

ELASTIC-PLASTIC ANALYSIS OF BISTEEL I-SECTION BEAMS

A. Jaras & R. Kačianauskas

To cite this article: A. Jaras & R. Kačianauskas (2001) ELASTIC-PLASTIC ANALYSIS OF BISTEEL I-SECTION BEAMS, *Statyba*, 7:2, 122-130, DOI: [10.1080/13921525.2001.10531713](https://doi.org/10.1080/13921525.2001.10531713)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/13921525.2001.10531713>



Published online: 30 Jul 2012.



Submit your article to this journal [↗](#)



Article views: 96



Citing articles: 1 View citing articles [↗](#)

BIMETALIŲ DVITĖJŲ SIJŲ BŪVIO ANALIZĖ, ĮVERTINANT PLASTINIŲ DEFORMACIJŲ ĮTAKĄ

A. Jaras, R. Kačianauskas

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

1. Įvadas

Šiuo metu pasaulyje ir Lietuvoje vyrauja pastatų iš metalo konstrukcijų statybos tendencijos [1, 2]. Lenkiamieji šių konstrukcijų elementai naudojami tiek formuojant naujas denginio ir perdangos konstrukcijas, tiek jas rekonstruojant. Daugeliu atvejų lenkiamosios konstrukcijos projektuojamos naudojant suvirinto arba valcuoto dvitėjo skerspjuvio elementus, pagamintus iš plieno, numatyto šalies gamintojos standarte. Tačiau dėl netolygaus įrašų ir įtempimų pasiskirstymo sijoje plieno laikomoji galia visiškai išnaudojama tik juostose ties viduriniąja sijos dalimi, o sienelėje ir skerspjuviuose, artimuose atramoms, įtempimai daug mažesni. Siekiant racionalesnio metalo panaudojimo yra sukurti keli šios problemos sprendimo būdai: formuoti kintamojo skerspjuvio (tarp jų su antdėklais) sijas; komponuoti bimetales dvitėjo skerspjuvio sijas, suvirintas iš skirtingo stiprumo plienų.

Įvairūs tyrimai [3–11] rodo, kad bimetalės sijos gali būti daug ekonomiškesnės už sijas, pagamintas iš vienodo stiprumo plieno. Dažniausiai pasitaiko šie dvitėjų bimetalinių sijų iš skirtingo stiprumo plienų tipai:

1. Bimetalės suvirintos dvitėjės sijos su padidinto stiprumo plieno tarpais labiausiai lenkiamoje sijos dalyje [11]. Šiuo atveju įvertinamas netolygus įrašų pasiskirstymas sijoje.

2. Bimetalės suvirintos dvitėjės sijos, kurių sienelė ir juostos yra iš skirtingo stiprumo plieno [7]. Šiuo atveju įvertinamas netolygus įtempimų pasiskirstymas sijos aukštyje.

3. Bimetalės suvirintos dvitėjės sijos su padidinto stiprumo plieno tarpais [6, 9] bei dvitėjės sijos su padidinto stiprumo plieno antdėklais [4, 5] labiausiai įtemptose sijos juostų srityse. Šiuo atveju įvertinamas netolygus įrašų bei įtempimų pasiskirstymas.

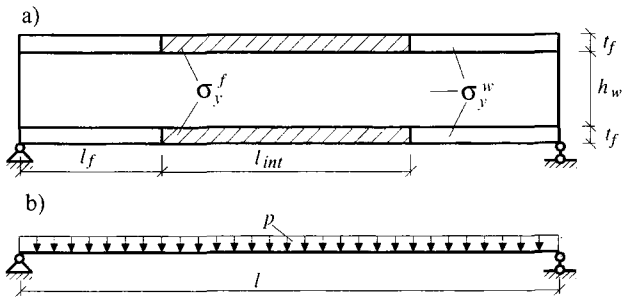
Tyrimai [11] rodo, kad pirmuoju atveju, kai labiausiai lenkiamose sijos srityse visas skerspjuvis sukomponuotas iš padidinto stiprumo plieno, gaunamas tik dalinis ekonominis efektas, nes lieka neišnaudota plieno laikomoji galia sienelėje. Kitais atvejais, ypač naudojant juostų tarpus arba antdėklus, metalas sijoje panaudojamas daug efektyviau.

Darbe nagrinėjamos bimetalės suvirintos dvitėjo skerspjuvio tampriai plastinės dviatramės sijos su padidinto stiprumo plieno tarpais labiausiai įtemptose juostų dalyse. Siekiant įvertinti jų būvį, gautos analizinės lenkimo momentų skaičiavimo išraiškos visiems plastinių deformacijų atsivėrimo ir plitimo bimetaliam dvitėjame skerspjuvyje atvejams bei analizinė sijos vidurio įlinkio skaičiavimo išraiška. Ištirtas plastinių deformacijų pasiskirstymas, jų gylio įtaka sijų stiprumui ir standumui bei juostų tarpų komponavimui. Nagrinėti įvairūs sijos ir juostų tarpų plieno stiprumo rodiklių deriniai. Analizinių išraiškų patikrai atliktas skaitinis eksperimentas naudojant BEM programinį paketą ANSYS. Bimetalė sija diskretizuota trimačiais dešimties mazgų tetraedro formos SOLID-92 tipo baigtiniais elementais. Palyginti skaitinio eksperimento ir analiziniai rezultatai.

2. Tyrimo objektas

Nagrinėjama dviatramė, dvitėjė sija, kurios labiausiai įtemptose juostų srityse įkomponuoti padidinto stiprumo (mažai legiruoto) plieno tarpai (1 pav. a). Sija apkrauta statine, tolygiai išskirstyta per visą sijos ilgį apkrova p (1 pav. b).

Nagrinėjamas skerspjuvis yra simetrinis, dvitėjis, suvirintas iš valcuotojo plieno lakštų. Kadangi juostų skerspjuvio kitimas bimetalėse sijose nėra efektyvus [9], laikoma, kad skerspjuvio matmenys visu sijos ilgiu yra pastovūs ir proporcingi dvitėjų sortimento matmenims.



1 pav. a) Bimetale dvitėje sija; b) skaičiuojamoji schema
Fig 1. a) I section bimetall beam; b) design scheme

Taip išlaikoma sąlyga, kad vietinis sienelės stabilumas būtų užtikrintas ir skersinės bei išilginės standumo briaunos sienelėje nėra reikalingos.

