

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Romas Stakauskas

STAČIAKAMPIO SKERSPJŪVIO STRYPO CIKLINIO
TAMPRIAI PLASTINIO GRYNOJO LENKIMO TYRIMAS

Magistro darbas

Darbo vadovas:

doc. dr. S. Rimovskis

Šiauliai, 2009

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

dr. S. Sabaliauskas

2009 06

STAČIAKAMPIO SKERSPJŪVIO STRYPO CIKLINIO
TAMPRIAI PLASTINIO GRYNŲJO LENKIMO TYRIMAS

Magistro darbas

Vadovas:

doc. dr. S. Rimovskis

2009 06

Atliko:

MM-7 gr. stud.

R. Stakauskas

2009 06

Recenzentas

ŠU TF Mechanikos inžinerijos katedros

dr. A. Sabaliauskas

2009 06

Šiauliai, 2009

Stakauskas R. Research of rectangular cross-section bar loaded by cyclic elastic plastic pure bending: Master thesis of mechanical research advisor dr. S. Rimovskis; Šiauliai University, Technological Faculty, Mechanical Engineering Department. - Šiauliai 2009. – 36 p.

SUMMARY

Assesment of machines and structures reliability and durability depends on static and cyclic strenght analysis of its details and components. Static strenght analysis is performed if load is steady (not time-dependant). But usually, machine's details and components are under cyclicaly varying forces. Thus, designers must perform cyclic stress-strain analysis and fatigue analysis of elements.

This work presents analytical research of ractangular cross-section bar under cyclic elastic plastic (low-cycle) pure bending. The simple power relation of stress strain response in the region of plastic deformation is used in both – static and cyclic loading analysis. The relationships describing non-dimensional bending moment in every semi-cycle are presented. Results of theoretical analysis are compared with experimental date. Cyclically hardening material (aluminium alloy D16T1) was used in experiments.

TURINYS

SUMMARY	3
TURINYS.....	4
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	5
PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS	6
ĮVADAS.....	7
1. TAMPRIAI PLASTINIO DEFORMAVIMO DIAGRAMOS IR JŲ CHARAKTERISTIKOS 9	
1.1 Statinio tampriai plastinio deformavimo diagramos	9
1.2 Ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagramos.....	12
1.3 Aliuminio lydinio D16T1 statinio ir ciklinio deformavimo charakteristikų nustatymas	17
2. CIKLINIO TAMPRIAI PLASTINIO GRYNOJO LENKIMO ANALITINIS TYRIMAS	22
3. ANALITINIŲ IR EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ DUOMENŲ PALYGINIMAS.....	27
IŠVADOS.....	30
LITERATŪRA.....	31
PRIEDAI	33

LENTELIŲ SĄRAŠAS

Aluminio lydinio D16T1 aproksimavimo parametrų reikšmės	18
Aluminio lydinio D16T1 ir reikšmės	21
Statinio ir ciklinio deformavimo grynuoju lenkimu momentų reikšmės, apskaičiuotos naudojant laipsninę deformavimo diagramos plastinės dalies aproksimaciją	28

PAVEIKSLĖLIŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Statinio tempimo programa	9
1.2 pav. Statinio deformavimo kreivė (1) ir jos plastinės dedamosios aproksimavimas: 2 – tiesinis; 3 – laipsninis.....	11
1.3 pav. Ciklinio tampriai plastinio deformavimo nulinio ir 1 pusciklio kreivės	13
1.4 pav. Ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagrama	14
1.5 pav. Aliuminio D16T1 statinio tempimo (1) ir gniuždymo (2) diagrama.....	18
1.6 pav. Aliuminio lydinio D16T1 tempimo ir gniuždymo diagramos ir jų aproksimavimas tiese bei laipsnine funkcija	18
1.7 pav. Aliuminio lydinio D16T1 ciklinio deformavimo diagrama	20
2.1 pav. Deformacijų (a) ir įtempių (b) pasiskirstymo lenkiamo strypo išilginiame pjūvyje schema	23
3.1 pav. Aliuminio lydinio D16T1 stačiakampio skerspjuvio strypo statinio lenkimo analitinės kreivės (1 –tiesinė aproksimacija; 2 – laipsninė aproksimacija) ir eksperimentiniai taškai	28
3.2 pav. Aliuminio lydinio D16T1 stačiakampio skerspjuvio strypo ciklinio lenkimo analitinės kreivės (1 –tiesinė aproksimacija; 2 – laipsninė aproksimacija) ir eksperimentiniai taškai	29

