

# STAČIAKAMPIO SKERSPJŪVIO STRYPO CIKLINIO TAMPRIAI PLASTINIO GRYNOJO LENKIMO TYRIMAS

Romas Stakauskas, Sergėjus Rimovskis, Artūras Sabaliauskas

Šiaulių universitetas, Technologijos fakultetas

## Įvadas

Nustatant mašinų ir įrengimų patikimumą, dažniausiai atliekamas atskirų jų elementų ir mazgų statinio ir ciklinio stiprumo įvertinimas. Statinis stiprumas – tai detalių ir įrengimų elementų gebėjimas priešintis statinėms, lėtai kintančioms arba laike visai nekintančioms apkrovoms. Tačiau mašinos – tai mechaninius judesius atliekantys įrenginiai, todėl pagrindinės jų detalės (pvz., velenai, ašys) yra veikiamos ciklinėmis apkrovomis. Detalių skerspjūvyje įtempiai kinta periodiškai ciklais, o jų ilgaamžiškumas priklauso nuo maksimalios įtempio reikšmės. Daugiacyklio apkrovimo atveju įtempiai neviršija detalės medžiagos tamprumo ribos, ciklų skaičius gali siekti milijonus ar dešimtis milijonų. Jei ciklinio deformavimo metu įtempiai viršija tamprumo ribą, detalėje atsiranda liekamosios plastinės deformacijos ir jos ilgaamžiškumas sumažėja iki kelių arba keliasdešimt tūkstančių ciklų. Toks deformavimas vadinamas mažacykliu [1].

Šiuo metu sukaupta pakankamai daug žinių apie ciklinį deformavimą ir medžiagų nuovargį. Pagrindiniai tokio deformavimo parametrai, jų nustatymo būdai aprašyti visuose medžiagų atsparumo vadovėliuose. Juose dažniausiai nagrinėjamas paprasčiausias apkrovimo būdas – tempimas-gniuždymas. Tačiau įrengimų ir mašinų detalės žymiai dažniau yra veikiamos lenkimu. Esant tokiam apkrovimui, įtempiai ir deformacijos detalės skerspjūvyje pasiskirsto nevienodai – jie kinta nuo maksimalios (+) iki minimalios (–) reikšmės, be to, jame yra neutralioji linija (joje įtempiai ir deformacijos lygios 0).

Esant tampriai plastiniam deformavimui, įtempių-deformacijų pasiskirstymas lenkiamame skerspjūvyje tampa dar sudėtingesnis. Atliekant analitinį tyrimą, būtina įvertinti deformavimo kreivės plastinę dedamąją, pasirinkti jos aproksimavimo būdą. Stačiakampio ir skritulinio skerspjūvio elemento statinio ir ciklinio tampriai plastinio grynojo lenkimo eksperimentiniai ir analitiniai tyrimai aprašyti darbuose [2–6]. Jų autoriai vartoja tiesinę įtempių deformacijų kreivės plastinės dedamosios aproksimavimą. Statinio grynojo lenkimo skaičiavimai, taikant laipsninę aproksimaciją, pateikti darbuose [7–9]. Autoriai nagrinėjo stačiakampio ir skritulinio skerspjūvio elementus. Šiuose darbuose pateiktos lygybės, leidžiančios nustatyti įtempimų

neutraliojo sluoksnio padėties kitimą bei lenkimo momentų ir maksimalių strypo deformacijų priklausomybes, kai tampriai plastinis tempimas ir gniuždymas įvertinamas skirtingais parametrais. Stačiakampio skerspjūvio elemento ciklinio tampriai plastinio grynojo lenkimo analitinis tyrimas, taikant laipsninę ciklinio deformavimo kreivės plastinės dedamosios aproksimavimą, aprašytas [10]. Analitinio tyrimo rezultatai lyginami su eksperimentiniais stačiakampio skerspjūvio aliuminio lydinio D16T1 ciklinio grynojo lenkimo už proporcingumo ribų duomenimis, kurie buvo gauti M. Daunio ir paskelbti darbe [2].