Esant fiksuotam sijos ilgiui, uždavinyje kinta sijos sienelės ir juostų tarpo plieno stiprumo rodikliai σ_y^w ir σ_y^f (1 pav. a); skerspjūvio matmenys b_f , t_f , h_w , t_w (2 pav. a); plastinių zonų gylis a (3 pav.); padidinto stiprumo plieno tarpų sijos juostose ilgis l_{int} (1 pav. a).

Tamprumo modulis E visiems nagrinėjamiems sijos sienelės ir tarpų plienams yra vienodas.

3. Teorinės prielaidos, uždavinio formulavimas

Straipsnyje apsiribojama geometriškai tiesine, mažų deformacijų plastiškumo teorija. Imamas idealus tampriai plastinis medžiagos deformavimosi modelis.

Plokščiųjų pjūvių hipotezė galioja. Laikoma, kad įtempimų būvis yra vienašis ir skersinių jėgų įtaka sijos stiprumui ir standumui nėra vertinama.

Bendroju atveju yra galimi tokie bimetalės sijos deformavimo tarpniai:

1. Sija deformuojama tampriai (2 pav. b).

Kadangi šiuo atveju toli gražu neišnaudojama padidinto stiprumo plieno laikomoji galia, šis atvejis nėra nagrinėjamas.

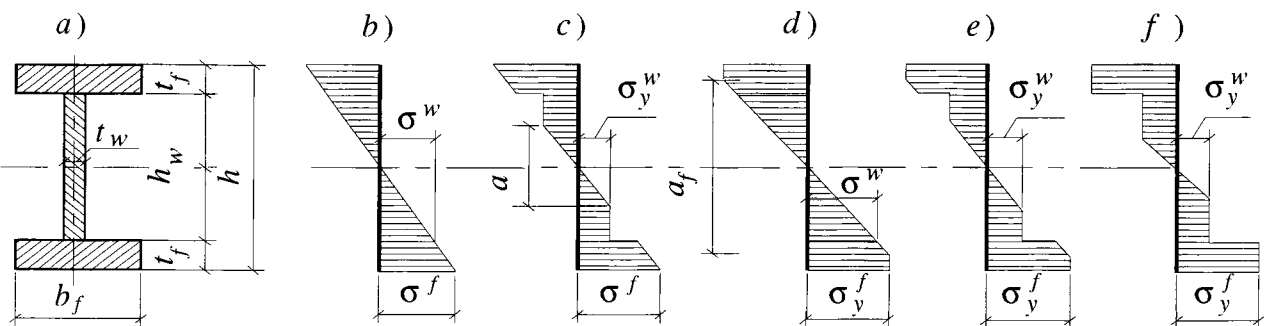
2. Leidžiamas dalinis plastinių deformacijų plitimas sijoje.

Sijose, pagamintose tik iš vienos rūšies konstrukcinio plieno, plastinių deformacijų atsivėrimo ir plitimo scenarijus deformavimo metu yra vienintelis ir viena-reikšmis. Pirmiausia plastinės deformacijos atsiranda kraštiniuose, labiausiai įtemptuose skerspjūvio sluoksniuose ir, didėjant apkrovai, skverbiasi į gilesnius.

Bimetalės sijos atveju plastinių deformacijų atsivėrimas dvitėjame skerspjūvyje priklauso nuo sijos sienelės ir juostų plienų stiprumo rodiklių santykio. Kai juostų tarpų plieno takumo riba daug didesnė už sienelės (t. y. $\sigma_y^f > \frac{h}{h_w} \sigma_y^w$), plastinio deformavimo metu plienas pirmiausia pradeda tekėti sienelėje (2 pav. c).

Priešingu atveju (t. y. $\sigma_y^f < \frac{h}{h_w} \sigma_y^w$) plienas pirmiau pradeda tekėti juostose (2 pav. d). Kitas plastinio deformavimo etapas parodytas 2 pav. e. Plastinėms deformacijoms plintant toliau, galiausiai prasideda racionaliusias bimetalės sijos skerspjūvio darbo etapas, kai juostos visiškai teka, o sienelėje pasireiškia ribotos plastinės deformacijos (2 pav. f).

Šie tampriai plastinio deformavimo modeliai yra reglamentuoti ir šiuo metu galiojančiose Statybos nor-



2 pav. Galimi plastinių deformacijų atsivėrimo ir plitimo bimetalės dvitėjės sijos skerspjūvyje atvejai: b) tamprus darbas; c) plastinės deformacijos tik sienelėje; d) plastinės deformacijos tik juostose; e) ribotos plastinės deformacijos ir juostose, ir sienelėje; f) ribotos plastinės deformacijos sienelėje, kai juostos visiškai teka

Fig 2. The cases of appearing and penetration of plastic strain in I-section bimetall beams: b) elastic stage; c) plastic strain in web; d) plastic strain in flanges; e) limited plastic strain both in flanges and in web; f) limited plastic strain in web, and the full plasticity of flanges

mose ir taisyklėse (SNirT): skaičiuojant plienines konstrukcijas, įvertinant fizinius netiesiškumus, leidžiama taikyti mažų plastinių deformacijų teoriją esant paprastam apkrovimui [8]. Šios normos rekomenduoja, skaičiuojant tampriai plastinių konstrukcijų stiprumą, atitinkamoms konstrukcijų grupėms taikyti du plastinių deformacijų atskaitos kriterijus:

- maksimalių įtempimų (kai leidžiamos plastinės deformacijos tik sienelėje, 2 pav. c);
- ribotų plastinių deformacijų (kai leidžiamos plastinės deformacijos juostose ir sienelėje 2 pav. f).

Pastaruju atveju pasiekiamas didesnis konstrukcinių medžiagų stiprumo rodiklių išnaudojimas, kuris bimetinės sijos atveju yra ypač efektyvus.

Praktiškai yra galimi visi keturi plastinių deformacijų atsivėrimo ir plitimo atvejai (2 pav. c–f). Todėl, atliekant bimetalinių sijų įtempimų-deformacijų būvio analizę, reikalingos analizinės priklausomybės sijos stiprumui ir standumui skaičiuoti kiekvienu tampriai plastinio deformavimo etapu (2 pav. c–f).