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 sugebėjimas priešintis statinėms, lėtai kintančioms arba visai nekintančioms laike apkrovoms. Statinėmis apkrovomis dažniausiai veikiamos korpusinės, tvirtinimo detalės. Jei mechanizmai eksploatuojami aukštesnių temperatūrų sąlygomis, dažnai įvertinamas detalių atsparumas ilgalaikėms statinėms apkrovoms (valkšnumo ir relaksacijos reiškiniai).

Tačiau mašinos – tai mechaninius judesius atliekantys įrenginiai, todėl, pagrindinės jų detalės (pvz., velenai, ašys, krumpliaračiai) yra veikiamos ciklinėmis apkrovomis. Tokiu atveju, detalių skerspjūvyje įtempimai kinta periodiškais ciklais. Jei maksimalūs įtempimai nesiekia detalės medžiagos tamprumo ribos, ciklų skaičius skaičiuojamas milijonais arba dešimtimis milijonų – vyksta daugiacyklis detalės deformavimas. Jei ciklinio deformavimo metu įtempimai viršija tamprumo ribą, detalėje atsiranda liekamosios plastinės deformacijos ir jos ilgaamžiškumas sumažėja iki kelių arba keliasdešimt tūkstančių ciklų. Toks deformavimas vadinamas mažacikliu [1].

Pirmasis metalų ciklinį deformavimą aprašė vokiečių inžinierius Wilhelm Albert 1837 m. Po dviejų metų kitas inžinierius prancūzas Jean-Victor Poncelet pirmą kartą panaudojo sąvoką „metalų nuovargis“. Tačiau tuo metu buvo atliekami tik eksperimentiniai detalių ciklinio deformavimo tyrimai, o pirmieji teoriniai darbai pasirodė tik XX a. pradžioje. 1910 m. O. H. Basquin pasiūlė labai patogų logaritminį SN kreivės aprašymą, o 1953 m. L. F. Coffin ir S. S. Manson nepriklausomai vienas nuo kito paskelbė plastines deformacijas ir ciklų skaičių iki suirimo siejančią priklausomybę, kuri buvo pavadinta jų vardu [2].

Šiuo metu yra 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, įtempimai ir deformacijos detalės skerspjūvyje pasiskirsto nevienodai – jie kinta nuo maksimalios teigiamos iki maksimalios neigiamos reikšmės, be to, jame yra neutralioji linija (joje įtempimai ir deformacijos lygios 0).

Esant tampriai plastiniam deformavimui, įtempimų-deformacijų pasiskirstymas lenkiamame skerspjūvyje tampa dar sudėtingesnis. Čia 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 [3-7]. Juose

autoriai naudojo tiesinę įtempimų deformacijų kreivės plastinės dedamosios aproksimavimą. Statinio grynojo lenkimo skaičiavimai taikant laipsninę aproksimaciją pateikti darbuose [8-10]. Autoriai nagrinėjo stačiakampio ir skritulinio skerspjuvio elementus. Šiuose darbuose pateiktos lygybės, leidžiančios nustatyti įtempimų neurtaliojo sluoksnio padėties kitimą, bei lenkimo momentų ir maksimalių strypo deformacijų priklausomybes, kai tampriai plastinis tempimas ir gniuždymas įvertinamas nevienodais parametrais.

Šis darbas – tai S. Uzėlos atliktų tyrimų, aprašytų magistro darbe [11], tęsinys. Jame atliekamas stačiakampio skerspjuvio elemento ciklinio tampriai plastinio grynojo lenkimo analitinis tyrimas, taikant laipsninę ciklinio deformavimo kreivės plastinės dedamosios aproksimavimą, kuris detaliai išnagrinėtas darbe [12]. Analitinio tyrimo rezultatai palyginami su eksperimentiniais stačiakampio skerspjuvio aliuminio lydinio D16T1 ciklinio grynojo lenkimo už proporcingumo ribų duomenimis. Šie duomenys buvo gauti M. Daunio ir paskelbti darbe [3].