## Stačiakampio skerspjūvio strypo tampriai plastinio grynojo lenkimo tyrimo metodika

Atliekant elementų tampriai plastinio deformavimo analitinius tyrimus, svarbu pasirinkti tokių deformavimo diagramos plastinės dedamosios aproksimavimą, kad būtų gaunami nesudėtingai integruojami reiškiniai, o skaičiavimo tikslumas būtų pakankamai aukštas. Dažniausiai taikomi aproksimavimo būdai – tiesinis, poligonalinis ir aproksimavimas laipsnine funkcija [11, 12]. Taikant poligonalinį aproksimavimą, kreivė suskaidoma į aibę tarpusavyje susijusių atkarpų, todėl gaunamas didelis aproksimavimo tikslumas. Tačiau dėl sudėtingų aproksimavimą aprašančių lygybių gaunamos gremėzdiškos tampriai plastinį deformavimą apibūdinančios integralinės išraiškos. Atskiras poligonalinio aproksimavimo atvejas – deformacijos kreivės plastinės dalies pakeitimas tiese. Jis yra paprastesnis, tačiau mažiau tikslus.

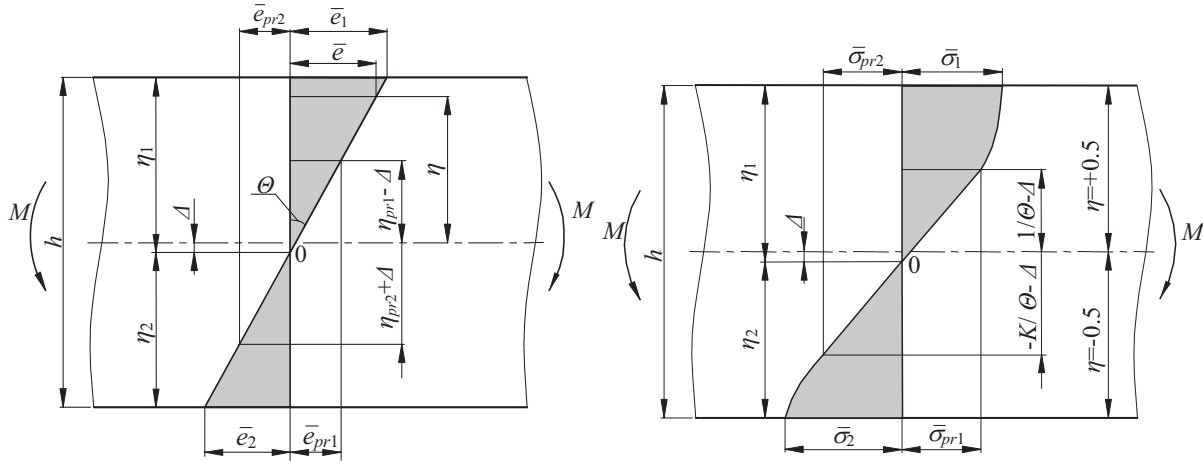
Aproksimavimas laipsnine funkcija yra patogus tuo, kad eksperimentinė kreivė pakeičiama analitine, kuri jau savo forma yra artimesnė įtempių-deformacijų diagramai ir kuri dažnai gali būti įvertinama vienu parametru – laipsnio rodikliu  $m$  [13]. Tampriai plastinio deformavimo integraliniai reiškiniai su laipsninėmis funkcijomis ne visada lengvai integruojami, tačiau, pradėjus taikyti kompiuterines skaičiavimo programas, šios problemos nebeliko.

Stačiakampio skerspjūvio strypo statinio grynojo lenkimo tyrimo metodika pateikta darbe [8]. Šiame darbe buvo laikomasi nuostatos, kad plokščių pjūvių hipotezė galioja ir tada, kai deformacijos grynuoju lenkimu apkrautame strype žymiai viršija proporcingumo ribą. Deformacijų ir įtempių vaizdai

stryo išilginiame skerspjūvyje pateikti 1 pav. Šiuose paveikluose (a ir b) pateiktos santykinės įtempių  $\sigma$  ir deformacijų  $e$  išraiškos:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_{pr}}, \quad \bar{e} = \frac{e}{e_{pr}},$$

čia:  $\sigma_{pr}$  ir  $e_{pr}$  – atitinkamai proporcingumo ribos deformacija ir įtempis.