4. Analizinis plastinių deformacijų įvertinimas

Skaičiuojant sijas, jų laikomąją galią apibūdina du rodikliai: ribinis lenkimo momentas M ir maksimalus įlinkis u . Tampriai plastinio deformavimo metu abu minėti rodikliai (M , u) priklauso nuo plastinių zonų pasiskirstymo.

Analizinėms lenkimo momentų formulėms gauti kiekvienam plastinio deformavimo atvejui yra užrašomos integralinės lenkimo momentų išraiškos [12, 13]:

$$M = \int_A \sigma y dA. \quad (1)$$

Bendruoju atveju šis integralas susideda iš narių, įvertinančių tampriąsias ir plastines sijos skerspjūvio sritis. Tuo atveju, kai plastinės deformacijos atsiveria tik sienelėje (2 pav. c) integralinę lenkimo momento išraišką sudaro trys integralai, išreiškiantys tampriąją, plastinę sienelės bei tampriąsias juostų sritis:

$$M_c = 2 \int_0^{a/2} \sigma_y^w \frac{y}{a/2} y dy t_w + 2 \int_{a/2}^{h_w/2} \sigma_y^w y dy t_w + 2 \int_{h_w/2}^{(h_w/2)+t_f} \sigma_y^f y dy b_f. \quad (2)$$

Atsižvelgiant į tiesinį įtempimų kitimo dėsnį, įtempimus juostose ir tampriojoje sienelės dalyje galima išreikšti per sienelės plieno stiprumo rodiklį σ_y^w . Tada išraiška (2) atrodo taip:

$$M_c = 2 \int_0^{a/2} \sigma_y^w \frac{y}{a/2} y dy t_w + 2 \int_{a/2}^{h_w/2} \sigma_y^w y dy t_w + 2 \int_{h_w/2}^{(h_w/2)+t_f} \sigma_y^w \frac{y}{a/2} y dy b_f. \quad (3)$$

Įvertinant tampriąsias bei plastines dvitėjos skerspjūvio sritis, užrašomos integralinės lenkimo momentų išraiškos ir kitiems plastinio deformavimo atvejams (2 pav. d–f):

$$M_d = 2 \int_0^{h_w/2} \sigma_y^f \frac{y}{a_f/2} y dy t_w + 2 \int_{h_w/2}^{a_f/2} \sigma_y^f \frac{y}{a_f/2} y dy b_f + 2 \int_{a_f/2}^{(h_w/2)+t_f} \sigma_y^f y dy b_f, \quad (4)$$

$$M_e = 2 \int_0^{a/2} \sigma_y^w \frac{y}{a/2} y dy t_w + 2 \int_{a/2}^{h_w/2} \sigma_y^w y dy t_w + 2 \int_{h_w/2}^{a_f/2} \sigma_y^f \frac{y}{a_f/2} y dy b_f + 2 \int_{a_f/2}^{(h_w/2)+t_f} \sigma_y^f y dy b_f, \quad (5)$$

$$M_f = 2 \int_0^{a/2} \sigma_y^w \frac{y}{a/2} y dy t_w + 2 \int_{a/2}^{h_w/2} \sigma_y^w y dy t_w + 2 \int_{h_w/2}^{(h_w/2)+t_f} \sigma_y^f y dy b_f. \quad (6)$$

Integralines išraiškas 3–6 suintegravus kompiuterine matematine sistema MATHEMATICA [14], yra gautos analizinės sijos lenkimo momentų skaičiavimo formulės kiekvienu bimetalės dvitėjos sijos plastinio deformavimo atveju (2 pav. c–f):

$$M_c = \sigma_y^w t_w \frac{a^2}{6} + \sigma_y^w t_w \left(\frac{h_w^2}{4} - \frac{a^2}{4} \right) + \sigma_y^w \frac{4b_f}{3a} \left(\left(\frac{h_w}{2} + t_f \right)^3 - \frac{h_w^3}{8} \right), \quad (7)$$

$$M_d = \sigma_y^f t_w \frac{h_w^3}{6 a_f} + \sigma_y^f \frac{b_f}{a_f} \left(\frac{a_f^3}{6} - \frac{h_w^3}{6} \right) + \sigma_y^f b_f \left(\frac{h_w^2}{4} + h_w t_f + t_f^2 - \frac{a_f^2}{4} \right), \quad (8)$$

$$M_e = \sigma_y^w t_w \frac{a^2}{6} + \sigma_y^w t_w \left(\frac{h_w^2}{4} - \frac{a^2}{4} \right) + \sigma_y^f \frac{b_f}{a_f} \times \left(\frac{a_f^3}{6} - \frac{h_w^3}{6} \right) + \sigma_y^f b_f \left(\frac{h_w^2}{4} + h_w t_f + t_f^2 - \frac{a_f^2}{4} \right), \quad (9)$$

$$M_f = \sigma_y^w t_w \frac{a^2}{6} + \sigma_y^w t_w \left(\frac{h_w^2}{4} - \frac{a^2}{4} \right) + \sigma_y^f b_f (t_f h_w + t_f^2), \quad (10)$$

čia t_w, h_w, b_f, t_f – dvitėjo skerspjūvio matmenys; σ_y^w, σ_y^f – sijos ir juostų plienų stiprumo rodikliai, atitinkantys jų takumo ribas.

Plastinių deformacijų gylis sienelėje bei juostose yra išreiškiamas per sienelės tampriosios zonos aukštį:

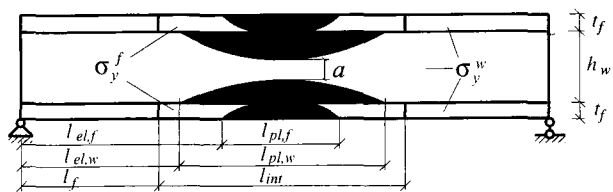
$$a = h_w c, \quad (11)$$

$$a_f = a \sigma_y^f / \sigma_y^w, \quad (12)$$

čia c – koeficientas, nusakantis tampriosios zonos aukštį, parenkamas kiekvienai formulei atskirai pagal jos galiojimo ribas.

Gautos išraiškos (7–10) tinka visoms bimetalėms dvitėjėms sijoms nepriklausomai nuo jų apkrovimo ir atrėmimo sąlygų. Jomis, imant ribotas plastines deformacijas, išreikštas per sienelės (juostų) tampriosios zonos aukštį a (a_f), galima apskaičiuoti lenkimo momentą M nagrinėjamame bimetalės dvitėjės sijos skerspjūvyje. Tada, atsižvelgiant į sijos apkrovimo ir parėmimo sąlygas, pagal žinomas medžiagų mechanikos išraiškas galima nustatyti ir šį lenkimo momentą atitinkančią apkrovą nagrinėjamo tipo sijoje.