Darbo tikslas: atlikti stačiakampio skerspjuvio strypo ciklinio tampriai plastinio grynojo lenkimo analitinį tyrimą, naudojant laipsninę deformavimo kreivės plastinės dedamosios aproksimaciją. Gautus skaičiavimų duomenis palyginti su eksperimentų rezultatais.

Tikslui pasiekti keliami uždaviniai:

1. išanalizuoti mokslinę literatūrą, nagrinėjančią, statinio ir ciklinio deformavimo diagramų aproksimavimo metodus;
2. išnagrinėti statinį ir ciklinį tampriai plastinį grynąjį lenkimą bei šio apkrovimo būdo analitinius tyrimo metodus;
3. atlikti stačiakampio skerspjuvio elemento, apkrauto cikliniu tampriai plastiniu grynuoju lenkimu, analitinį skaičiavimą, taikant laipsninę deformavimo diagramos plastinės dedamosios aproksimavimą;
4. palyginti eksperimentinius duomenis su analitinių tyrimų rezultatais.

Praktinė darbo svarba: Darbe pateikti tampriai plastinio grynojo lenkimo analitiniai ir eksperimentiniai tyrimai, skaičiavimo metodika bei gauti jų rezultatai gali turėti praktinį pritaikymą projektuojant naujas kintančiomis apkrovomis veikiamų mechaninių sistemų konstrukcijas ar atskirus jų mazgus, kuriuose naudojamos stačiakampio skerspjuvio lenkiami elementai, bei nustatant tokiu sistemų patikimumo ir ilgaamžiškumo rezervus.

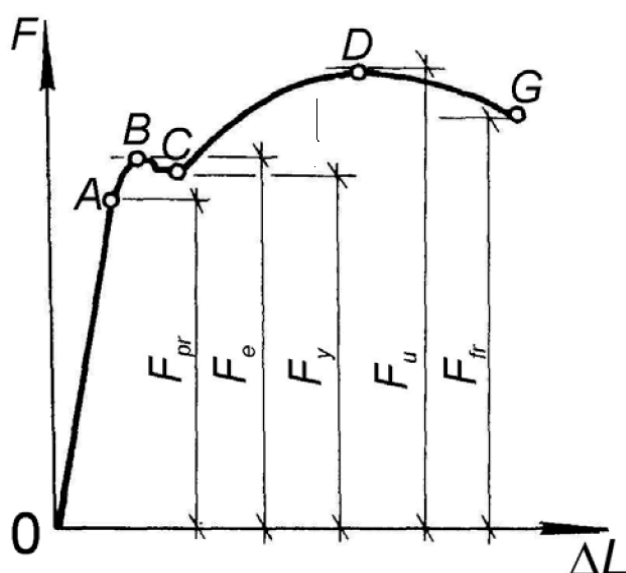
Darbo struktūra: Magistro darbą sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas, 3 priedai. Darbo apimtis: 33 puslapiai, 10 iliustracijų ir 3 lentelės.

1. TAMPRIAI PLASTINIO DEFORMAVIMO DIAGRAMOS IR JŲ CHARAKTERISTIKOS

1.1 Statinio tampriai plastinio deformavimo diagramos

Deformacija – tai kūno formos arba tūrio pasikeitimas, įvykstantis tą kūną veikiant išorinėmis jėgomis. Deformacijos, kurios visiškai išnyksta nustojus veikti išorinėms jėgoms, vadinamos tampriosiomis (elastinga deformacija). Deformacijos, kurios neišnyksta nustojus veikti išorinėms jėgoms, vadinamos plastinėmis.

Paprasčiausias deformavimo atvejas - statinis tempimas. Tipiška bandinio iš anglinio plieno statinio tempimo diagrama pateikta 1.1 pav.