1 pav. Deformacijų (a) ir įtempių (b) pasiskirstymo lenkiamo stryo išilginiame pjūvyje schema

Bendru atveju gaunama tokia lenkiamo stryo santykinio momento išraiška [8]:

$$\bar{M} = 6 \left\{ \int_{\frac{1}{\Theta}}^{0.5} (\Theta(\eta + \Delta))^{m_1} \eta d\eta + \int_{\frac{K}{\Theta}}^{\frac{1}{\Theta} - \Delta} \Theta(\eta + \Delta) \eta d\eta + \int_{\frac{K}{\Theta} + \Delta}^{0.5} K \left( \frac{\Theta}{K} (\eta - \Delta) \right)^{m_2} \eta d\eta \right\}. \quad (1)$$

Čia:  $\bar{M}$  – santykinis lenkimo momentas ( $\bar{M} = M / M_{pr}$ );  $K$  – koeficientas, įvertinantis nevienodą priešingąsi tampriai deformacijai tempimo ir gniuždymo atveju [8].

Integralas (1) leidžia apskaičiuoti  $\bar{M}$  reikšmę, pagal kampą  $\Theta$ , arba jį atitinkančią didžiausią deformaciją  $\bar{e}$ , kadangi kampą  $\Theta$ , atstumą  $\eta$  ir deformaciją  $\bar{e}$  sieja tokia priklausomybė:

$$\Theta = \frac{\bar{e}}{\eta}. \quad (2)$$

Paprasčiausiu atveju,  $K = 1$  ir  $m_1 = m_2 = m$  (tada ir  $\Delta = 0$ ), integralą (1) galima užrašyti taip:

$$\bar{M} = 6 \left\{ 2 \int_{\frac{1}{\Theta}}^{0.5} (\Theta \eta)^m \eta d\eta + \int_{\frac{1}{\Theta}}^{\frac{1}{\Theta}} \Theta \eta^2 d\eta \right\}. \quad (3)$$

Kiti paveikluose pateikti parametrai:

- $\eta$  – santykinis bet kurio sluoksnio atstumas nuo stryo skerspjūvio simetrijos ašies;
- $\Delta$  – įtempimų neutraliojo sluoksnio poslinkis nuo neutralios ašies;
- $\Theta$  – santykinis stryo skerspjūvių pokrypių kampas.

Pateiktos lygtys gali būti pritaikytos ciklinio tampriai plastinio grynojo lenkimo tyrimui. Šiuo atveju, deformacijos  $\bar{e}$  ir įtempiai  $\bar{\sigma}$  turi būti pakeisti santykinėmis ciklinėmis deformacijomis  $\bar{\epsilon}$  įtempiais  $\bar{S}$  ( $\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon}{\epsilon_{pr}}$ ,  $\bar{S} = \frac{S}{S_{pr}}$ ). Taigi, bendru atveju galima užrašyti:

$$\bar{M} = 6 \int_{-0.5}^{0.5} \bar{S} \eta d\eta. \quad (4)$$

Irašant  $\bar{S}$  išraiškas, gaunamas (1) integralas, kuriame  $m_1$  ir  $m_2$  pakeičiami atitinkamais ciklinio deformavimo pusciklyje  $k$  laipsnio rodikliais  $m_{1(k)}$  ir  $m_{2(k)}$ . Ciklinio deformavimo atveju koeficientas  $K$  praranda savo prasmę, kadangi, kaip rodo eksperimentiniai tyrimai, cikliškai silpnėjančių, stabilių ir stiprėjančių medžiagų ciklinė proporcingumo riba  $\bar{s}_{pr}$  praktiškai nepriklauso nei nuo pradinės deformacijos  $\bar{e}_0$ , nei nuo pusciklio skaičiaus ir visiems puscikliams laikoma vienoda  $\bar{s}_{pr} = \bar{s}_{prk} = \text{const}$ . Taigi, jei  $K = 1$ , momentas  $\bar{M}$  ciklinio deformavimo atveju užrašomas taip:

$$\bar{M}_k = 6 \left\{ \int_{\frac{1}{\Theta}}^{0.5} (\Theta \eta)^{m_{1(k)}} \eta d\eta + \int_{\frac{1}{\Theta}}^{\frac{1}{\Theta}} \Theta \eta^2 d\eta \right\}$$