Plastinėms deformacijoms plintant sijos skerspjūvyje susidaro plastinės zonos ir sijos ilgyje. Tai tiesiogiai lemia tyrimo metu nustatomą sijos standumo rodiklį – įlinkį (u) ir apibrėžia juostų tarpų ilgį (l_{int}). Dėl skirtingų sijos ir juostų tarpų plienų stiprumo rodiklių plastinių zonų išplitimo ribos bimetalės sijos juostose ir sienelėje yra skirtingos (3 pav.).



3 pav. Plastinių zonų bimetalėje sijoje vaizdas

Fig 3. The distribution of plastic strain of bisteel beam

Kraštiniai grynai tampriai dirbantys sijos juostų ir sienelės skerspjūviai nustatomi iš lenkimo momento pjūvyje, atstumu z nutolusiame nuo atramos ir tamprus lenkimo momento lygybės:

$$\frac{p l z}{2} - \frac{p z^2}{2} = M_{el}. \quad (13)$$

Gautos kvadratinės lygties sprendinys rodo kraštinės visiškai tampriai dirbančių sijos juostų ir sienelės skerspjūvių padėtis (3 pav.):

$$l_{el,f} = \frac{l}{2} \pm \frac{1}{2p} \sqrt{(pl)^2 - 8pM_{el}^f}, \quad (14)$$

$$l_{el,w} = \frac{l}{2} \pm \frac{1}{2p} \sqrt{(pl)^2 - 8pM_{el}^w}, \quad (15)$$

čia $M_{el}^f = \sigma_y^f \cdot W_{el}$ ir $M_{el}^w = \sigma_y^w \cdot \frac{I}{h_w/2}$ – lenkimo momentai iki atsirandant plastinėms deformacijoms atitinkamai juostose ir sienelėje; $p = \frac{8M}{l^2}$ – veikianti išskirstytoji apkrova; W_{el} – skerspjūvio tamprus atsparumo momentas; I – skerspjūvio inercijos momentas.

Tada plastinių zonų sienelėje ir juostose ilgiai bus:

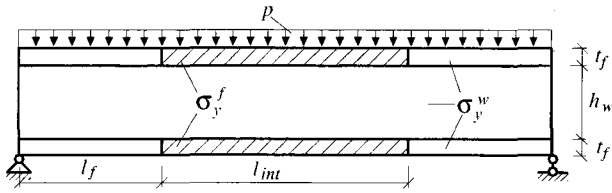
$$l_{pl,f} = l - 2l_{el,f} = \frac{1}{p} \sqrt{(pl)^2 - 8pM_{el}^f}, \quad (16)$$

$$l_{pl,w} = l - 2l_{el,w} = \frac{1}{p} \sqrt{(pl)^2 - 8pM_{el}^w}. \quad (17)$$

Tiriant buvo laikomasi sąlygos, kad plastinės deformacijos sijos juostų ir jų tarpų suvirinimo siūlėse nėra leistinos (3 pav.). Tuo atveju juostų tarpų ilgis imamas pagal sijos plastinės zonos kraštus (4 pav.) ir nustatomas pagal išraišką:

$$l_{int} = l - 2l_f = \frac{1}{p} \sqrt{(pl)^2 - 8pM_{el}}, \quad (18)$$

čia $M_{el} = \sigma_y^w \cdot W_{el}$ – tamprus lenkimo momentas.



4 pav. Bimetale dvitėjė sija

Fig 4. I-section bisteel beam

Įvertinant gautas plastinių zonų sijos ilgyje ribas, užrašoma integralinė sijos vidurio įlinkio skaičiavimo išraiška:

$$u = 2 \int_0^{l_{el}} m \, d\alpha + 2 \int_{l_{el}}^{l/2} m \, d\alpha. \quad (19)$$

Įrašius tampriam bei tampriai plastiniam sijos ruožams atitinkamus narius [13] gaunama:

$$u = 2 \int_0^{l_{el,w}} \frac{1}{2} \frac{M}{EI} z \, dz + 2 \int_{l_{el,w}}^{l/2} \frac{1}{2} \frac{\sqrt{n} \frac{M_{el}}{EI}}{\sqrt{m - \frac{M}{M_{el}}}} z \, dz. \quad (20)$$

Išraišką suintegravus kompiuterinės matematikos sistema MATHEMATICA [14], gauta analizinė bimetalės dvitėjės sijos vidurio įlinkio skaičiavimo išraiška, kurios du pirmieji nariai įvertina tampriųjų, o trečiasis – tampriai plastinio sijos ruožų darbą:

$$u = \frac{l p l_{el}^3}{6 EI} - \frac{p l_{el}^4}{8 EI} + \frac{\sqrt{2 n M_{el}^3}}{EI \sqrt{p}} [u_1 + u_2], \quad (21)$$

čia

$$u_1 = \sqrt{\frac{2 M_{el} m}{p} - \frac{l^2}{4}} - \sqrt{\left(l_{el} - \frac{l}{2}\right)^2 + \frac{2 M_{el} m}{p} - \frac{l^2}{4}},$$

$$u_2 = \frac{l}{2} \ln \frac{\sqrt{\frac{2 M_{el} m}{p} - \frac{l^2}{4}}}{\left|l_{el} - \frac{l}{2} + \sqrt{\left(l_{el} - \frac{l}{2}\right)^2 + \frac{2 M_{el} m}{p} - \frac{l^2}{4}}\right|},$$

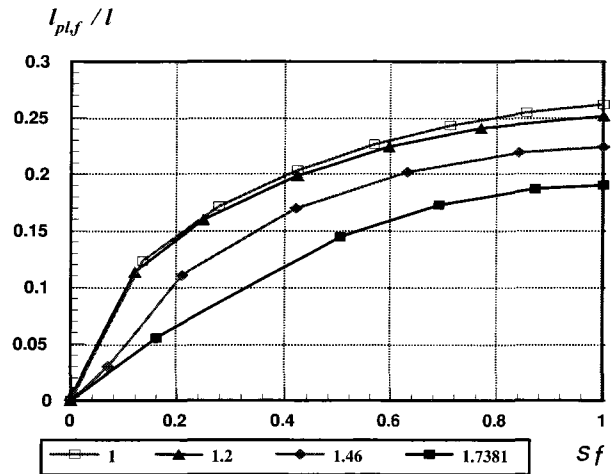
$n = m - 1 = \frac{M_{fp}}{M_{el}} - 1$; M_{fp} – visiškai plastinis lenkimo momentas; M_{el} – tamprus lenkimo momentas; p – apkrova, atitinkanti lenkimo momentą (7–10).

