

Kreivės 5 ir 6 parodo įtempimo σ_x kitimo priklausomybę nuo sluoksnių skaičiaus atitinkamai taškuose 5 ir 6 (3.19 pav. b), t.y. epoksidinės dervos sluoksnyje. Didėjant sluoksnių skaičiui iki 12 įtempimai taške 6 mažėja, o nuo $n = 12$ pradeda nežymiai didėti, o taške 5 didėjant sluoksnių skaičiui įtempimai mažėja. Didžiausi įtempimai yra kai turime trisluksnę konstrukciją: $\sigma_{x31} = 2,99 \text{ MPa}$, $\sigma_{x32} = 7,1 \text{ MPa}$.



3.27 pav. Įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo sluoksnių skaičiaus n konstrukcijos $S_k - A - D - \dots$ išoriniuose (1 ir 6 taškai) ir vidiniuose sluoksniuose (2 – 5 taškai): 1 – t.1 (σ_{x11}); 2 – t.2 (σ_{x12}); 3 – t.3 (σ_{x21}); 4 – t.4 (σ_{x22}); 5 – t.5 (σ_{x31}); 6 – t.6 (σ_{x32})

Iš 3.27 pav. matyti, jog įtempimo σ_x kitimo dėsningumas iki 9 nėra tolygus. Sluoksnių skaičiui esant didesniai nei 9, $f = \sigma_x (n)$ praktiškai kinta pagal tiesinę priklausomybę.

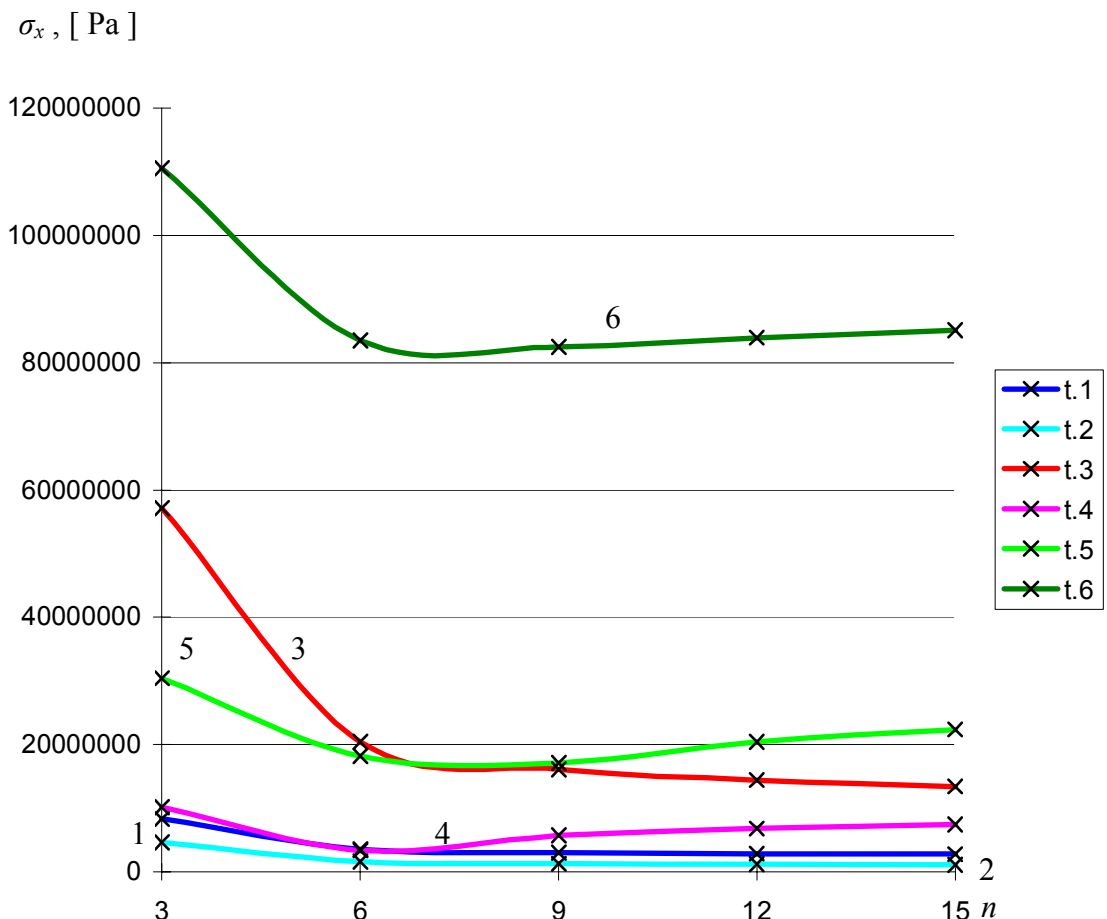
3.28 pav. parodytos įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo sluoksnių skaičiaus n konstrukcijos D - S_k - A - ... išoriniuose ir vidiniuose sluoksniuose. Skaičiavimo rezultatai pateikti priedo 15 lentelėje.

Kreivės 1 ir 2 parodo įtempimo σ_x kitimo priklausomybę nuo sluoksnių skaičiaus atitinkamai taškuose 1 ir 2 (3.19 pav. c), t.y. epoksidinės dervos sluoksnyje. Didėjant sluoksnių skaičiui įtempimai šiuose taškuose mažėja. Didžiausi įtempimai yra kai turime trisluksnę konstrukciją: $\sigma_{x11} = 8,3$ MPa, $\sigma_{x12} = 4,6$ MPa.

Kreivės 3 ir 4 parodo įtempimo σ_x kitimo priklausomybę nuo sluoksnių skaičiaus atitinkamai taškuose 3 ir 4 (3.19 pav. c), t.y. karšto kietėjimo stiklo plastiko sluoksnyje. Didėjant sluoksnių skaičiui įtempimai σ_{x21} mažėja, o įtempimai σ_{x22} iš pradžių sumažėja, o esant daugiau nei 6 sluoksniams padidėja. Didžiausi įtempimai yra kai turime trisluksnę konstrukciją - $\sigma_{x21} = 57$ MPa, $\sigma_{x22} = 10$ MPa.

Kreivės 5 ir 6 parodo įtempimo σ_x kitimo priklausomybę nuo sluoksnių skaičiaus atitinkamai taškuose 5 ir 6 (3.19 pav. c), t.y. anglies plastiko sluoksnyje. Didėjant sluoksnių skaičiui iki 6 įtempimai šiuose taškuose smarkiai sumažėja, o nuo $n = 6$ pradeda didėti. Didžiausi įtempimai yra kai turime trisluksnę konstrukciją: $\sigma_{x31} = 30,4$ MPa, $\sigma_{x32} = 111$ MPa.

Iš 3.28 pav. matyti, jog įtempimo σ_x kitimo dėsningumas iki 9 nėra tolygus. Sluoksnių skaičiui esant didesniai nei 9, $f = \sigma_x (n)$ praktiškai kinta pagal tiesinę priklausomybę.



3.28 pav. Įtempimo σ_x kitimo priklausomybės nuo sluoksnių skaičiaus n konstrukcijos D - S_k - A - ... išoriniuose (1 ir 6 taškai) ir vidiniuose sluoksniuose (2 - 5 taškai): 1 - t.1 (σ_{x11}); 2 - t.2 (σ_{x12}); 3 - t.3 (σ_{x21}); 4 - t.4 (σ_{x22}); 5 - t.5 (σ_{x31}); 6 - t.6 (σ_{x32})

Iš 3.26 pav., 3.27 pav. 3.28 pav. matyti, jog kiekvienas asimetrinės konstrukcijos sluoksnio įtempimas turi atskirą priklausomybę nuo sluoksnių skaičiaus n . Didėjant asimetrinės konstrukcijos sluoksnių skaičiui, visų sluoksnių normalinių įtempimų priklausomybės artėja prie tam tikros vidutinės įtempimo reikšmės, kuri kiekvienai medžiagai yra skirtinga.

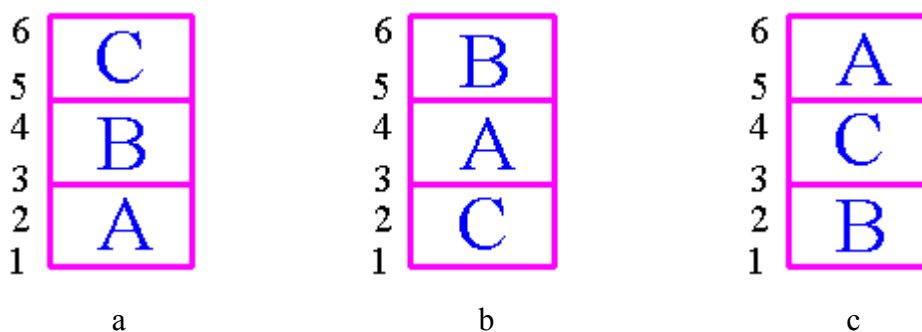
Iš šių paveikslų taip pat matyti, jog didžiausias įtempimo kitimas intervale nuo 3 iki 6 yra gaunamas didžiausio standumo anglies plastiko sluoksnyje (3.26 pav. 1 ir 2 kreivės, 3.27 pav. 3 ir 4 kreivės, 3.28 pav. 5 ir 6 kreivės).