$$\left. \frac{1}{\Theta} \int_{\frac{1}{\Theta}}^{\Theta} \Theta \eta^2 d\eta + \int_{\frac{1}{\Theta}}^{\Theta} (\Theta \eta)^{m_{2(k)}} \eta d\eta \right\}, \quad (5)$$

o kai ciklinio deformavimo parametrai (nepriklausomai tempimas ar gniuždymas) konkrečiame pusciklyje įvertinami vienodu laipsnio rodikliu  $m_k$  (t. y., kai  $m_{1(k)} = m_{2(k)}$ ), gaunama tokia išraiška:

$$\bar{M}_k = 6 \left\{ 2 \int_{\frac{1}{\Theta}}^{\Theta} (\Theta \eta)^{m_k} \eta d\eta + \int_{\frac{1}{\Theta}}^{\Theta} \Theta \eta^2 d\eta \right\}. \quad (6)$$

Be to, reikia įvertinti ir tai, kad, esant cikliniam deformavimui, šiek tiek pasikeis ir (2) lygybė:

$$\Theta = \frac{\bar{\epsilon}_k}{\eta}. \quad (7)$$

Taigi, taikant (5) arba (6) integralą, galima nustatyti priklausomybę tarp strypą veikiančio lenkimo momento  $\bar{M}_k$  ir jame atsirandančių didžiausių ciklinių deformacijų  $\bar{\epsilon}_k$ .

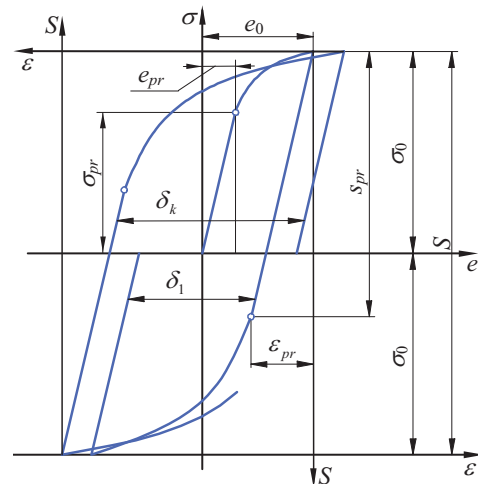
### Laipsnio rodiklio $m_k$ nustatymas

Ciklinio deformavimo įtempiai ir deformacijos dažniausiai vaizduojamos  $S - \epsilon$  koordinatėse, kurių pradžia yra kiekvieno pusciklio tampriosios dalies pradžios (nukrovimo) taške. Ciklinio deformavimo parametrams nustatyti dažniausiai taikomas minkštas apkrovimas (t. y. jo metu ribojami įtempiai), kurio diagrama pavaizduota 2 pav. Esant simetriniam ciklui,  $S - \epsilon$  koordinatė mastelis yra du kartus didesnis už  $\sigma - e$ .

Ciklinio tampriai plastinio deformavimo atveju labai svarbios yra santykinės liekamosios platinės deformacijos, kurias apibūdina diagramos histerizės kilpos plotis:

$$\bar{\delta}_k = A \left( \bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2} \right) k^\alpha, \quad (8)$$

čia:  $A$  – medžiagos konstanta (neporiniams ir poriniams puscikliams ji gali būti skirtinga);  $\alpha$  – laipsnio rodiklis, įvertinantis kilpos pločio kitimo spartą ciklinio deformavimo metu (cikliškai silpnėjančioms medžiagoms  $\alpha > 0$ ; cikliškai stabilioms medžiagoms  $\alpha = 0$ ; cikliškai stiprėjančioms medžiagoms  $\alpha < 0$ ).



2 pav. Ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagrama

Statinio deformavimo laipsnio rodiklis  $m$  nustatomas pagal eksperimentinės deformavimo kreivės taškus pasirinktoje plastinių deformacijų srityje, pvz.,

$$m = \frac{\lg \bar{\sigma}_2 - \lg \bar{\sigma}_1}{\lg \bar{e}_2 - \lg \bar{e}_1}, \quad (9)$$

čia:  $\bar{\sigma}_1$  ir  $\bar{e}_1$  – pasirinkto deformavimo diagramos intervalo pradžios įtempis ir deformacija;  $\bar{\sigma}_2$  ir  $\bar{e}_2$  – pasirinkto deformavimo diagramos intervalo pabaigos įtempis ir deformacija.

