



17-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos  
**TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,**  
vykusios 2014 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'  
**TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 8 May 2014, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 17-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»  
**ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК**, 8 мая 2014 г., Вильнюс, Литва

## TILTINIO KRANO KONSTRUKCIJOS MASĖS RACIONALIZAVIMAS

**Justas Gailius**

*Transporto technologinių įrenginių katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas,  
Plytinės g. 27, LT-10105 Vilnius, Lietuva  
El. paštas: justas.gailius@stud.vgtu.lt*

**Santrauka.** Tyrime atliekamas atraminio dvisijo tiltinio krano pagrindinės stačiakampio profilio sijos konstrukcinių parametru racionalizavimas siekiant sumažinti masę. Keičiant konstrukcinius parametrus ir sijos statines apkrovas stebimi įtempiai, poslinkiai ir sienelių stabilumas kiekvienu nagrinėjamu atveju. Tyrimo metu nustatyti leidžiamų projektuoti sijų parametrai, taip pat racionalių sijų parametrai užtikrinant sijos techninį-ekonominį efektyvumą. Tyrimas baigtinių elementų metodu atliktas naudojant modernų kompiuterinės programinės įrangos paketą „SolidWorks“. Remiantis šiandieninės konstrukcinių medžiagų rinkos kainomis nustatyti kaštai, reikalingi racionaliai pagrindinei tiltinio krano sijai gaminti kiekvienu nagrinėtu atveju. Tyrimo rezultatai pateikiami lentelėse ir pavaizduojami diagramose. Darbo pabaigoje pateikiamos glaustos ir aiškios išvados.

**Reikšminiai žodžiai:** baigtiniai elementai, konstrukcijos parametrai, masės mažinimas, plieno lakštai, sija, tiltinis kranas.

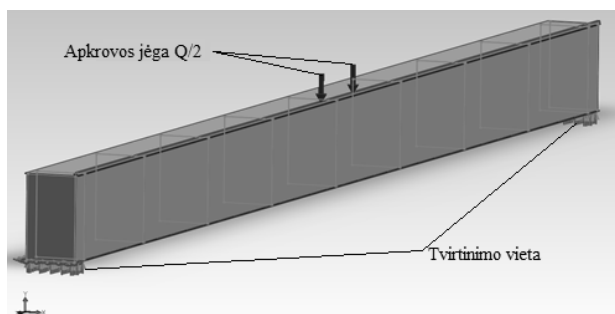
### Įvadas

Šiandien sparčiai plečiasi pramonės srautai, didėja transporto apkrovos. Viena plačiausiai naudojamų transporto rūšių gamybos įmonėse yra tiltiniai kėlimo kranai. Šie įrenginiai yra patogūs dėl mažai užimamos vietos gamybos cechuose, aptarnavimo funkcionalumo, didelės keliamosios gebos. Dėl kylančios konstrukcinių medžiagų bei energijos kainų tendencijos krano konstrukcija turi būti racionali. Daugelis kranų gamybos įmonių projektuoja ir gamina kranus pagal turimas ankstesnių kranų konstrukcijas, kurios ne visada tinka konkrečiam projektuojamam kranui dėl neracionaliai didelės masės ir kainos (Abid *et al.* 2008; Becirovic *et al.* 2011; Gerdemeli *et al.* 2010; Pinca *et al.* 2010; Zuberi *et al.* 2008). Tiltinio krano pagrindinės sijos efektyvi masė turi reikšmingos įtakos tausojančioms konstrukcinėms medžiagoms ir tuo pačiu nustatant pagrįstą bei konkurencingą kėlimo krano kainą. Tiltinio krano pagrindinei sijai gaminti sunaudojama didžioji dalis viso krano konstrukcinės medžiagos, kuri sudaro apie 70 % visų kaštų (Gaska, Pypno 2011; Pavlovic *et al.* 2012). Sprendžiant masės mažinimo problemą reikia atsižvelgti į krano pagrindinės sijos gamybos medžiagų sąnaudas, kurios būtų efektyviai panaudojamos ir užtikrintų saugią bei patikimą krano eksploataciją remiantis kranų projektavimo LST EN 13001 standartų grupe bei kėlimo kranų naudojimo taisyklėmis taikant bendruosius principus ir metodus atitinkančius tikslą ir pripažintą šiuolaikinį kranų projektavimo techninį lygį.