Taigi, įvertinus daugiasluoksnių sijų standumo ir stiprumo tyrimų rezultatus (pagal 3.1 pav., 3.11 pav., 3.23 pav., 3.24 pav., 3.25 pav.) galima teigti, jog iš visų nagrinėtų konstrukcijų tikslingiausia yra pasirinkti 2.1 pav. a parodytą konstrukciją $D - S_k - A$, kai $\psi = 0,4 \dots 0,7$. T. y. tokios konstrukcijos įtempimai σ_x bus mažiausi (žr. 3.25 pav.), standumas D_x didės (žr. 3.11 pav. 3 kreivė), neutralios ašies padėties koeficientai K_x ir K_y bus mažiausi (žr. 3.1 pav. 3 – 4 kreivės).

4. DS STIPRUMO TYRIMAS BEM

4.1. Konstrukcijos apibūdinimas

Tyrimui pasirinkau trisluoksnę konstrukciją, t.y. konstrukciją sudaryta iš medžiagos A, kurios tamprumo modulis yra didžiausias ($E_A = 40$ GPa), iš medžiagos B, kurios tamprumo modulis yra dvigubai mažesnis nei medžiagos A ($E_B = 20$ GPa), ir iš medžiagos C, kurios tamprumo modulis yra dvigubai mažesnis nei medžiagos B ($E_C = 10$ GPa). Šias medžiagas tarpusavyje keičiau vietomis išlaikydama visus matmenis vienodus: bandinio aukštis $h = 120$ mm, plotis $b = 50$ mm, $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$. Mano nagrinėtos konstrukcijos A – B – C, C – A – B, B – C – A parodytos 4.1 pav.

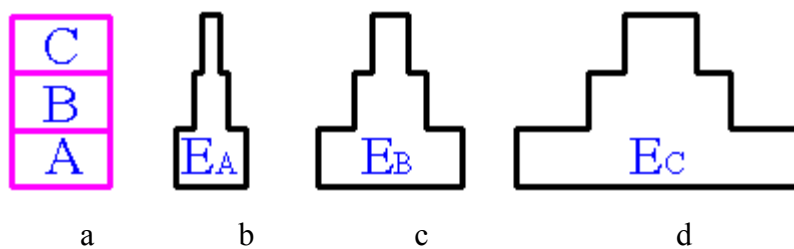


4.1 pav. Trisluoksinės konstrukcijos: a) A – B – C, b) C – A – B, c) B – C – A

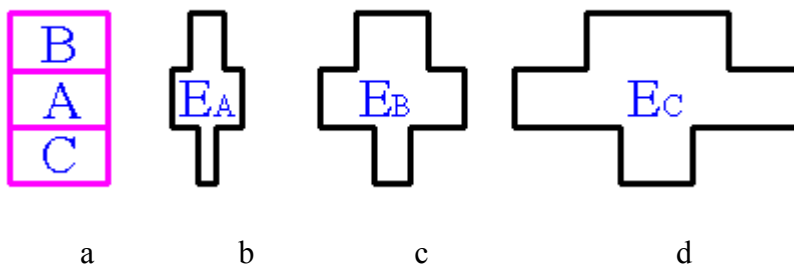
Šių formų įtempimų analitinių skaičiavimų rezultatai (pagal 2.5 – 2.11 formules) pateikti priedo 16 lentelėje (priėmiau, kad $F = 10$ kN, $l = 0,5$ m).

4.2. BEM taikymas

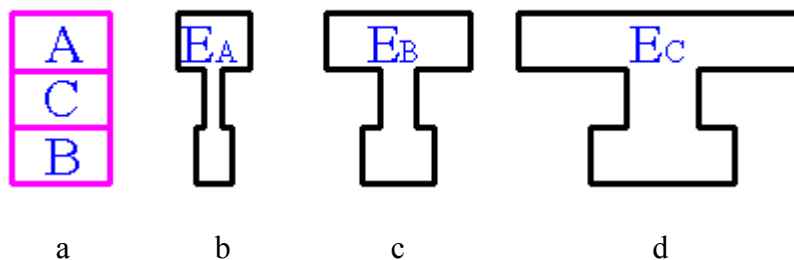
Analitinis skaičiavimas yra pats tiksliausias būdas, tačiau labai daug laiko sugaištama skaičiuojant analitiniu būdu. Išėjis yra – galima taikyti baigtinių elementų metodą. Yra nemažai BEM programinių paketų, pavyzdžiui *Stardyne* (juo įtempimų būvio tyrimus atliko D. Garuckas), *Ansys* (juo įtempimų būvio tyrimus atliko A. Sabaliauskas). Aš pasirinkau *Mechanical Desktop 6 / 3D FEA* (Finite Element Analysis). Šiuo paketu galima atlikti vienasluoksnius, bet kokios formos, plokščios ir erdvinės konstrukcijos įtempimų skaičiavimus. Kadangi mano nagrinėtos konstrukcijos yra sudarytos iš trijų skirtingų medžiagų, tai norėdama pasinaudoti *3D FEA*, pirmiausia pritaikiau S. P. Timošenko redukuoto skerspjuvio metodą: vieno sluoksnio matmenis palikau tuos pačius, o kitų dviejų redukavau (sluoksnio plotį didinau arba mažinau tiek kartų, koks buvo tamprumo modulių santykis) (žr. 1.4 skyrių). Kadangi konstrukciją sudaro trys skirtingos medžiagos, tai galima vieną konstrukciją redukuoti trim būdais. 4.1 pav. pateiktoms trisluoksnioms konstrukcijoms 4.2 pav., 4.3 pav., 4.4 pav. pateikti redukuoti skerspjuviai.



4.2 pav. Trisluoksnės (A – B – C) (a) ir vienasluoksnės konstrukcijos skerspjūvis, kai konstrukcija sudaryta iš A (b); iš B (c); iš C medžiagos (d)



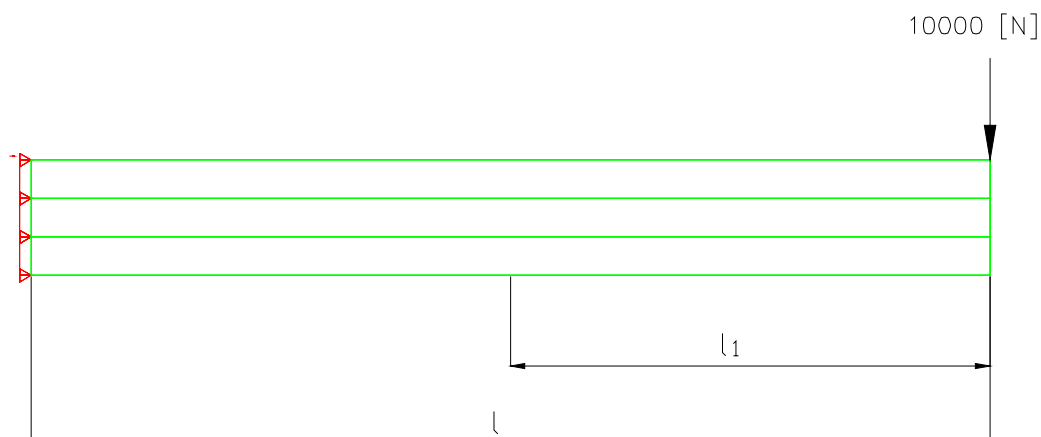
4.3 pav. Trisluoksnės (C – A – B) (a) ir vienasluoksnės konstrukcijos skerspjūvis, kai konstrukcija sudaryta iš A (b); iš B (c); iš C medžiagos (d)



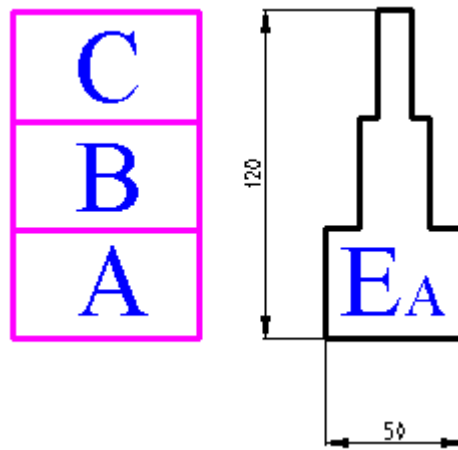
4.4 pav. Trisluoksnės (B – C – A) (a) ir vienasluoksnės konstrukcijos skerspjūvis, kai konstrukcija sudaryta iš A (b); iš B (c); iš C medžiagos (d)

Sijos matmenys skirsis kiekvienu atveju (dėl to, kad yra redukuotas skerspjūvis), tik nepakis aukštis ($h = 120 \text{ mm}$) ir sijos ilgis ($l = 1000 \text{ mm}$).