5. Plastinių deformacijų tyrimas

Gautos priklausomybės (7–10, 21) buvo pritaikytos tiriant plastinių deformacijų pasiskirstymą, jų įtaką stiprumui ir standumui bei juostų tarpų komponavimui dviatramės sijos, apkrautos išskirstytąja apkrova, atveju. Sukurta kompiuterinė programa *BTsija* (FORTRAN), kuri leidžia atlikti bimetalinių dvitėjų sijų būvio analizę visais plastinio deformavimo etapais. Apdorojus gautus rezultatus, jie pateikiami santykinė forma [15].

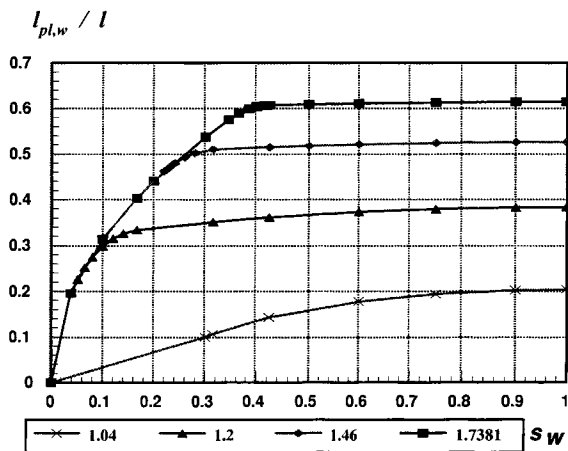
Atlikus analizinius skaičiavimus pasitvirtino inžinerinėje praktikoje žinoma tiesa, kad sijose, kurių juostos ir sienelė yra iš skirtingo stiprumo plieno, plastinių zonų išplitimo ribos yra skirtingos (3 pav.). Juostose su padidinto stiprumo plieno tarpais plastinės deformacijos išplinta mažiau negu sienelėje. Šis skirtumas yra proporcingas plienų stiprumo rodiklių santykiui. Esant vienodam plastinių deformacijų vidurinio sijos pjūvio juostose gyliui, plastinių zonų ribos juostose taip pat priklauso nuo tarpo plieno stiprumo rodiklių: kuo σ_y^f didesnis, tuo plastinių zonų juostose ilgis $l_{pl,f}$ mažesnis (5 pav.).

Priklausomybė tarp plastinių deformacijų išplitimo sienelės ilgyje ir gilyje (6 pav.) savo pobūdžiu atspindi tris bimetalės sijos plastinio deformavimo etapus (2 pav. c, e ir f).



5 pav. Priklausomybės tarp santykinio plastinių deformacijų išplitimo sijos juostose ilgio $l_{pl,f}/l$ ir santykinio maksimalių plastinių deformacijų juostose gylio $s_j = (h - a_j)/2 t_f$, esant skirtingiems juostų tarpų ir sijos plieno stiprumo rodiklių santykiams

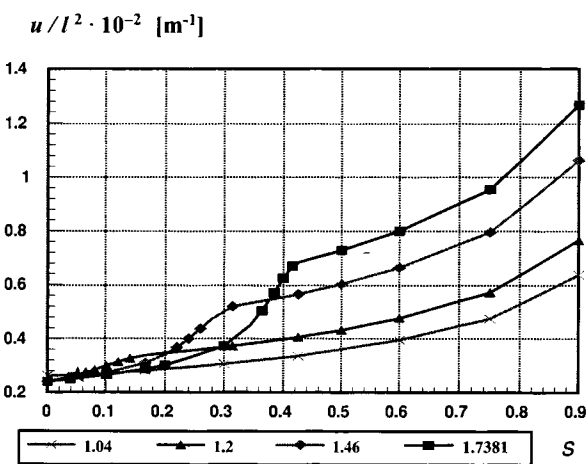
Fig 5. The diagram of relative extension of plastic strain along flanges and across middle section of bisteel beam, having different steel strength relations



6 pav. Priklausomybės tarp santykinio plastinių deformacijų išplitimo sijos sienelėje ilgio $l_{pl,w} / l$ ir santykinio maksimalių plastinių deformacijų sienelėje gylio $s_w = (h_w - a) / h_w$, esant skirtingiems juostų tarpų ir sijos plieno stiprumo rodiklių santykiams

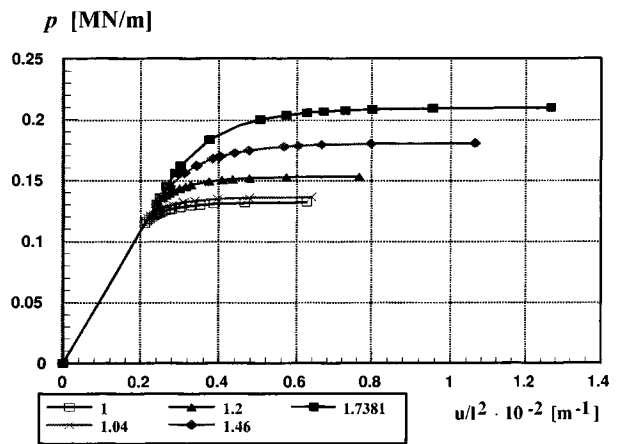
Fig 6. The diagram of relative extension of plastic strain along web and across middle section of bisteel beam, having different steel strength relations

Plastinio deformavimo metu sijos standumas kinta priklausomai nuo plastinių zonų išplitimo (7 pav.). Pradžioje, kol plastinės deformacijos plinta tik sienelėje (esant $\sigma_y^f > \frac{h}{h_w} \sigma_y^w$), įlinkis didėja lėtai. Pradėjus tekėti ir juostoms, įlinkių kitimo kreivė ima sparčiai kilti aukštyn ir, juostoms visai tekant (esant ribotoms plastinėms deformacijoms sienelėje), vėl stabilizuojasi.