Įvairių šalių moksliniuose straipsniuose yra nagrinėjamos tiltinio krano pagrindinės sijos geometrinių parametru, sandaros, ilgaamžiškumo padidinimo, konstrukcijos lakštų stabilumo ir deformuoto būvio problemos. Tiltinių kanų pagrindinės sijos konstrukcijos stiprumo ir elastinio stabilumo senų ir naujų konstrukcijos projektavimo standartų palyginimo klausimus studijavo Gaska, Pypno 2011. Įtempimų pasiskirstymą ir deformuotą būvį gamybos ceche dirbančio tiltinio krano pagrindinėje sijoje ir įvertino Alkin *et al.* 2005 taip pat šiame darbe nustatyta baigtinių elementų geometrinė forma tikslesniems skaičiavimams atlikti. Pavlovic *et al.* 2012; Sakovic *et al.* 2013 straipsniuose koncentravosi į tiltinio krano pagrindinės sijos skerspjūvio parametru optimizavimą įvertinant sijos stabilumą. Becirovic *et al.* 2011 straipsnyje pagrįstame analitiniais skaičiavimais ir skaitine analize tyrė dvisijinį tiltinį kraną ir vertino įtempimus ir poslinkius. Pinca *et al.* 2009, 2010 analizavo tiltinių kranų konstrukcijų deformuotą būvį baigtinių elementų metodu siekiant nustatyti jų keliamąją gebą bei naudojamo metodo skaičiavimo tikslumą. Taip pat Pinca *et al.* 2009 kompiuteriniu ir eksperimentiniu metodais optimizavo gamybos ceche dirbančio tiltinio krano parametrus mažinant masę. Tiltinio krano sijos masės mažinimo klausimais dirbo Abid *et al.* 2008, 2013; Zuberi *et al.* 2008. Djelosevic *et al.* 2012 lygino analitinį ir skaitinį baigtinių elementų metodus tiltinio krano siją veikiant nustatyta apkrova. Gaska, Haniszewski 2011 analizavo visos dvisijinio tiltinio

nio kranų konstrukcijos įtempimus ir deformacijos būvį. Wolny, Dzik 2008 straipsnyje analizavo tiltinio kranų sijos įlinkius, jų priežastis ir technologines priemones šiems poveikiams mažinti. Tiltinio kranų pagrindinės sijos konstrukcinio plieno lakštų stabilumo praradimo ir technologinių įtempimų klausimais straipsniai buvo rašomi Niezgodzinski, Kubiak 2005, taip pat Blum, Haremski 2010. Jūrų uoste dirbančio portalinio kranų pagrindinės stačiakampio profilio sijos įtempimų ir deformuoto būvio analizė buvo atlikta Gerdemeli *et al.* 2010.

Vertinant šiuolaikinių konstrukcinių objektų geometriinių parametrų racionalizavimo būtinumą siekiama nustatyti atraminio dvisijinio MDC1 masės pasiskirstymo klasės tiltinio kėlimo kranų pagrindinės stačiakampio profilio sijos (1 pav.) mažiausią masę ir konstrukcinių elementų kaštus užtikrinant sijos techninį-ekonominių efektyvumą.



1 pav. Tiltinio kėlimo kranų stačiakampio profilio sija

Modeliavimui ir analizei naudojamas modernios programinės įrangos paketas „SolidWorks“. Pasirinkti probleminei tiltinio kranų pagrindinės sijos parametrai pateikti 1 lentelėje atlikus išsamią mokslinių darbų apžvalgą tiltinių kranų pagrindinės sijos temomis bei bendraujant su kranų gamybos įmonės vadovais ir darbuotojais. Modeliuojant pagrindinę siją nustatytais parametrais ji tvirtinama ant galinių sijų ir apkraunama koncentruotomis statinėmis jėgomis  $Q/2$  laikant, kad vežimėlis, kurio ratų bazė – 1000 mm, yra tarpatriamo atstumu  $L/2$ . Apkraunant siją keičiami konstrukcijos geometriniai parametrai: atstumas tarp vertikalių sienelių  $B$ , horizontalių sienelių plotis  $b$ , vertikalių sienelių aukštis  $H$ , tarpatriamo ilgis  $L$ , vertikalių sienelių storis  $s$ , horizontalių sienelių storis  $t$ .