Veikiančius įtempimus nagrinėjau atstumu $l_1 = 500 \text{ mm}$ (4.5 pav.).



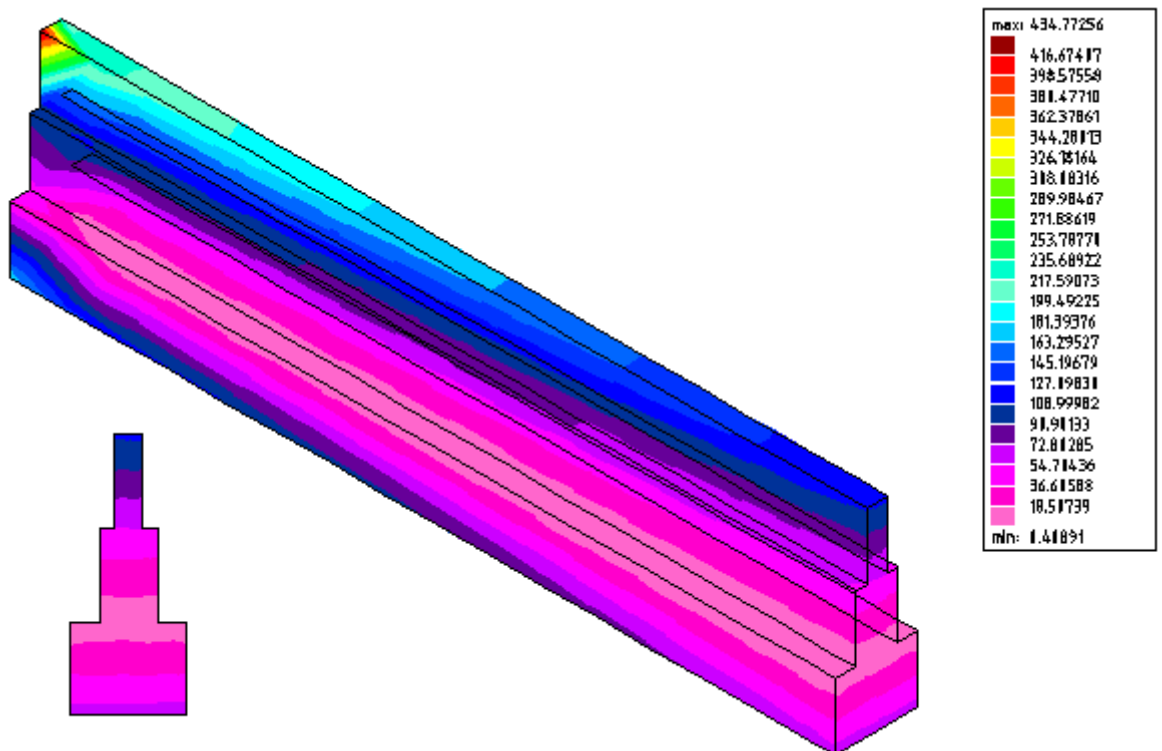
4.5 pav. Sijos, skaičiuojant BEM, įtvirtinimo schema



a

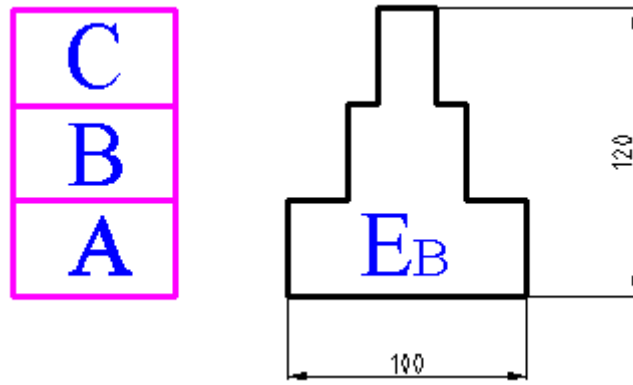


b

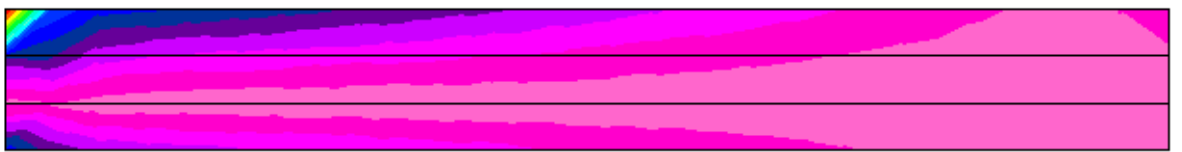


c

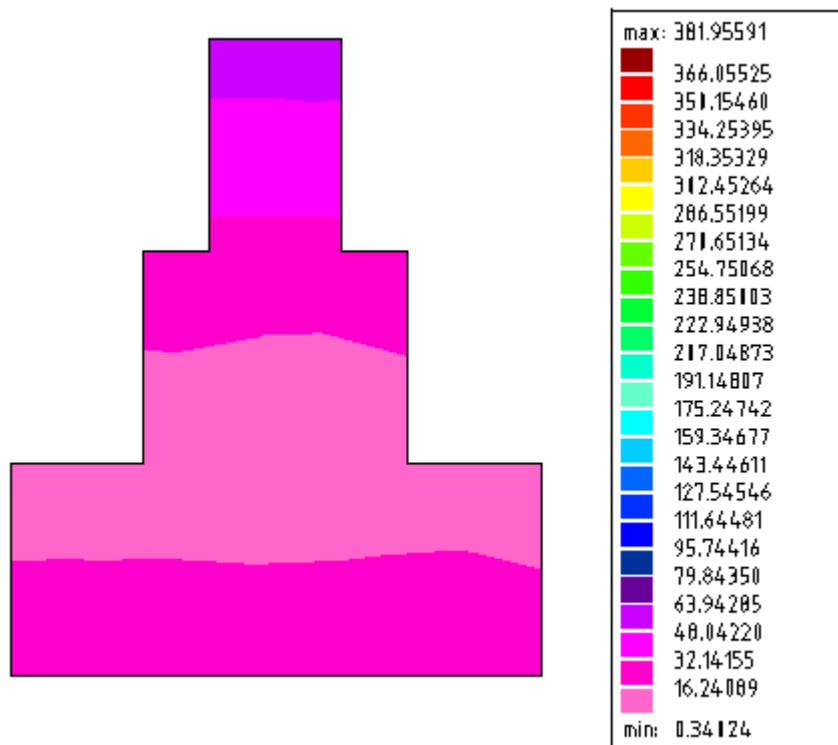
4.6 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija A – B – C , redukuota pagal A) (a)
ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai (b, c)