7 pav. Priklausomybės tarp santykinio bimetinės sijos vidurio įlinkio u / l^2 ir santykinio maksimalių plastinių deformacijų sienelėje gylio $s = (h_w - a) / h_w$, esant skirtingiems juostų tarpų ir sijos plieno stiprumo rodiklių santykiams

Fig 7. The diagram of relative deflection u / l^2 and relative depth of plastic strain $s = (h_w - a) / h_w$ in the middle section of bisteel beams, having different steel strength relations



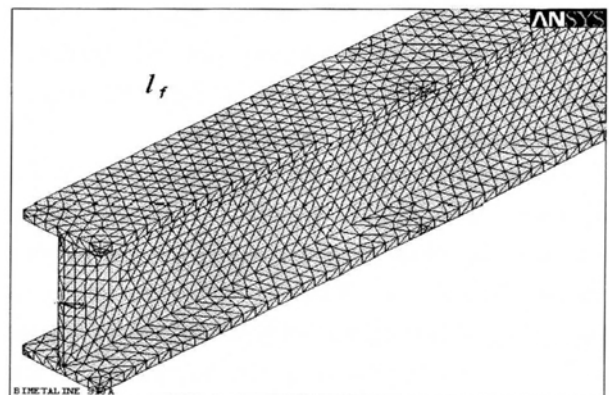
8 pav. Bimetinės sijos deformavimo diagrama, esant skirtingiems juostų tarpų ir sijos plieno stiprumo rodiklių santykiams

Fig 8. Diagram of bisteel beam deformation, having different steel strength relations

Tyrimo metu patvirtino žinoma tiesa, kad didėjant sijos juostų tarpų ir sienelės plienų stiprumo rodiklių santykiui gerėja sijos stiprumo ir standumo rodikliai (8 pav.).

6. Modelio tyrimas baigtinių elementų metodu

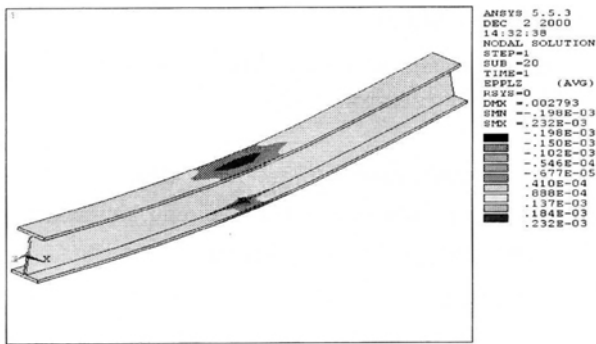
Siekiant patikrinti išvestų analizinių išraiškų teisingumą ir nustatyti jų galiojimo ribas, atliktas skaitinis eksperimentas. Tuo tikslu naudotas standartinis baigtinių elementų paketas ANSYS [16]. Tyrimo metu naudotas trimatis dešimties mazgų (su trimis laisvės laipsniais kiekviename mazge) tetraedro formos SOLID-92 tipo baigtinis elementas [17].



9 pav. Baigtinių elementų tinklas sijoje

Fig 9. The FEM mesh

Baigtinių elementų tinklas sijoje pateiktas 9 paveiksle. Išspręsti keli bimetalinių sijų pavyzdžiai, esant įvairiems sijos ir juostų tarpų plienų stiprumo rodiklių santykiams ($1 \leq \sigma_y^f / \sigma_y^w \leq 1,738$) bei plastinių zonų pasiskirstymams. Dėl 4 skyriuje priimtų sąlygų tai atitinka ir įvairius juostų tarpų ilgius. Gauti tyrimo rezultatai yra dvejoji. Kai juostų tarpų ilgis santykinai nėra didelis ($l_{int} / l \leq 0,5$), plastinės deformacijos pirmiausia atsiranda viduriniame sijos pjūvyje ir vėliau plinta į gretimuosius pjūvius (10 pav.). Taigi plastinio deformavimosi pobūdis sutampa su analizinio tyrimo rezultatais (3 pav.).



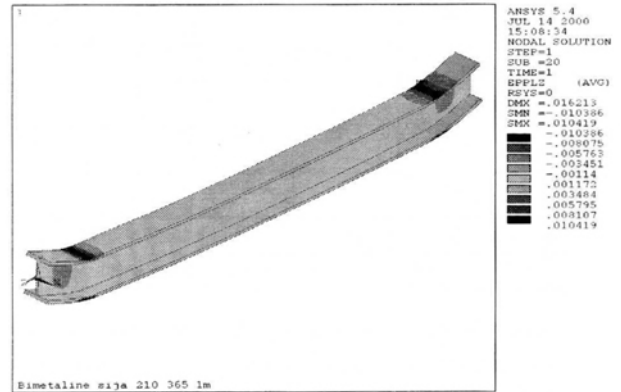
10 pav. Bimetalės sijos su trumpais padidinto stiprumo plieno tarpais juostose ($l_{int} / l \leq 0,6$) deformavimosi pobūdis

Fig 10. The type of plastic deformation of bisteel beam, having short flange insertions ($l_{int} / l \leq 0,6$)

Intarpų ilgiui viršijus pusę sijos ilgio, plastinio deformavimo pobūdis pradeda kisti. Toliau ilginant tarpus plastinės deformacijos pirmiausia atsiranda ties juostų tarpų sandūromis (11 pav.), o vidurinis sijos pjūvis lieka tamprus. Tuo atveju gaunami skaitinio eksperimento rezultatai labai skiriasi nuo analizinio skaičiavimo rezultatų (vidurio įlinkis u – iki 2,5 karto, o plastinių zonų pasiskirstymas – iš esmės).