1 lentelė. Tiltinio kranų pagrindinės sijos parametrai

Q, kN			49	196	392
B, mm				600	800
b, mm				648	848
H, mm	800	1200	1600	1800	2000
L, mm			8500	16 500	28 500
t, mm			12	16	18
s, mm	6	8	10	12	16

Reikia pažymėti, kad sijoje montuojamos 6 mm storio tvirtinimo sąstandos 2000 mm atstumu viena nuo kitos turinčios užtikrinti konstrukcijos stabilumą. Ant sijos virš vertikalių sienelių montuojamas supaprastintas

vežimėlio bėgis – strypas, kurio skerspjūvio matmenys –  $40 \times 40$  mm. Nustačius konstrukcinio plieno rūšį – S235J2G4, kurio medžiagos takumo riba  $\sigma_y = 235$  MPa, tamprumo (Jungo) modulis  $E = 2,05 \times 10^5$  MPa, Puasono koeficientas  $\nu = 0,3$ , sija skaidoma tetraedro formos 10-ties mazgų elementais ir sprendžiamas analizės uždavinys baigtinių elementų metodu.

Konstrukcijų skaičiavimas taikant baigtinių elementų metodą yra efektyvus būdas sukurti nagrinėjamos konstrukcijos modelį, atlikti jos skaitinį įtempimų ir deformuoto būvio analizę bei įvertinti konstrukcijos elgsenos ypatumus. Erdviniai elementai naudojami kūnų mechanikos problemoms spręsti. Tetraedro formos erdvinis elementas turi dešimt mazgų, kiekvienas mazgas turi tris slenkamuosius ir tris sukamuosius laisvės laipsnius  $x$ ,  $y$  ir  $z$  ašimis. Renkantis šį elementą tyrimo rezultatai gaunami tikslesni ([www.solidworks.com](http://www.solidworks.com)).

Pagal gautus rezultatus stebimos sijos įtempimų (Von Mises) reikšmės pavojingose zonose, taip pat poslinkiai vertikalia kryptimi bei nagrinėjamų sijų masė ir jų pokytis. Pavojai gali kilti, jei apkrovų poveikių arba jų charakteristikų leistinos vertės viršija atitinkamas ribines būsenas. Norint šių pavojų išvengti būtina įrodyti, kad kraną vienu metu veikiančių visų apkrovų poveikių apskaičiuotos ribinės vertės padaugintos iš atsargos koeficiento ir įvertintos apkrovų poveikių charakteristikos neviršija jas atitinkančių ribinių būsenų bet kuriame kranų taške remiantis kranų projektavimo reikalavimais (LST EN 13001-2). Leistini įtempimai apskaičiuojami:

$$\sigma_i = \frac{\sigma_y}{\mu_F \cdot \mu_R}, \quad (1)$$

čia:  $\sigma_y$  – medžiagos takumo riba;  $\mu_F$  – suminis saugos koeficientas;  $\mu_R$  – rizikos koeficientas.

Leistinos sijos poslinkių vertikalia kryptimi reikšmės nustatomos standumo sąlyga:

$$u \leq \frac{L}{600}, \quad (2)$$

čia:  $L$  – tarpatriamo ilgis.

Veikiant apkrovai sijos vertikali sienelė yra gniuždoma ir dėl tam tikrų priežasčių (šoninės apkrovos, netolygios sienelės temperatūros pokyčio, medžiagos netolygumo) sienelė gali įgyti skersinių poslinkių esant žymiai mažesniems įtempimams už leistinuosius. Kuo didesnė yra gniuždomoji apkrova, tuo sunkiau sienelėi išsitiesti. Pavojingos sienelės vietos dėl pastovumo sumažėjimo yra tarp tvirtinimo sąstandų ir horizontalių sienelių. Taigi, nustačius galimus racionalius sijos parametrus, jų vertikalias sienelės reikia patikrinti dėl stabilumo užtikrinimo, kadangi praradusi stabilumą sija praranda laikomąją galią (Niezgodzinski, Kubiak, 2005; LST EN 13001-3). Kritiniai vertikalių sienelės įtempimai yra apibrėžiami formule:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1 - \nu^2)} k \left( \frac{s}{H} \right)^2, \quad (3)$$

čia:  $E$  – tamprumo (Jungo) modulis;  $\nu$  – Puasono koeficientas;  $k$  – klupumo koeficientas.