a

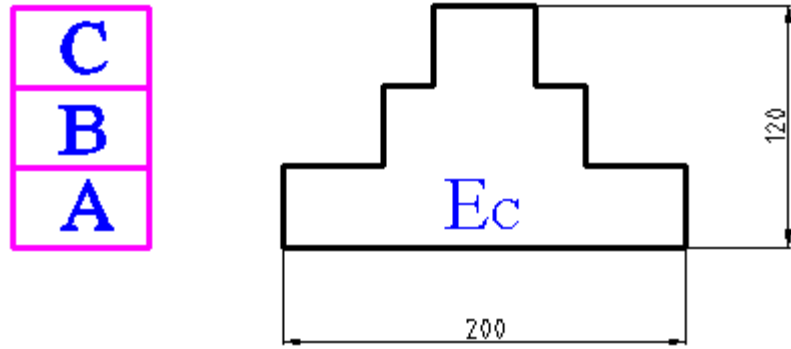


b

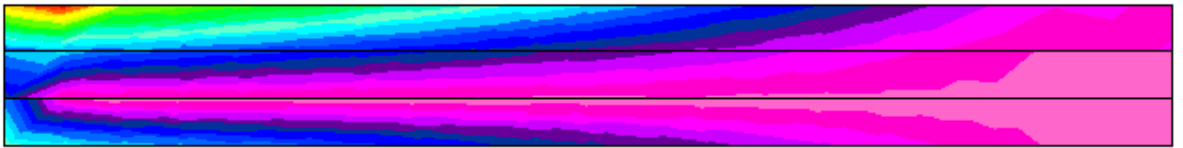


c

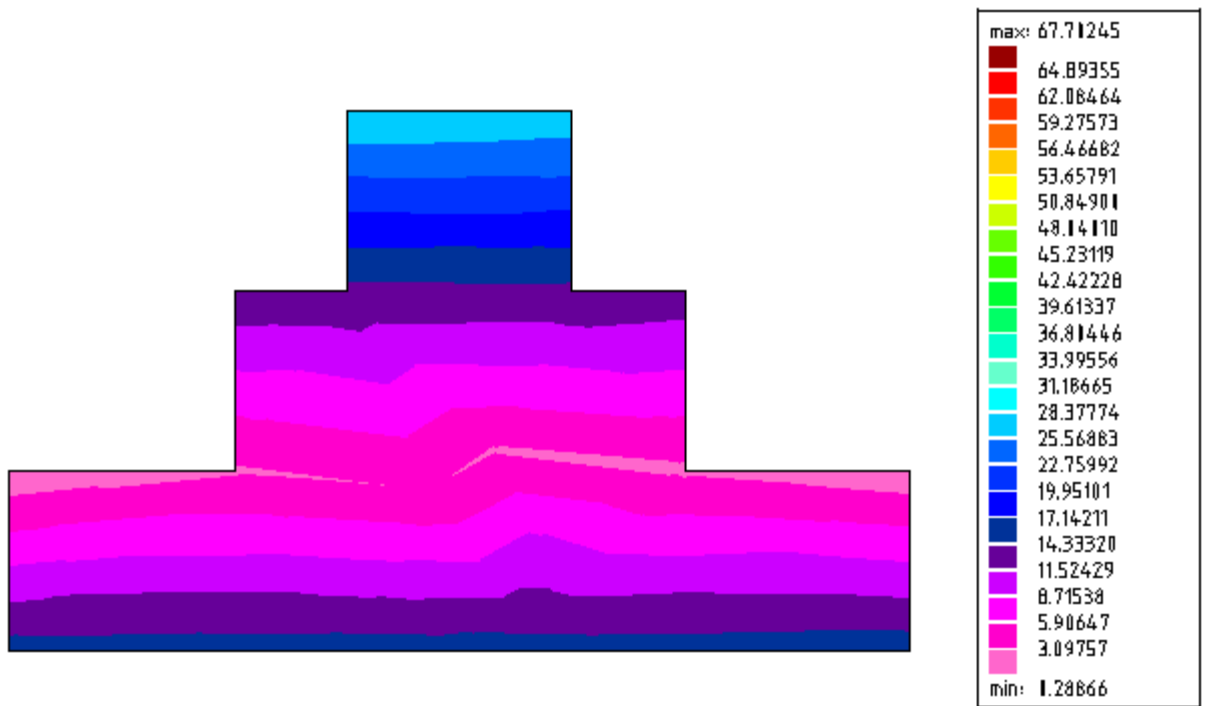
4.7 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija A – B – C , redukuota pagal B) (a) ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai (b, c)



a

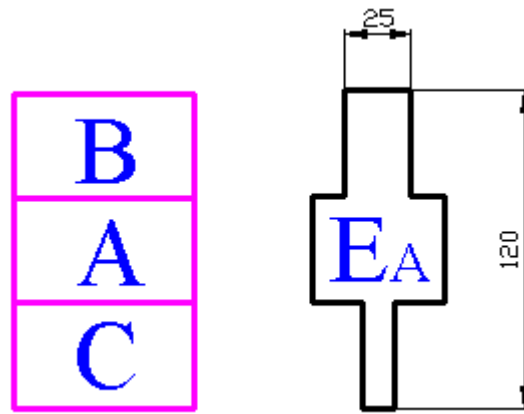


b

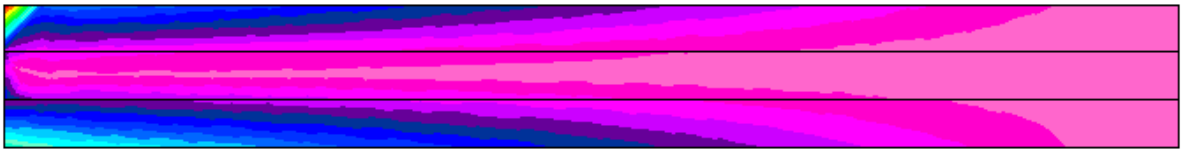


c

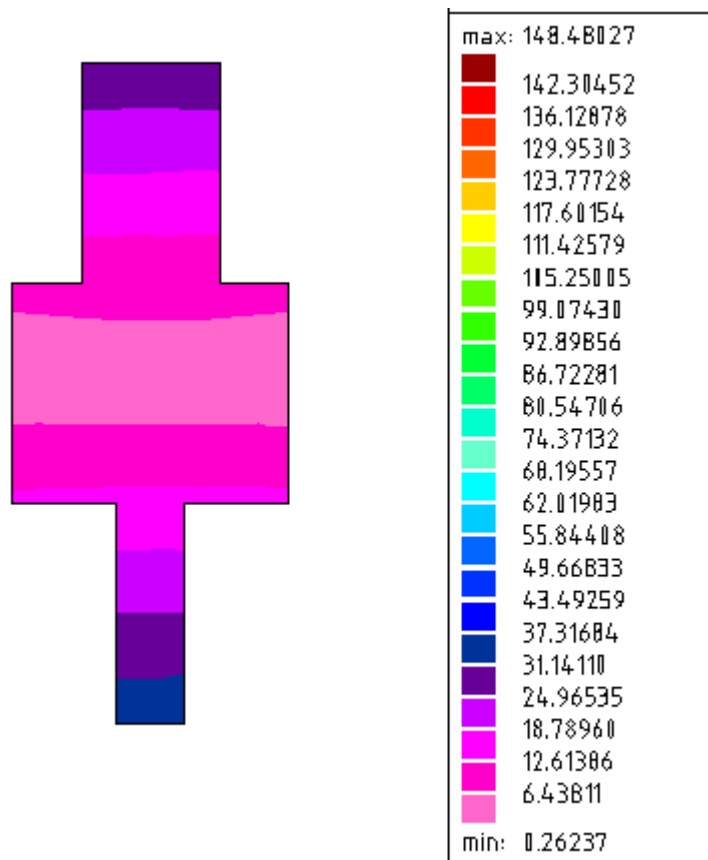
4.8 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija A – B – C , redukuota pagal C) (a)
ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai (b, c)



a

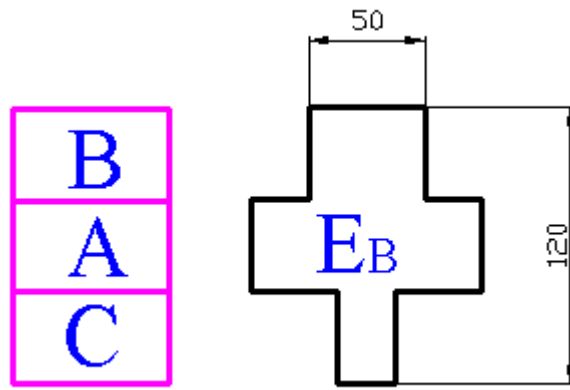


b



c

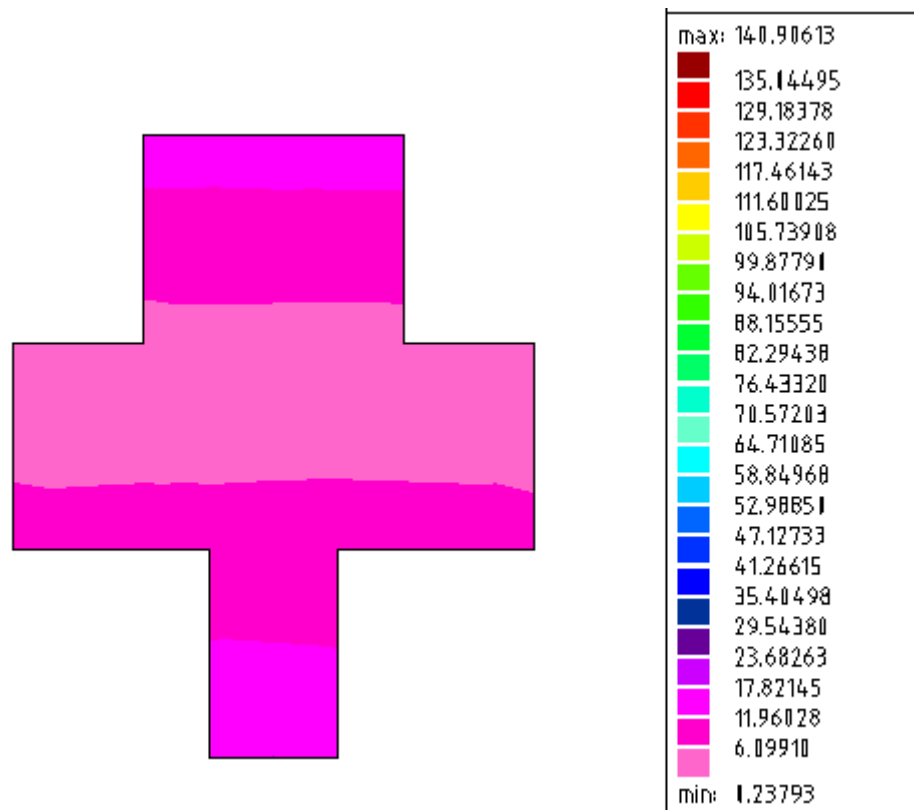
4.9 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija C – A – B , redukuota pagal A) (a)
ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai (b, c)