Laipsnio rodiklio  $m_k$  reikšmė gali būti nustatoma analitiškai:

$$m_k = \frac{\lg \left( \frac{2}{\bar{s}_{pr}} \bar{e}_0^m \right)}{\lg \left[ \frac{A}{\bar{s}_{pr}} \left( \bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2} \right) k^\alpha + \frac{2}{\bar{s}_{pr}} \bar{e}_0^m \right]}. \quad (10)$$

Jei  $\bar{s}_{pr} = 2$  arba yra artima jai, tai (10) lygybė tampa paprastesnė:

$$m_k = \frac{\lg(\bar{e}_0^m)}{\lg \left[ \frac{A}{2} (\bar{e}_0 - 1) k^\alpha + \bar{e}_0^m \right]}. \quad (11)$$

Didėjant pusciklių  $k$  skaičiui, cikliškai silpnėjančių medžiagų  $m_k$  mažėja, cikliškai stiprėjančių medžiagų  $m_k$  – didėja, o cikliškai stabilių medžiagų  $m_k = \text{const}$ .

Cikliškai anizotropinėms medžiagoms, t. y. toms medžiagoms, kurios nevienodai priešinasi tempimo ir gniuždymo įtempiams, konstanta  $A$  išskaidoma į nelyginių ir lyginių pusciklių konstantas  $A_1$  ir  $A_2$ . Atsižvelgiant į tai, nelyginiams ir lyginiams

puscikliams gaunamos dvi skirtingos laipsnio rodiklio reikšmės  $m_{1(k)}$  ir  $m_{2(k)}$ . (10) ir (11) lygybių išvedimui pateikti darbe [13].

### Analitinių ir eksperimentinių duomenų palyginimas

Aliuminio lydinio D16T1 ciklinio tampriai plastinio eksperimentinių tyrimų tempimo gniuždymo ir gryojo lenkimo duomenys pateikti darbe [2], kur aprašytas ir analitinis stačiakampio skerspjuvio strypo statinio ir ciklinio tampriai plastinio gryojo lenkimo tyrimas, taikant tiesinę deformavimo diagramos tampriai plastinės dedamosios aproksimavimą.

Lydinio D16T1 laipsnio rodiklio  $m$  reikšmės, esant tempimui ir gniuždymui, pateiktos 1 lentelėje. Šioje lentelėje pateikta ir vidutinė  $m$  reikšmė, kuri taip pat gali būti vartojama analitiniuose tyrimuose. Tai leidžia supaprastinti tampriai plastinį deformavimą aprašančių integralinių reiškinių analitines išraiškas ir gauti pakankamai tikslius skaičiavimo rezultatus.

1 lentelė. *Aliminio lydinio D16T1 parametro  $m$  reikšmės*

Tempimas	Gniuždymas	Vidutinė reikšmė
0,171	0,2	0,185

Ciklinio deformavimo laipsnio rodikliai  $m_k$  buvo apskaičiuojami (11) lygybe, įvertinus tai, kad lydinio D16T1 neporinių ir porinių pusciklių konstanta  $A = 0,66$ , o parametras  $\alpha = -0,46$ . Gautos  $m_k$  reikšmės pateiktos 2 lentelėje.

2 lentelė. *Aliminio lydinio D16T1  $m_k$  reikšmės*

Pusciklis k	1	3	5	10	16
$m_k$	0,293	0,373	0,416	0,479	0,524

Stačiakampio skerspjuvio bandinių tampriai plastinio gryojo lenkimo eksperimentiniai tyrimai aprašyti darbe [2]. Eksperimentai atlikti tempimo gniuždymo bandymų mašina, jos griebtuvuose sumontavus specialų įrenginį. Šiuo įrenginiu bandinio vidurinė (darbinė) dalis, kurios ilgis 25 mm, buvo veikiamas vienodu lenkimo momentu. Ciklinio lenkimo diagrama buvo užrašoma savirašiu-valdikliu.