Žinanant, kad tiltinio kėlimo krano pagrindinė sija sudaro didžiąją dalį viso krano masės, labai svarbu yra tiksliai įvertinti konstrukcinių elementų parametrus priklausomai nuo apkrovos, nes tai turi įtakos krano gamybos kaštams dėl medžiagų kiekio poreikio nustatyto projektavimo metu. Neracionalus sijos projektavimas ir gamyba netinkamai įvertinant minėtas priežastis gali labai padidinti krano kainą dėl ko jis tampa nepatrauklus klientui. Tyrimo metu taip pat nustatomos sijos racionalių parametru konstrukcijų kainos remiantis šiaandieninėmis konstrukcinių medžiagų kainomis.

### Tyrimo rezultatai

Tiltinio krano pagrindinės stačiakampio profilio sijos modeliavimo rezultatų analizės metu iš 189 sijos modelių nagrinėjama parametrais buvo rasti 65 leidžiamų projektuoti sijų variantai, kurie neviršija leistinų įtempimų ir poslinkių vertikalia kryptimi, taip pat nėra viršijamas sienei stabilumo kriterijus. Tyrimo metu rastos nagrinėtų sijų konstrukcinių parametru racionalios reikšmės leidžiančios projektavimo etape numatyti parenkamų sijos plieninių lakštų geometrinius parametrus bei užtikrinti pakankamą sijos stiprumą ir stabilumą sunaudojant reikiamą konstrukcinio plieno kiekį bei mažinant įrenginio kainą ir energijos sunaudojimą. Sumodeliavus siją racionaliais parametrais, nustačius konstrukcinio plieno rūšį ir išspręsdus analizės uždavinį, sija buvo suskaidyta į baigtinius elementus, kurių kiekis kito nuo 32813 iki 52859 priklausomai nuo sijos geometrinių parametru.

2 lentelėje pateikiami racionalūs tiltinio krano pagrindinės sijos parametrai siūlantys, kokių parametru sija turėtų būti projektuojama, kai tarpatriamio ilgis –  $L$  ir apkrova –  $Q$ . Žinant, kad jautri vieta projektuojant yra vertikalių sienelių parametrai, tai racionalių vertikalių sienelių aukščio bei storio priklausomybių nuo tarpatriamio ilgio rezultatų duomenys palyginimo vaizdumui pateikiami diagramose (2 ir 3 pav.).

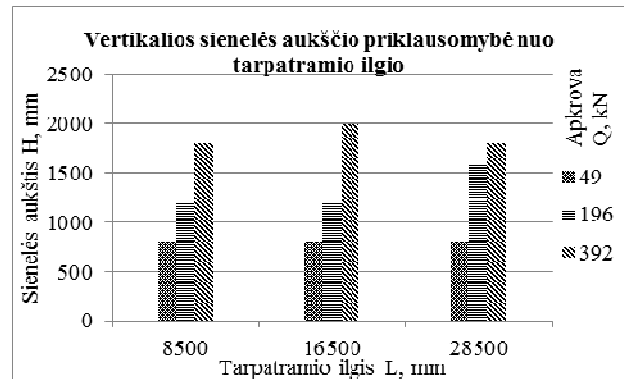
2 lentelė. Tiltinio krano pagrindinės sijos racionalūs parametrai

L, mm	Q, N	H, mm	B, mm	b, mm	s, mm	t, mm	M, kg
28 500	392	1800	800	848	12	18	17 744
28 500	196	1600	600	648	8	12	10 190
28 500	49	800	600	648	6	12	6416
16 500	392	2000	800	848	10	18	9883
16 500	196	1200	600	648	6	12	4387
16500	49	800	600	648	6	12	3722
8500	392	1800	800	848	10	16	5879
8500	196	1200	600	648	6	12	1925
8500	49	800	600	648	6	12	1925

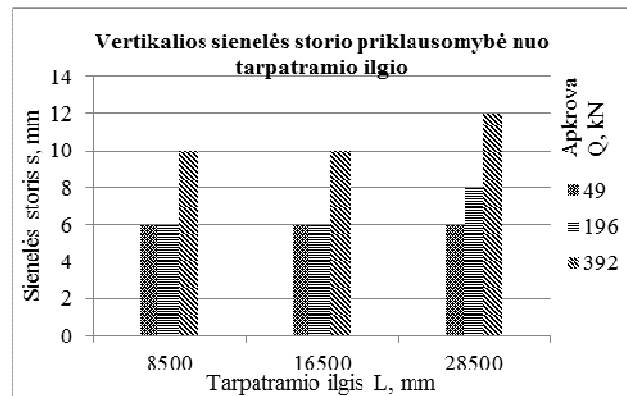
Racionalių parametru sijų nagrinėjami kriterijai išreikšti (1), (2) ir (3) formulėmis yra arčiau ekstremalių reikšmių lyginant su leidžiamų projektuoti sijų parametru variantais, kurie nėra racionalūs dėl nepagrįstos masės ir kainos, tačiau leistinos reikšmės turinčios užtikrinti saugią krano darbo eksploataciją nėra viršijamos.