a

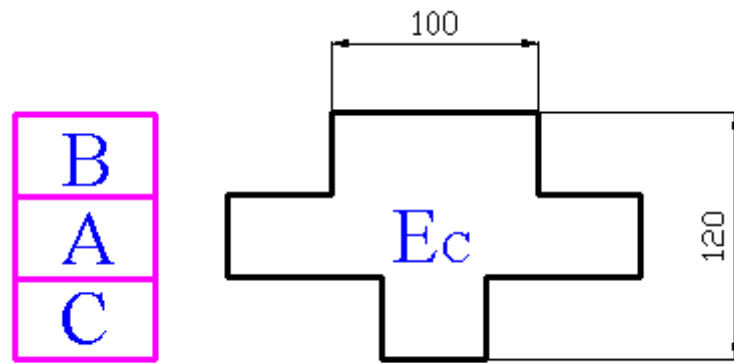


b

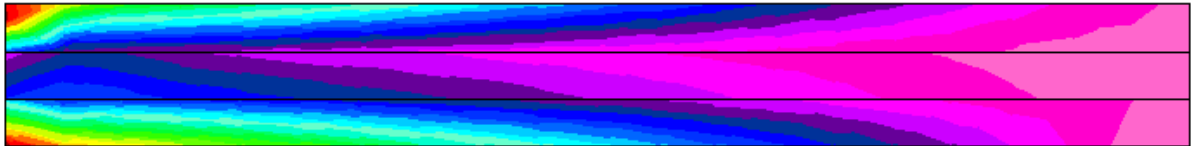


c

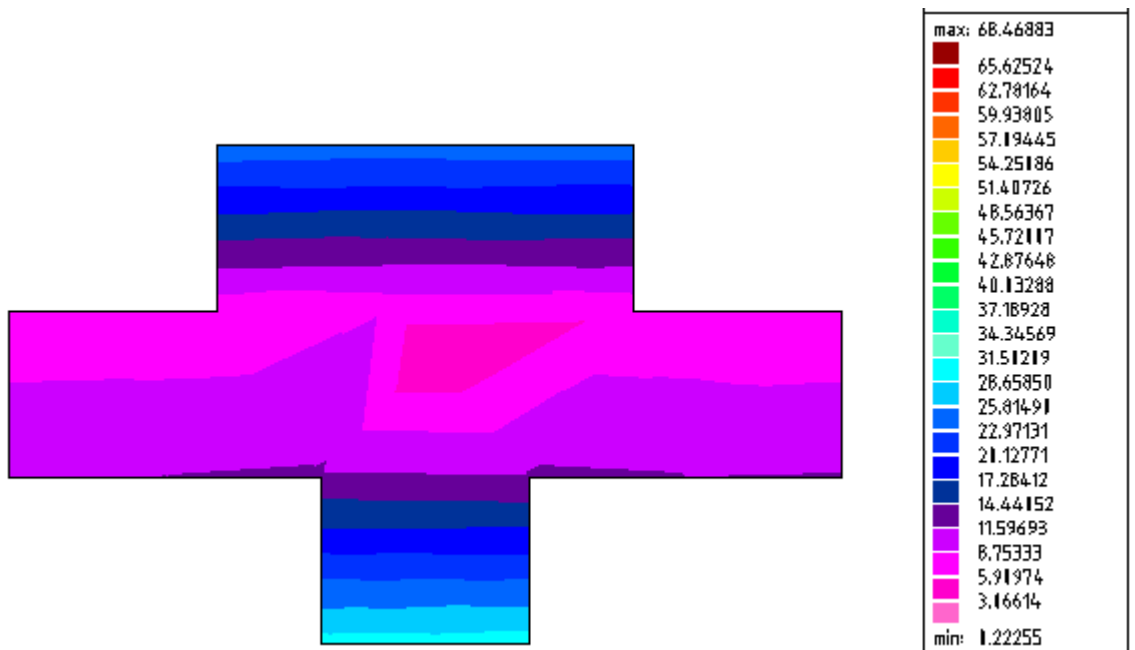
4.10 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija C – A – B , redukuota pagal B) (a)
ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai (b, c)



a

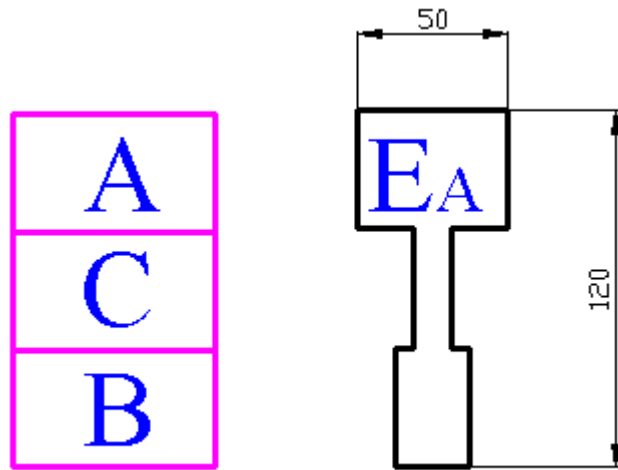


b

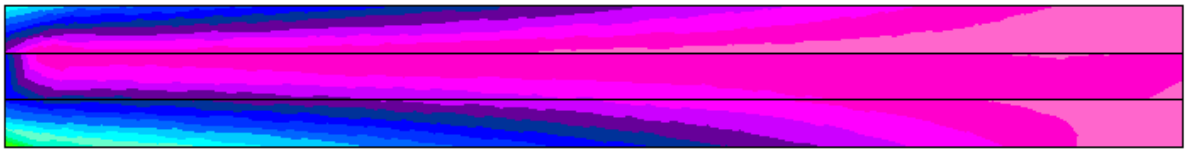


c

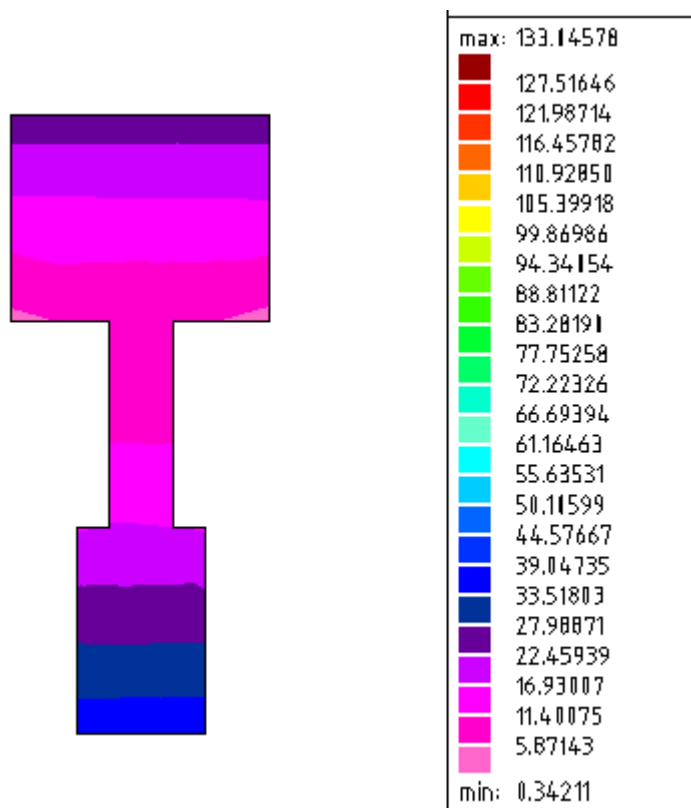
4.11 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija C – A – B , redukuota pagal C) (a)
ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai (b, c)