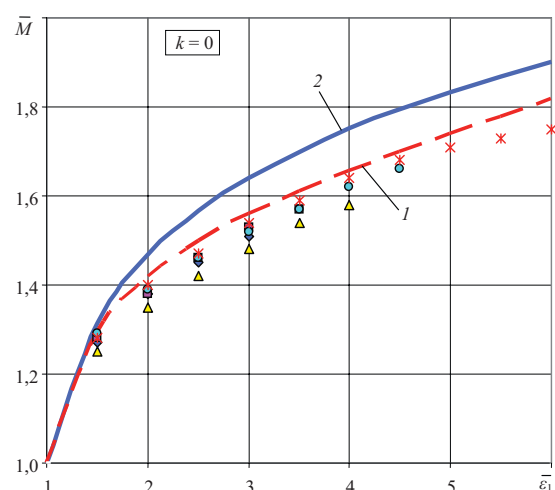
Teoriniai gryojo lenkimo momentai buvo apskaičiuojami (6) integralu, kadangi paprastumo dėlei, buvo laikomasi nuostatos, kad kiekvieno pus-

ciklio laipsnio rodiklio  $m_k$  reikšmės yra vienodos tiek tempimui, tiek ir gniuždymui. Šis supaprastinimas pagrįstas tuo, kad priešingai tempimo-gniuždymo atveju lenkiamų elementų skerspjuviuose tempimo ir gniuždymo įtempiai atsiranda vienu metu, nepriklausomai nuo pusciklio skaičiaus. Santykinis skerspjuvių pokrypių kampas  $\Theta$  buvo apskaičiuojamas (7) lygybe.

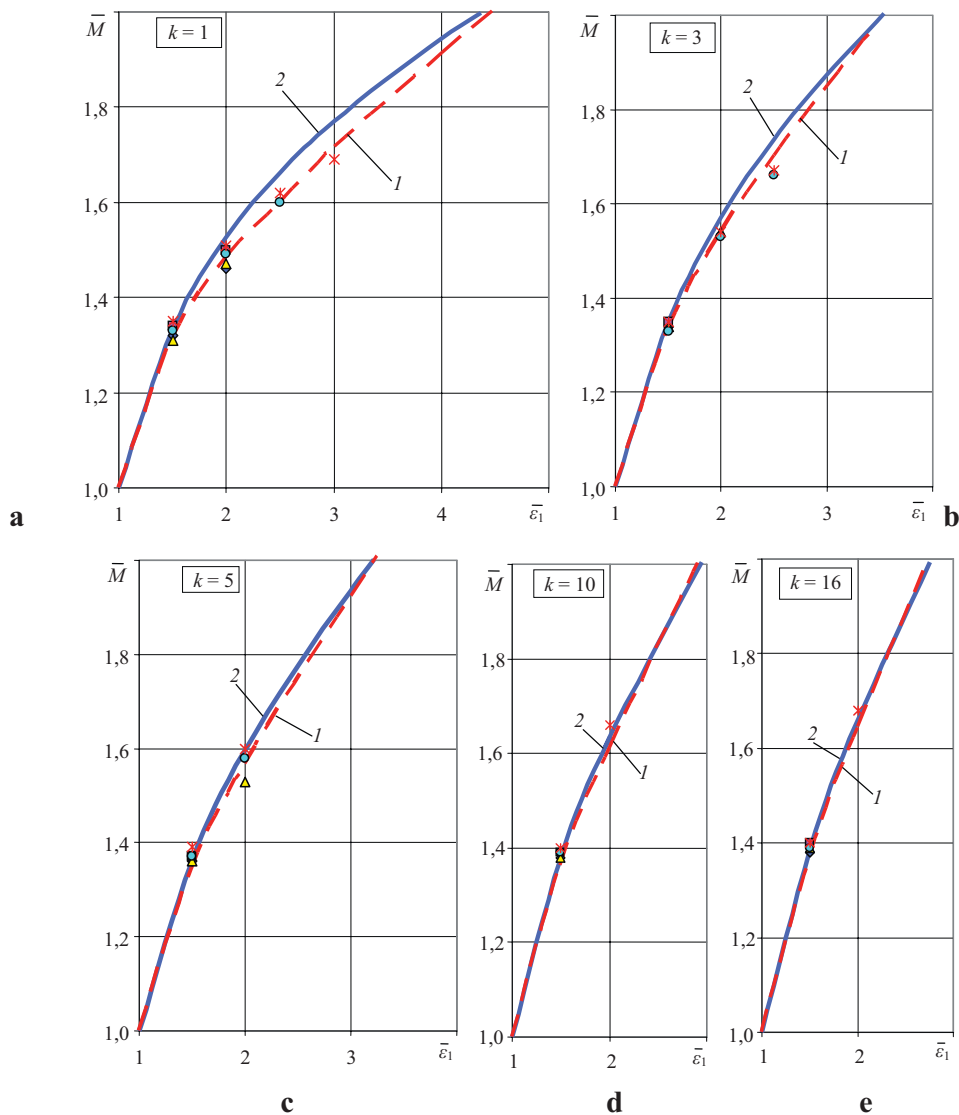
Gautos analitinės stačiakampio skerspjuvio strypo statinio ir ciklinio gryojo lenkimo momentų  $\bar{M}$  reikšmės deformacijų intervale  $1,5 < \bar{\epsilon}_k < 6$  yra pateiktos 3 lentelėje, o analitinės  $\bar{M}$  kreivės, apskaičiuotos taikant tiesinę ir laipsninę aproksimaciją, pateiktos 3 ir 4 pav. Šiuose grafikuose pažymėti ir eksperimentiniai taškai. Kaip matyti iš grafikų, taikant tiek tiesinį, tiek ir laipsninę aproksimą, ciklinio lenkimo kreivės sutapo su eksperimentinių tyrimų rezultatais. Tik nulinio pusciklio teorinės kreivės išsidėstė aukščiau eksperimentinių taškų. Taigi, nagrinėjamame deformacijų intervale gali būti sėkmingai taikomi abu aproksimavimo atvejai.