Tiriant išvestų analizinių priklausomybių (7–10, 21) pagrįstumą, buvo atliktas sijos vidurio įlinkio reikšmių pagal skaitinio eksperimento ir analizinių skaičiavimų rezultatus palyginimas. Rezultatų tapatumas gautas tik esant palyginti nedideliu santykiniam juostų tarpų ilgiui $l_{int} / l \leq 0,6$. Tai iš esmės patvirtina tai, kad pateiktas analizinės išraiškas galima taikyti tamprai plastiškai lenkiamoms bimetalėms suvirintoms dvitėjo skerspjuvio sijoms su padidinto stiprumo plieno tarpais juostose skaičiuoti. Tačiau didėjant santykiniam

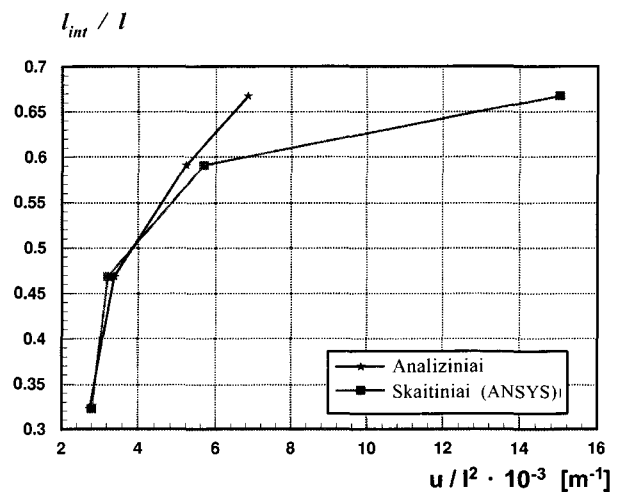
juostų tarpų ilgiui $l_{int} / l > 0,6$ sparčiai didėja atotrūkis tarp analizinių rezultatų ir reikšmių, gautų naudojant BE paketą ANSYS (12 pav.).



11 pav. Bimetalės sijos su ilgais padidinto stiprumo plieno tarpais juostose ($l_{int} / l \gg 0,6$) deformavimosi pobūdis

Fig 11. The type of plastic deformation of bisteel beam, having long flange insertions ($l_{int} / l \gg 0,6$)

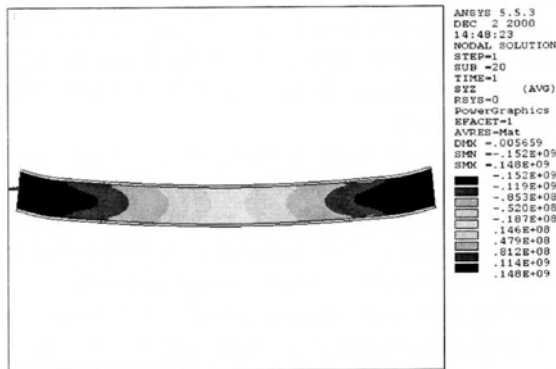
Tai galima paaiškinti taip: kadangi nagrinėjamu atveju lenkimas sijoje nėra grynasis, dėl skersinių jėgų poveikio skerspjuviuose, be normalinių, atsiranda ir tangentiniai įtempimai. Bendroju atveju sijose su didele anga jų galima nepaisyti. Tačiau bimetalėse sijose, didinant juostų tarpų ir sijos stiprumo rodiklių santykį



12 pav. Analizinių ir skaitinių sijos santykinio vidurio įlinkio u / l^2 rezultatų priklausomybė nuo santykinio juostų tarpo ilgio l_{int} / l

Fig 12. The diagram of analytical and experimental results of relative deflection u / l^2 and relative length of flange insertions l_{int} / l

didėja ir juostų tarpų ilgis. Taigi sijos juostų ir jų tarpų sandūroms artėjant prie atramų, didėja ir skersinių jėgų sukeltų tangentialių įtempimų įtaka sijų standumui (13 pav.), į kurią atliekant analizinius skaičiavimus nebuvo atsižvelgta.



13 pav. Tangentialių įtempimų pasiskirstymas bimetaliėje dvitėjęje sijoje

Fig 13. The distribution of shear stresses in the bisteel beam

Taigi imant tampriosios zonos aukštį pagal išraiškas (11) ir (12) bei vadovaujantis išankstine sąlyga dėl plastinių deformacijų sijos juostų ir jų tarpų suvirinimo siūlėse neleistinumo, juostų tarpų ilgis l_{int} priklauso nuo plieno stiprumo rodiklių santykio σ_y^f / σ_y^w . Jam didėjant, ilgėja ir juostų tarpai. Kadangi sparčiai didėjant plastinių deformacijų gyliui jų išplitimas bimetaliės sijos sienelėje nėra toks spartus (6 pav.), lemiamas juostų tarpų ilgio veiksnys yra plienų stiprumo rodiklių santykis σ_y^f / σ_y^w .

Taigi tampriai plastinio deformavimo metu bimetalių sijų racionalumas ir ekonomiškumas priklauso nuo juostų tarpų ir sijos plieno stiprumo rodiklių santykio σ_y^f / σ_y^w . Kuo šis santykis didesnis, tuo gaunamas geresnis plienų stiprumo rodiklių išnaudojimas, geresni ir nagrinėjami sijų standumo rodikliai. Tačiau, taikant ribotų plastinių deformacijų kriterijų sparčiai ilgėja plastinės zonos juostose. Kartu didėja juostų tarpų ilgis l_{int} , ir bimetalių sijų skaičiavimui gautos analizinės priklausomybės turi būti patikslintos. Tai laikytina tolesnio tyrimo objektu.

7. Išvados

1. Gautos analizinės bimetalių sijų lenkimo momentų skaičiavimo išraiškos gali būti taikomos sijoms, kurių stiprumo skaičiavimas yra atliekamas pagal ribotų plastinių deformacijų kriterijų (2+4 bimetalių sijų grupėms [9]). Jos gautos visiems plastinių deformacijų atsivėrimo bei plitimo atvejams ir galioja nepriklausomai nuo sijos apkrovimo ir atrėmimo sąlygų.

2. Gauta analizinė bimetalių sijų vidurio įlinkio skaičiavimo išraiška gali būti taikoma bimetalių sijų standumui tirti. Ji galioja laisvai paremtos sijos, apkrautos išskirstytąja apkrova, atveju.

3. Gautos analizinės plastinių deformacijų įtaką įvertinančios priklausomybės kiekybiškai aprašo tokius reiškinius:

3.1 proporcingą bimetalių sijų laikomosios galios ir standumo didėjimą, didėjant juostų tarpų plieno stiprumui, sijos plieno stiprumo atžvilgiu;

3.2 plastinių zonų bimetalių sijų juostose ir sienelėje ilgių skirtumą, didėjantį proporcingai juostų tarpų ir sijos plieno stiprumo rodiklių santykiui;

3.3 spartesnę plastinių deformacijų plitimą bimetalių sijų juostose nei sienelėje.