a

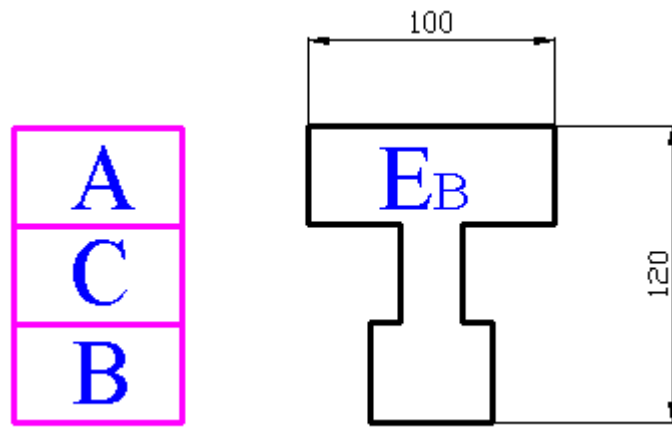


b

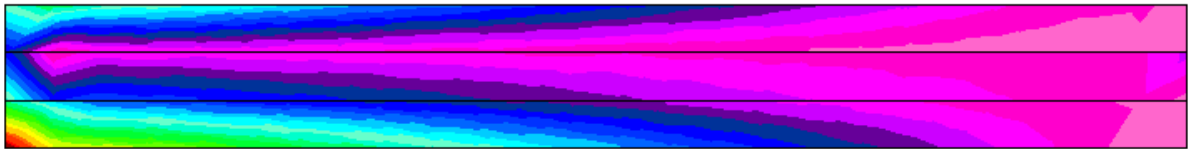


c

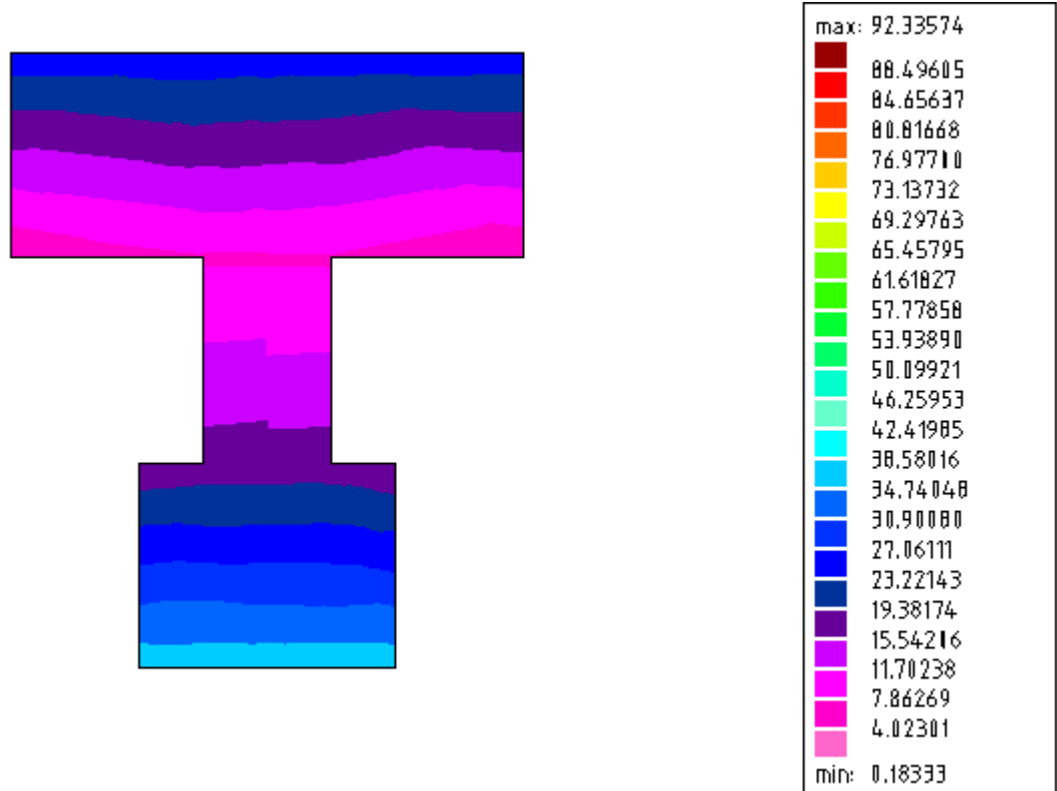
4.12 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija B – C – A , redukuota pagal A) (a)
ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai (b, c)



a

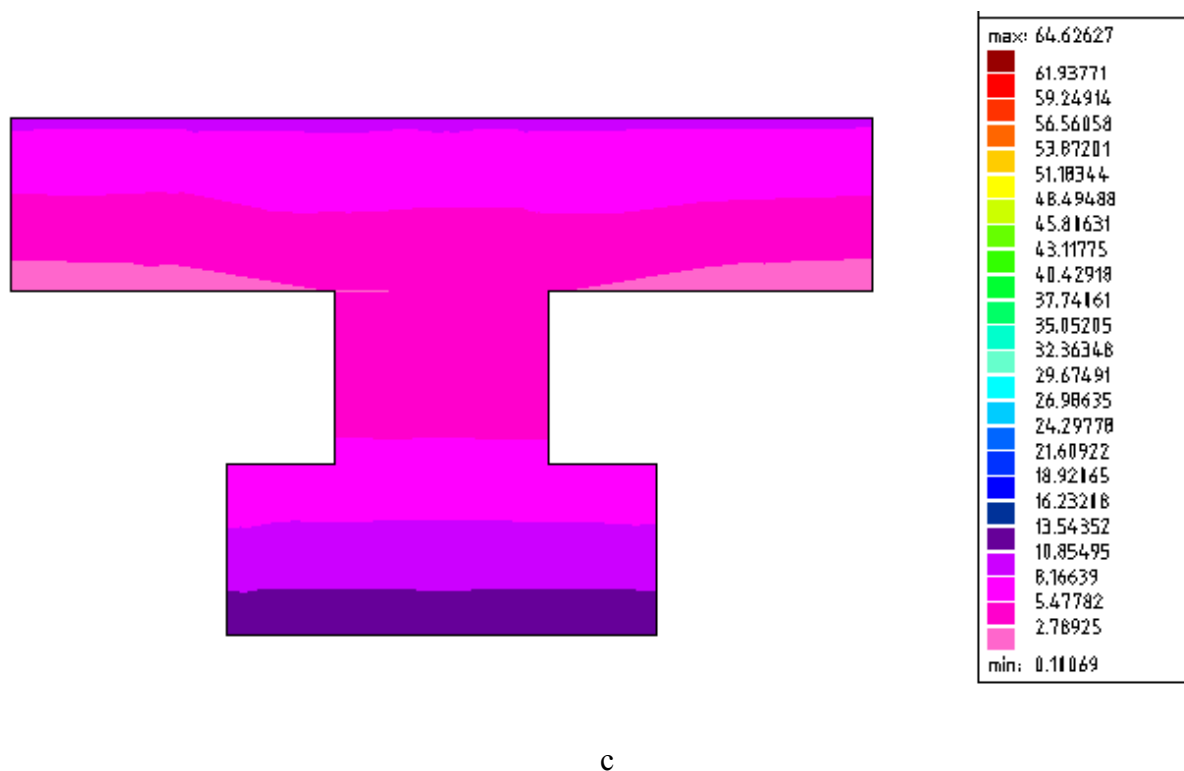
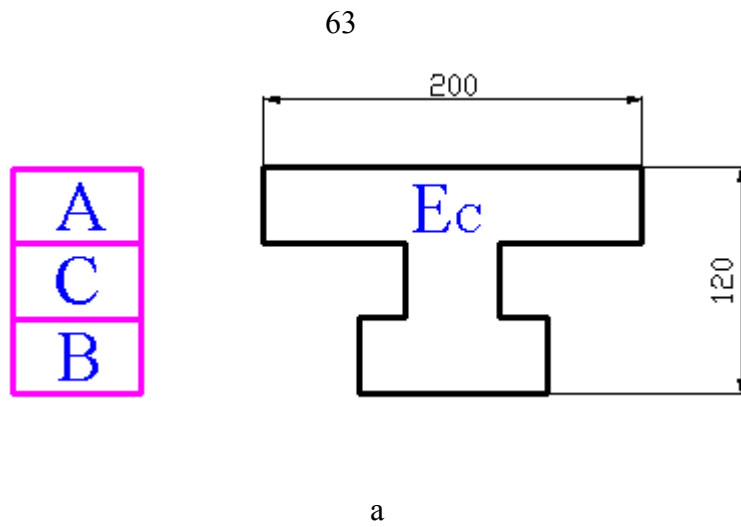


b



c

4.13 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija B – C – A , redukuota pagal B) (a)
ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai (b, c)



4.14 pav. Konstrukcinio elemento modelis (konstrukcija B – C – A , redukuota pagal C) (a)
ir įtempimo σ_x pasiskirstymo laukai (b, c)

4.3. Analitinio skaičiavimo ir BEM rezultatų palyginimas

Normalinių įtempimų reikšmių, gautų BEM ir analitine DKE skaičiavimo metodika palyginimas pateiktas 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė

Asimetrinių A – B – C, C – A – B, B – C – A konstrukcinių elementų įtempimų σ_x reikšmės, gautos pagal analitinę DKE skaičiavimo metodiką ir BEM, esant grynajam lenkimui