Kai apkrova pasiekia 392 kN, kaip parodyta rezultatu lentelėje, atitinkamai yra padidinamas horizontalių

sienelių ilgis, storis ir atstumas tarp vertikalių sienelių, nes viršijamos leistinų įtempimų ir poslinkių reikšmės lyginant su 49 kN ir 196 kN apkrovos reikšmėmis.

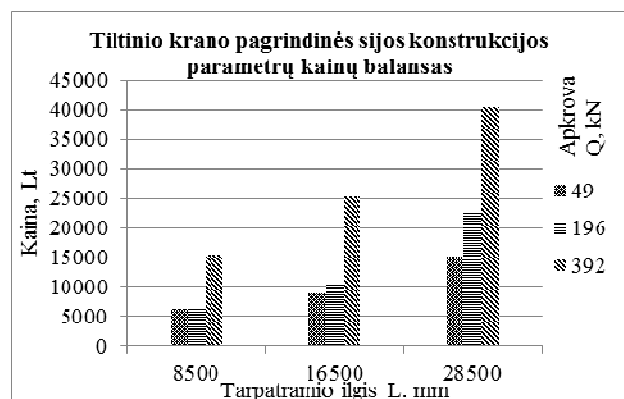


2 pav. Vertikalių sienelių aukščio priklausomybė nuo tarpatriamio ilgio



3 pav. Vertikalių sienelių storio priklausomybė nuo tarpatriamio ilgio

Atsižvelgiant į šiaandienines rinkos kainas skaičiavimuose įvertinti racionalių tiltinio krano pagrindinių sijų parametru kiekvieno konstrukcinio elemento: vertikalių sienelių, horizontalių sienelių, tvirtinimo sąstandų, kaštai parenkant reikiama konstrukcinio plieno lakštų kiekį reikalingą tiltinio krano pagrindinės sijos gamybai ir apibendrintai pavaizduoti diagramoje (4 pav.).



4 pav. Tiltinio krano racionalių pagrindinės sijos konstrukcijos parametru kainų balansas

Diagramoje akivaizdžiai matomas sijų metalinių konstrukcijų kainų kilimas esant skirtingų apkrovų konst-

rukcijoms. Kai sijos tarpatramio ilgis 8500 mm, kainų pokytis yra 59 %, kai – 16 500 mm, kainų pokytis yra 64 % ir kai – 28 500 mm, kainų pokytis yra 62 %.

### Išvados

Tyrimo metu sprendžiant atraminio dvisijinio tiltinio kėlimo krano masės mažinimo problemą atsižvelgiant į pagrindinės stačiakampio profilio sijos gamybos medžiagų sąnaudas buvo gautos racionalių sijos parametru reikšmės turinčios didelės įtakos krano gamybos kaštams. Iš gautų tyrimo rezultatų formuluojamos šios išvados:

1. Kompiuterinės programinės įrangos paketu „SolidWorks“ nustatytais parametrais sumodeliuotos sijos atskirais atvejais nustatant atitinkamus geometrinius parametrus. Nagrinėjant leidžiamus projektuoti sijų atve-

jus rasti racionalūs variantai, kurių masės reikšmės mažėja vidutiniškai 30 %. Pateiktoje rezultatų lentelėje ir diagramose aiškiai matomos racionalių nagrinėjamų sijų parametru reikšmės kiekvienu tarpatramio ilgio ir apkrovos atveju.

2. Nagrinėjant racionalias kėlimo krano konstrukcijas apskaičiuotas reikiamas konstrukcinio plieno lakštų kiekis kiekvienu nagrinėjamu atveju. Remiantis šiandieninės rinkos kainomis nustatytos sijų plieninių konstrukcijų kainos ir palygintos priklausomai nuo veikiamos didžiausios apkrovos ir tarpatramio ilgio. Rezultatai pa-vaizduojami diagramoje.