4. Gautos analizinės išraiškos naudotinos tolesniems bimetalių dvitėjų sijų tyrimams, sprendžiant jų analizės ir optimizavimo uždavinius.

5. Atlikus skaitinį eksperimentą BEM paketu ANSYS, gauta:

5.1. Esant riboto ilgio padidinto stiprumo plieno tarpams juostose, kai plastinės zonos atsiveria sijos viduryje, skaitinio eksperimento rezultatai sutapo su analiziniais (gauta paklaida $\leq 8\%$ galima dėl riboto BE tinklo tankio). Tai iš esmės patvirtina pateiktų analizinių išraiškų taikymą tampriai plastinėms bimetalių sijoms suvirintoms dvitėjų skerspjūvio sijoms skaičiuoti.

5.2. Esant juostų tarpų ir sijos ilgio santykiui $l_f / l > 0,6$ plastinės zonos atsiveria pjūviuose, artimuose atramoms, ir gautos analizinės išraiškos nėra taikytinos.

Skaitinio eksperimento rezultatų nesutapimas su analiziniais, didėjant tarpų sijos juostose ilgiui, motyvuojamas didėjančia tangentialių įtempimų skerspjūviuose, artimuose atramoms, įtaka, kuri išvedant analizines išraiškas nebuvo įvertinta.

Literatūra

1. P. J. Dowling, B. A. Burgan. Steel Structures in the New Millennium // Journal of Constructional Steel Research, 1998, Vol 46 (1–3), Paper No 423.
2. A. K. Kvedaras, A. Kudzys, V. Vaitkevičius. Efficient Future Strategies for Constructing with Steel in Lithuania // Journal of Constructional Steel Research, 1998, Vol 46 (1–3), Paper No 19.
3. Е. И. Беленя и др. Металлические конструкции. М.: Стройиздат, 1986. 560 с.
4. Е. И. Беленя и др. Металлические конструкции. Спец. курс. М.: Стройиздат, 1982. 472 с.
5. G. W. Owens, P. R. Knowles. Steel Designers' Manual. 5th ed. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1994. 1266 p.
6. D. A. Fanella, R. Amon, B. Knobloch, A. Mazumder. Steel design for Engineers and Architects. New-York, Van Nostrand Reinhold, 1992. 503 p.
7. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*). М.: ЦТИП Госстроя СССР, 1989. 148 с.
8. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. М.: ЦТИП Госстроя СССР, 1990. 96 с.
9. В. В. Горев, Б. Ю Уваров, В. В. Филиппов и др. / Под ред. В. В. Горева. Металлические конструкции. Т. 1. Элементы стальных конструкций. М.: Высшая школа, 1997. 527 с.
10. Н. Л. Чернов, В. С. Шербакин, В. Л. Тарасенко. Прочность изгибаемых элементов при ограниченных пластических деформациях // Совершенствование сварных металлических конструкций / Под ред. М. М. Жербина. Киев: Наукова думка, 1992. 271 с.
11. B. Bresler, T. Y. Lin, J. B. Scalzi. Design of steel structures. 2 nd ed., New York, John Wiley & Sons, Inc, 1968, 830 p.
12. E. J. Hearn. Mechanics of Material 2. 3th ed. Oxford, Butterworth Heinemann, 1997. 539 p.
13. B. Seely, F. Smith. Advanced Mechanics of Material 2nd ed., New York, John Wiley & Sons, Inc, 1959. 680 p.
14. S. Turskienė. Darbas su sistema MATHEMATICA. Šiauliai: Šiaulių pedagoginis institutas, 1997. 141 p.
15. R. Kačianauskas. Computer Methods in Multilevel Modelling of Beams and Shells. Vilnius: Technika, 1995. 395 p.
16. ANSYS. Theory Reference. Release 5.4. 1997 SAS IP, Inc. ©
17. ANSYS. Elements Reference. Release 5.4. 1997 SAS IP, Inc. ©

Įteikta 2001 01 23

ELASTIC-PLASTIC ANALYSIS OF BISTEEL I-SECTION BEAMS

A. Jaras, R. Kačianauskas

Summary

The elastic-plastic analysis of simple basteel I-section beam subjected to uniform distributed load (Fig 1) is considered in this paper. The basteel beam presents a composition of high-strength steel inclusions for the flanges in the region of maximum stresses and of low-strength steel for remaining volume of the beam.

The aim of the paper is development of the explicit analytical model for description of plastic regions with respect to different steel properties as well as to dimensions of high-strength inclusions. The geometrical linear approach and perfectly plastic material model have been assumed.

The variation of the strength ratio of the both steels and the variation of the length of inclusion leads to different distributions of plastic regions in the web and the flanges (Fig 2). By fixing the depth of plastic penetration different explicit expressions (1–10) of the limit bending moment and plastic boundaries (11–18) presented in Fig 3 have been derived. After integration over elastic and plastic regions explicit expressions (19–21) of middle-span deflection have been derived.

Influence of different dimensions and material properties are investigated and presented graphically on Figs 5–8.

The proposed analytical model has been also tested numerically by the finite element method. The ANSYS code and tetrahedral elements have been used for these purpose (Figs 9–11). A good agreement between the proposed analytical model and numerical experiments has been obtained if the relative length of the high-strength inclusion does not exceed 60% ($l_{inc}/l \leq 0.6$) (Fig 12). Outside the range of this limit the influence of shear stresses is growing and analytical model has to be corrected by additional terms.

.....
Arūnas JARAS. Research Assistant. Numerical Modelling Laboratory. Vilnius Gediminas Technical University, Saulėtekio al. 11, LT-2040 Vilnius, Lithuania.
E-mail: arunas.jaras@st.vtu.lt

A graduate of Civil Engineering Faculty of Vilnius Civil Engineering Institute (1986). Author of 2 papers, 3 reports.

.....
Rimantas KAČIANAUSKAS. Doctor Habil, Professor. Dept of Strength of Materials. Vilnius Gediminas Technical University, Saulėtekio al. 11, LT-2040 Vilnius, Lithuania. E-mail: mopror@adm.vtu.lt

PhD (structural mechanics, 1982). Dr Habil (1996). Professor (1997). Scientific visits: University of Stuttgart and Swiss Federal Institute of Technology, Zurich. Author of 1 monograph and over 80 papers. Research interests: computational mechanics, finite element method, computer modelling of structures.