3 lentelė. *Analitinės deformavimo grynuoju lenkimo momentų  $\bar{M}$  reikšmės*

Pusciklis k	Deformacija $\bar{\epsilon}$ ; $\bar{\epsilon}$					
	1,5	2	3	4	5	6
0	1,314	1,468	1,641	1,751	1,834	1,902
1	1,336	1,526	1,771	1,945	2,084	2,203
3	1,353	1,571	1,875	2,103	2,293	2,458
5	1,362	1,596	1,934	2,194	2,415	2,608
10	1,376	1,634	2,025	2,338	2,608	2,849
16	1,386	1,662	2,094	2,447	2,757	3,036



3 pav. Aliuminio lydinio D16T1 stačiakampio skerspjuvio strypo statinio lenkimo analitinės kreivės (1 – tiesinė aproksimacija [2]; 2 – laipsninė aproksimacija) ir eksperimentiniai taškai



**4 pav.** Aliuminio lydinio D16T1 stačiakampio skerspjūvio strypo ciklinio lenkimo analitinės kreivės (*1* – tiesinė aproksimacija [2]; *2* – laipsninė aproksimacija) ir eksperimentiniai taškai: a)  $k = 1$ ; b)  $k = 3$ ; c)  $k = 5$ ; d)  $k = 10$ ; e)  $k = 16$

### Išvados

1. Darbe pateikta metodika leidžia modeliuoti ciklinį tampriai plastinį stačiakampio skerspjūvio strypų grynąjį lenkimą, taikant laipsninį deformavimo diagramos plastinės dedamosios aproksimavimą.
2. Taikant metodiką, apskaičiuotos aliuminio lydinio D16T1 stačiakampio skerspjūvio strypo statinio ir ciklinio deformavimo grynųjų lenkimo momentų kreivės.
3. Teorinės momentų kreivės lygintos su eksperimentiniais duomenimis; nustatytas geras eksperimentinių ir analitinių duomenų sutapimas. Statinio lenkimo atveju paklaida neviršijo 8%; ciklinio lenkimo atveju maksimali paklaida 4%.
4. Pasirinktame deformacijų intervale, analitinės lenkimo momentų kreivės ir kiti ciklinio deformavimo parametrai gali būti tiksliai nustatomi

taikant tiesinį ir laipsninį diagramos plastinės dedamosios aproksimavimą.