σ_x , [MPa]	BEM			Analitinis	Santykinis skirtumas, %		
	A – B – C				E _A	E _B	E _C
	E _A (iš medžiagos A)	E _B (iš medžiagos B)	E _C (iš medžiagos C)				
Taškas 1 (σ_{x11})	72,8	32,1	17,1	62,3	16	48	72
Taškas 2 (σ_{x12})	18	16,24	3,1	4,16	76	74	25
Taškas 3 (σ_{x21})	18	16,24	4	2,1	88	87	47
Taškas 4 (σ_{x22})	54	32,1	14,3	27	50	16	47
Taškas 5 (σ_{x31})	72,8	32,1	14,3	13,5	81	58	5
Taškas 6 (σ_{x32})	127	63,9	28,3	28	77	56	1
	C – A – B			Analitinis	E _A	E _B	E _C
	E _A (iš medžiagos A)	E _B (iš medžiagos B)	E _C (iš medžiagos C)				
Taškas 1 (σ_{x11})	37,3	17,82	31,5	29,8	20	40	5
Taškas 2 (σ_{x12})	18,8	11,9	12,3	11,7	37	1,6	4,8
Taškas 3 (σ_{x21})	17	11	11,6	46,7	64	76	75
Taškas 4 (σ_{x22})	12	6	8,75	26	53	77	66
Taškas 5 (σ_{x31})	12,6	6,1	9	13	3	53	30
Taškas 6 (σ_{x32})	31,1	17,82	23	49,3	36	63	53
	B – C – A			Analitinis	E _A	E _B	E _C
	E _A (iš medžiagos A)	E _B (iš medžiagos B)	E _C (iš medžiagos C)				
Taškas 1 (σ_{x11})	39,04	38,6	17,8	37,1	4,9	3,8	52
Taškas 2 (σ_{x12})	22,5	19,38	10,2	16,3	27	15	37
Taškas 3 (σ_{x21})	16,9	18	8	8,17	51	54	2
Taškas 4 (σ_{x22})	11,4	10	3	2,6	79	77	3
Taškas 5 (σ_{x31})	5,87	7,86	2,6	8,91	34	11	70
Taškas 6 (σ_{x32})	28	27,1	12,8	50,5	45	46	74

Iš 4.1 lent. matyti, jog santykinis skirtumas svyruoja nuo 1 % iki 88 %, t.y. skaičiuojant BEM gaunami labai dideli netikslumai. Tačiau įdomiausia tai, kad santykinis skirtumas neviršija 5 % ribos, kai skerspjūvis buvo redukuotas pasirenkant mažiausią tamprumo modulį turinčią medžiagą ir tuose taškuose, kurie priklauso tam pačiam mažiausią tamprumo modulį turinčios medžiagos sluoksniui.

Grynajam lenkimui D. Garuckas skaičiuodamas *Stardyne* gavo, jog santykinis skirtumas svyruoja nuo 2,2 % iki 6,9 % [8].

Taigi, daugiasluoksnių sijų stiprumo tyrimas atliekamas *3D FEA*, nors yra atliekamas pakankamai greitai, tačiau neduoda tikslių rezultatų. Paklaidos gaunamos ir todėl, kad reikia atlikti ir skerspjūvio redukavimą.

IŠVADOS IR SIŪLYMAI

1. Išnagrinėta neutralių sluoksnių padėties, standumo lenkimui bei įtempimų kitimo dėsningumai asimetriniuose daugiasluoksniuose konstrukciniuose elementuose priklausomai nuo sluoksnių skaičiaus, jų storių, išsidėstymo bei juos sudarančių medžiagų tamprumo modulių kitimo. Analizė atlikta naudojant analitines išraiškas ir BEM.
2. Asimetrinio trisluoksniu konstrukcinio elemento skerspjūvio neutralios ašies padėties koeficiento K_y reikšmės didėjant santykiniam sluoksnių storio koeficientui ψ_y artėja prie vieneto. Didėjant sluoksnių skaičiui, neutraliosios ašies padėtis artėja prie geometrinės skerspjūvio ašies, todėl K_y reikšmės taip pat artėja prie vieneto.
3. Sudarytos priklausomybės, aprašančios standumų D_x , D_y bei normalinio įtempimo σ_x kitimą asimetrinėse trisluoksniuose sijose, priklausomai nuo parametrų ψ_x , ψ_y . Kitimo intensyvumas priklauso nuo sluoksnių sudarančių medžiagų tamprumo modulių.
4. Nustatyta, jog asimetrinėse trisluoksniuose sijose esant sluoksnių skaičiui didesniai nei 15, sluoksnių išdėstymo tvarka neturi įtakos standumui D_x ir nėra tiesioginio ryšio tarp sluoksniu storio koeficiento K_y ir standumo D .
5. Nustatyta, jog didėjant asimetrinės trisluoksniu konstrukcijos sluoksnių skaičiui, visų sluoksnių normalinių įtempimų priklausomybės artėja prie tam tikros vidutinės įtempimo reikšmės, kuri kiekvienai medžiagai yra skirtinga.
6. Normalinio įtempimo σ_x priklausomybių nuo parametro ψ tyrimai rodo, jog didėjant sluoksnių storiui su mažesniu medžiagos tamprumo moduliu, įtempimų dydžiai išauga, o didėjant sluoksnių storiui su didesniu medžiagos tamprumo moduliu, įtempimų dydžiai sumažėja.
7. Nustatyta, jog redukuoto skerspjūvio metodo taikyto BEM negalima skaičiuoti sluoksniuotai konstrukcijai. Patvirtinta, kad lenkiamuose daugiasluoksniuose konstrukciniuose elementuose susidaro erdvinis įtempimų būvis, o pereinant iš sluoksniu į sluoksnių normaliniai įtempimai DKE kinta šuoliškai.

LITERATŪRA

1. Bareišis J. Konstrukcinių kompozitų statinis ir ciklinis stiprumas. Habilitacinio darbo santrauka. Kaunas: Technologija, 1995. 33 p.
2. Bareišis J. Konstrukcinis stiprumas ir patikimumas. II d. Panevėžys, 2003. 41 p.
3. Bareišis J. Daugiasluoksnių strypų standumas ir stiprumas / J. Bareišis, D. Garuckas // *Mechanika*. ISSN 1392 – 1207. 2000, nr. 4 (24), p.23 – 29.
4. Bareišis J. Daugiasluoksnių kompozicinių konstrukcinių elementų projektavimas (mokomoji knyga) / J. Bareišis, V. Paulauskas. Kaunas: Technologija, 1995. 48 p. ISBN 9986 – 13 – 305 – X.
5. Bulavs F. Model of nonlinearly deforming laminated material / F. Bulavs, I. Radinš, N. Tirans. Riga Technical University (Latvia) // *Strength, durability and stability of materials and structures. Proceedings of the 3rd international conference SDSMS'03*. Klaipėda, 2003. p. 24-34.
6. Čižas A. Medžiagų atsparumas. Konstrukcinių elementų mechanika. Vilnius: Technika, 1993. 408 p.
7. Feodosjevas V. Medžiagų atsparumas. Vilnius: Mokslas, 1977. 523 p.
8. Garuckas D. Sluoksniuotų kompozicinių konstrukcinių elementų stiprumo ir standumo tyrimas. Daktaro disertacija. Kaunas: Technologija, 2000. 109 p.
9. Kvedaras A. K. Vilnius Gediminas Technical University. The strength and stability evaluations of composite concrete – filled steel tubular structures // *Strength, durability and stability of materials and structures. Proceedings of the 3rd international conference SDSMS'03*. Klaipėda, 2003. p.102 - 116.
10. Požėla I. Deformacijos ir įtempiai daugiasluoksniuose dariniuose. Pagrindinės lygtys / I. Požėla, S. Tamulevičius, D. Girdauskienė. Iš *Medžiagotyra [interaktyvus]*. 1999, nr.3 (10) [žiūrėta 2003 04 27]. Prieiga per internetą: <http://www.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/medz/medz010.html>. ISSN 1392 – 1320.
11. Тимошенко С.П., Gere Д. Ж. Механика материалов. Москва: Мир, 1976. 669 с.
12. Vasiliauskiene L. Intelligent initial finite element mesh generation for solutions of engineering problems / L. Vasiliauskiene, R. Baušys. Vilnius Gediminas Technical University // *Modern building materials, structures and techniques. Abstracts of the 7th International Conference*. Vilnius. 2001. p. 301 – 302 .
13. Žiliukas A. Medžiagų mechanika. Kaunas: Technologija, 2001. 595 p. ISBN 9955 – 09 – 090 – 1.