3. Gauti tyrimo rezultatai parodė, kad tiltinio kėlimo krano pagrindinės sijos konstrukcijos parametru racionalizavimas turi reikšmingos įtakos dėl kylančių konstrukcinių medžiagų ir energijos kainų tendencijos.

### Literatūra

- Abid, M.; Khan, S. M. 2013. *Optimization of Box Type Girder of Overhead Crane for Different Capacities with Fixed Span*. 9th International Conference on Fracture & Strength of Solids. June 9–13. Jeju, Korea, 1–6 p.
- Abid, M.; Achmal, M. H.; Parvez, S. 2008. *Optimization of Box Type Girder of Overhead Crane*. Global Design to Gain a Competitive Edge. 609–618 p.
- Alkin, C.; Imrak, C. E.; Kocabas, H. 2005. Solid Modeling and Finite Element Analysis of an Overhead Crane Bridge. *Acta Polytechnica* 45(3): 61–67.
- Becirovic, A.; Vukojevic, D.; Hadzikadunic, F. 2011. Optimization of Double Box Girder Overhead Crane in Function of Cross Section Parameter of Main Girders. 2011. *15<sup>th</sup> International Research/Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology“*. 12–18 September 2011. Czech Republic, Prague. 641–644 p.
- Blum, A.; Haremski, K. 2010. An Influence of Technological Contraflexure of Crane Bridges on its Durability. *Transport Problems* 5(1): 5–14.
- Djelosevic, M.; Gajic, V.; Petrovic, D.; Bizic, M. 2012. Identification of local stress parameters influencing the optimum design of box girder. *Engineering structures* 40: 299–316.
- Gaska, D.; Haniszewski, T.; Matyja, T. 2011. Modeling assumptions influence of stress and strain state in 450 t cranes hoisting winch construction. *Transport problems: an international scientific journal* 6(1): 11–19. <http://dx.doi.org/10.1080/13923730.2005.9636338>.
- Gaska, D.; Pypno, C. 2011. *Strenght and Elastic Stability of Cranes in Aspect of New and Old Design Standards*. *Mechanica* 17 (3): 226–231. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.mech.17.3.495>.
- Gerdemeli, I.; Kurt, S.; Yildirim, M. 2010. Calculations, Modeling and Analysis With Finite Element Method of Rubber Tyred Container Stacking Crane. 2010. *14<sup>th</sup> International Research/Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology“*. 11–18 September 2010. Mediterranean Cruise. 545–548 p.
- Niezgodzinski, T.; Kubiak, T. 2005. *The Problem of Stability of Web Sheets in Box-Girders of Overhead Cranes*. *Thin-Walled Structures* 43: 1913–1925.
- Pavlovic, G. V.; Sakovic, M. M.; Gasic, M. M.; Bulatovic, R.; Zdravkovic, N. 2012. Optimization of the Box Section of the Main Girder of the Double Beam Bridge Crane According to the Criteria of Lateral Stability and Local Stability of Plates. *Machine Design* 4(4): 197–204.
- Pinca, C. B.; Tirian, G. O.; Josan, A. 2009. *Finite Element Analysis of an Overhead Crane Bridge*. Proceedings of the 2nd WSEAS Int. Conf. On Finite Differences, Finite Elements, Finite Volumes, Boundary Elements. 51–56 p.
- Pinca, C. B.; Tirian, G. O.; Josan, A. Chete, G. 2010. Quantitative and qualitative study on the state of stresses and strains of the strenght structure of a crane bridge. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics* 4(5): 234–241. October 2010.
- Pinca, C. B.; Tirian, G. O.; Socalici, A. V.; Ardelean, E. D. 2009. Dimensional Optimisation for the Strenght Structure of a Traveling crane. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics* 4(4): 147–156. October 2009.
- Sakovic, M.; Gasic, M.; Catic, D. M.; Nikolic, R. R.; Pavlovic, G. V. 2013. Optimization of the Box Section of the Main Girder of the Bridge Crane with the Rail Placed Above the Web Plate. *Struct Multidisc Optim* 43: 273–288.
- Wolny, St.; Dzik, St. 2008. Elimination of permanent deformation of travelling cranes box girders opertating in foundry shops. *Archives of foundry engineering* 8(2): 149–154.
- Zuberi, H. R.; Kai, L.; Zhengxing, Z. 2008. Design Optimisation of EOT Crane Bridge. *International Conference on Engineering Optimization*. 01–05 June 2008. Rio de Janeiro, Brazil. 1–9 p.