### Literatūra

1. Daunys M., 2005, Ciklinis konstrukcinis stiprumas ir ilgaamžiškumas. *Technologija*. Kaunas.
2. Daunys M., 1964, Stačiakampių strypų skaičiavimas lenkimui už proporcingumo ribų. *Lietuvos TSR aukštųjų mokyklų mokslo darbai. Elektrotechnika ir mechanika*. III. P. 61–69.
3. Daunys M., Rimovskis S., 2002, Analysis of circular cross-section bar, loaded by static and cyclic elastoplastic pure bending. *Mechanika*. Nr. 1 (33). P. 5–10.
4. Daunys M., Rimovskis S., 2002, Analysis of low-cycle loading characteristics at pure bending. *Mechanika*. Kaunas, Nr. 5 (37). P. 5–9.
5. Daunys M., Rimovskis S., 2003, Analysis of Low-cycle Strength and Durability of steel 45 at Pure Bending. *Mechanika*. Nr. 1 (39). P. 5–10.

6. Rimovskis S., 2003, Research of low cycles strength and durability under pure bending. *Summary of doctoral dissertation*. Kaunas. P. 26.
7. Uzėla S., Rimovskis S., 2005, Theoretical Analysis of Rectangular Cross-Section Power-Hardening Element under Pure Bending. *Journal of Young Scientists*. Nr. 6 (2). P. 119–123.
8. Paulauskas A., Rimovskis S., Sabaliauskas S., 2008, Analysis of circular cross section power hardening element under pure bending. *Mechanika*. P. 398–402.
9. Paulauskas A., Rimovskis S., Sabaliauskas A., 2008, Skritulinio skerspjuvio strypo tampriai plastinio grynojo lenkimo tyrimas. *Jaunujų mokslininkų darbai*. Nr. 21 (5). P. 27–32.
10. Uzėla S., 2005, Stačiakampio skerspjuvio elementų tampriai plastinio grynojo lenkimo tyrimas. *Magistro darbas*. Šiauliai. P. 46.
11. Серенсен С. В., Когаев В. П., Шнейдерович Р. М., 1975, Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. *Руководство и справочное пособие*. Москва: Машиностроение.
12. Шнейдерович М., 1968, *Прочность при статическом и повторно-статическом нагружениях*. Москва: Машиностроение.
13. Šimulis M., Rimovskis S., 2006, Ciklinio tampriai plastinio deformavimo kreivių aproksimavimo tyrimas. *Jaunujų mokslininkų darbai*. Nr. 10 (3). P. 80–85.

## ANALYSIS OF RECTANGULAR CROSS-SECTION BEAM UNDER CYCLIC ELASTIC-PLASTIC PURE BENDING

*Romas Stakauskas, Sergėjus Rimovskis, Artūras Sabaliauskas*

### Summary

Analysis of rectangular cross-section beam loaded by cyclic elastic-plastic pure bending is presented in the paper. The simple power relation of stress strain curve in the region of uniform static and cyclic plastic deformation is used. Derived mathematical relationships allow calculating dimensionless bending moment versus monotonic static and cyclic strain. Theoretical bending moment curves are compared with experimental data of aluminium alloy D16T1. Results of theoretical and experimental analysis show quite good concurrence.

**Keywords:** pure bending, elastic-plastic bending, cyclic bending.

## STAČIAKAMPIO SKERSPJŪVIO STRYPO CIKLINIO TAMPRIAI PLASTINIO GRYNOJO LENKIMO TYRIMAS

*Romas Stakauskas, Sergėjus Rimovskis, Artūras Sabaliauskas*

### Santrauka

Straipsnyje pristatomas stačiakampio skerspjuvio strypo, apkrauto statiniu ir cikliniu tampriai plastiniu grynoju lenkimu, tyrimas. Taikomas statinės ir ciklinės deformavimo diagramos plastinės dedamosios aproksimavimas laipsnine funkcija. Vartojant pateiktą skaičiavimo metodiką, galima nustatyti lenkimo momentų priklausomybes nuo didžiausių strype atsirandančių deformacijų. Teorinės statinio ir ciklinio deformavimo momentų kreivės buvo lyginamos su eksperimentinėmis aliuminio lydinio D16T1 kreivėmis. Gautas pakankamai geras rezultatų sutapimas.

**Prasminiai žodžiai:** grynasis lenkimas, tampriai plastinis, ciklinis.

Įteikta 2009-09-02