PRIEDAS

1 lentelē

ψ		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
A – D – S _k	K_x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	K_y	1,333	1,377	1,423	1,47	1,517	1,564	1,61	1,64	1,634	1,537	1
S _k – A – D	K_x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	K_y	1,742	1,408	1,272	1,196	1,145	1,11	1,08	1,055	1,034	1,016	1
D – S _k – A	K_x	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	K_y	0,678	0,673	0,671	0,675	0,683	0,699	0,722	0,757	0,808	0,884	1

2 lentelē

ψ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
K_x	1	0,845	0,823	0,814	0,809	0,806	0,804	0,803	0,802	0,801	0,8
K_y	1	0,61	0,6	0,62	0,647	0,684	0,728	0,78	0,84	0,913	1
x_n	0,025	0,029	0,03	0,031	0,031	0,031	0,0311	0,0311	0,0312	0,0312	0,0312
y_n	0,06	0,098	0,099	0,097	0,093	0,088	0,082	0,077	0,071	0,066	0,06

3 lentelē

ψ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
K_x	1	0,611	0,6	0,62	0,65	0,68	0,73	0,78	0,84	0,91	1
K_y	1	1,23	1,27	1,296	1,31	1,316	1,322	1,326	1,329	1,33	1,33
x_n	0,025	0,041	0,042	0,04	0,039	0,037	0,034	0,032	0,03	0,027	0,025
y_n	0,06	0,048	0,047	0,046	0,0458	0,0455	0,0454	0,0453	0,0451	0,045	0,045

4 lentelē

A – D – S _k											
K_y	0,7	1,05	1,31	1,4	1,42	1,45	1,46	1,28	1,18	1,1	1
D_x	35440	17961	18664	197612	199042	203862	215101	251769	274044	339823	432000
S _k – A – D											
K_y	1,7	1,4	1,27	1,19	1,14	1,1	1,07	1,05	1,03	1,01	1
D_x	35440	49618	60185	72516	89850	114777	149632	196636	257950	335701	432000
D – S _k – A											
K_y	0,7	0,66	0,66	0,67	0,69	0,72	0,76	0,8	0,86	0,9	1
D_x	35440	56741	68758	80467	96381	119658	152924	198561	258832	335927	432000

5 lentelē

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
K_y															
A – D – S _k	1	1,9	1,5	0,97	1,19	1,19	0,98	1,1	1,12	0,98	1,07	1,09	0,99	1,06	1,07
S _k – A – D	1	0,8	1,2	1,17	0,9	1,08	1,1	0,94	1,05	1,07	0,96	1,04	1,05	0,97	1,04
D – S _k – A	1	0,7	0,7	0,89	0,93	0,81	0,94	0,96	0,86	0,95	0,98	0,89	0,96	0,98	0,91

6 lentelē

ψ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
D_x (kNm ²)											
A – D – S _k	234	229	224	217,7	208,5	195	176	150	116	72	11,52
S _k – A – D	35,44	49,6	60	72,5	89,9	114,8	149,6	196,6	257,9	335,7	432
D – S _k – A	72,2	69,8	73	81,3	94,1	110	127,4	143,6	155	157,2	144

7 lentelė

ψ_y	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
D_x [kNm ²]	11,5	31,6	32	33,9	40,5	54,1	76,4	109,3	154,4	213,4	288
D_y [kNm ²]	2	6,11	9,98	13,83	17,66	21,49	25,3	29,1	32,97	36,8	40,63

8 lentelė

ψ_x	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
D_x [kNm ²]	11,5	35,2	57,5	79,6	101,7	123,8	145,8	167,9	189,9	211,97	234
D_y [kNm ²]	2	5,48	5,56	5,88	7,03	9,38	13,3	18,97	26,8	37	50

9 lentelė

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D_x [kNm ²]															
A – D – S _k	432	72	215	387	205	201	304	208	198	270	206	197	253	205	197
S _k – A – D	144	234	78	142	279	166	167	255	182	177	241	189	182	232	191
D – S _k – A	12	35	85	40	78	168	109	116	184	136	136	189	151	148	191

10 lentelė

σ , [MPa] \ ψ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Taškas 1 (σ_{x11})	57,7	57	56,4	56,3	56,9	59	63,6	73,2	94,8	162,4	1562,5
Taškas 2 (σ_{x12})	19,2	13,6	7,8	1,6	5,1	12,9	22,8	37,3	63,8	137,5	1562,5
Taškas 3 (σ_{x21})	0,5	0,36	0,21	0,04	0,1	0,3	0,6	0,99	1,7	3,7	41,7
Taškas 4 (σ_{x22})	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7	2,1	2,7	3,5	4,9	8,3	41,7
Taškas 5 (σ_{x31})	6,4	9,8	13,3	17	21,3	26,5	33,3	43,4	61,3	103,9	520,8
Taškas 6 (σ_{x32})	32	33,3	34,7	36,4	38,6	41,9	46,9	55,4	71,6	112,3	520,8

11 lentelė

σ , [MPa] \ ψ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Taškas 1 (σ_{x11})	97,1	85,9	78,4	69,2	58,3	47,2	37,2	28,9	22,5	17,9	13,9
Taškas 2 (σ_{x12})	72,1	22,9	1,4	11,3	18,2	21	21,1	19,8	17,8	15,8	13,9
Taškas 3 (σ_{x21})	216,3	68,8	41,7	33,8	54,7	63,1	63,4	59,3	53,5	47,4	41,6
Taškas 4 (σ_{x22})	216,3	141,3	123,8	115,1	105,5	93,7	81	68,8	58,1	49,1	41,6
Taškas 5 (σ_{x31})	5,8	3,8	3,3	3,1	2,8	2,5	2,2	1,8	1,55	1,3	1,1
Taškas 6 (σ_{x32})	19,3	12,5	9,7	7,7	6	4,6	3,4	2,6	1,9	1,4	1,1

12 lentelė

σ , [MPa] \ ψ	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Taškas 1 (σ_{x11})	9,7	10,2	9,8	8,7	7,5	6,2	5,2	4,4	3,8	3,5	3,3
Taškas 2 (σ_{x12})	3,1	4	4,5	4,6	4,4	4,1	3,7	3,4	3,2	3,15	3,3
Taškas 3 (σ_{x21})	39,4	50,4	56,7	57,7	55	50,8	46,3	42,6	40,1	39,4	41,6
Taškas 4 (σ_{x22})	39,4	33,2	23,8	13,4	4,03	3,8	10,2	15,8	21,7	29,3	41,6
Taškas 5 (σ_{x31})	118,1	99,6	71,4	40,3	12,1	11,3	30,5	47,6	65,4	88	125
Taškas 6 (σ_{x32})	131	132,4	125,9	114,65	102,7	93	87	85,2	88,6	99,4	125

13 lentelė

$\sigma, [\text{Pa}] \backslash n$	3	6	9	12	15
Taškas 1 (σ_{x11})	56357243	75056292	81022244	83889278	85569332
Taškas 2 (σ_{x12})	547157,7	15245809	20402619	22987453	24533865
Taškas 3 (σ_{x21})	14590,8	406554,9	544069,8	612998,8	654236,4
Taškas 4 (σ_{x22})	1473678,1	1188391	1072453	1011050	973376,1
Taškas 5 (σ_{x31})	18420976	14854891	13405668	12638124	12167201
Taškas 6 (σ_{x32})	37024338	34791719	33612210	32938732	32512357

14 lentelė

$\sigma, [\text{Pa}] \backslash n$	3	6	9	12	15
Taškas 1 (σ_{x11})	65693726	33371382	31196230	30642100	30451530
Taškas 2 (σ_{x12})	14149418	9315686	9301081	9416333	9521233
Taškas 3 (σ_{x21})	42448254	27947059	27903242	28248999	28563699
Taškas 4 (σ_{x22})	112184670	44220029	37782205	35428303	34227191
Taškas 5 (σ_{x31})	2991591	1179201	1007525	944755	912725
Taškas 6 (σ_{x32})	7074152	3149579	2801256	2679212	5023271

15 lentelė

$\sigma, [\text{Pa}] \backslash n$	3	6	9	12	15
Taškas 1 (σ_{x11})	8328419,8	3535316	3031329	2843810	2746979
Taškas 2 (σ_{x12})	4569575	1632402	1287702	1149979	1075190
Taškas 3 (σ_{x21})	57119693	20405022	16096270	14374735	13439873
Taškas 4 (σ_{x22})	10134139	3381404	5699077	6798160	7457491
Taškas 5 (σ_{x31})	30402417	18144211	17097232	20394480	22372472
Taškas 6 (σ_{x32})	110554245	83503489	82483274	83913166	85064564

16 lentelė

$\sigma, [\text{MPa}] \backslash$ konstrukcija	A – B – C	C – A – B	B – C – A
Taškas 1	62,3	29,8	37,1
Taškas 2	4,16	11,7	16,3
Taškas 3	2,1	46,7	8,17
Taškas 4	27	26	2,6
Taškas 5	13,5	13	8,91
Taškas 6	28	49,3	50,5