1.1 pav. Statinio tempimo programa

Ši diagrama nustatoma eksperimentiškai ir brėžiama koordinatėse $F - \Delta L$ (jėga –santykinis pailgėjimas). Medžiagos savybes charakterizuojanti diagrama brėžiama koordinatėse $\sigma - e$ (įtempimas-deformacija). Pagal diagramos formą bei plastinės deformacijos dydį galima nuspręsti, ar tiriamą medžiaga yra trapi ar plastiška.

Dažniausiai išskiriamos penkios diagramos dalys, kurios apibūdinamos ribiniais įtempimais ir deformacijomis: A – proporcingumo riba; B – tamprumo riba; C – takumo riba; D – stiprumo riba; G – trūkimo riba.

Dėl labai mažo skirtumo, tarp proporcingumo ir tamprumo ribos, jas sunku tiksliai nustatyti, todėl medžiagų savybių žinynuose jos neišskiriamos. Šiame darbe taip pat laikomasi nuostatos, kad šios ribos yra vienodos.

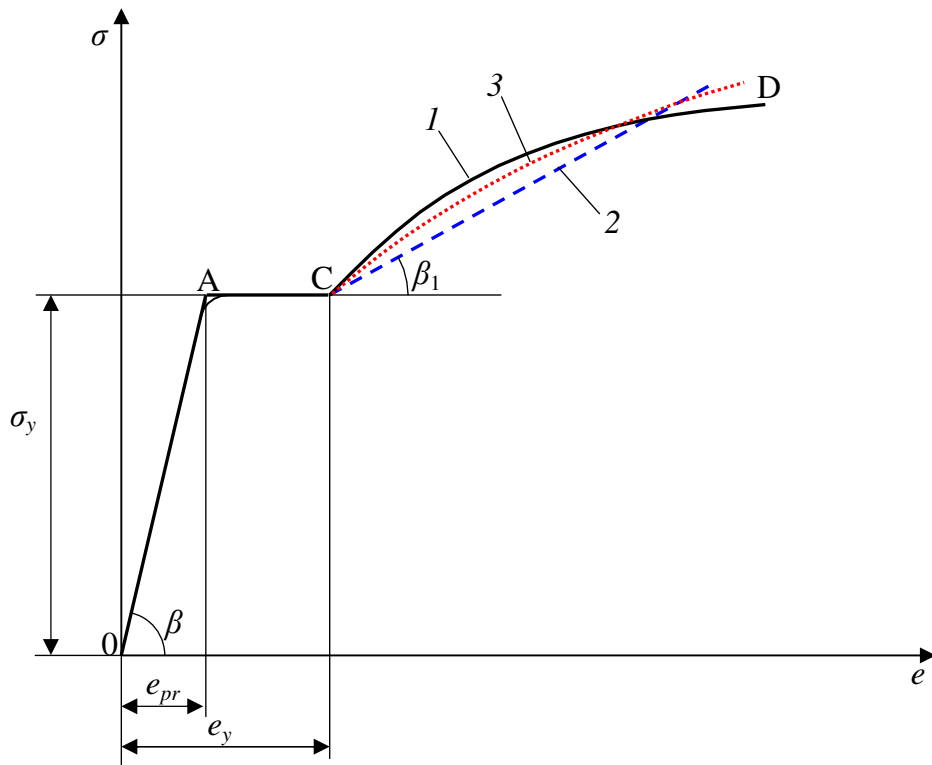
Tampriosios medžiagų (pvz., metalų) deformacijos yra nedidelės. Šioje diagramos dalyje įtempimai ir deformacijos kinta tiesine priklausomybė (pagal Huko dėsnį). Viršijus tamprumo ribą (σ_e), diagrama pereina į kreivę, prasideda plastinės deformacijos. Kai kurios medžiagos šioje dalyje turi takumo aikštelę (σ_y). Jei tokios aikštelės nėra, takumo riba sąlyginai prilyginama įtempimui, kurį pasiekus liekamoji plastinė deformacija yra lygi 0,2 % ($\sigma_{0.2}$). Toliau plastiškai deformuojant bandinį pasiekiami maksimalūs stiprumo ribos įtempimai (σ_u). Šioje zonoje pradeda ryškėti bandinio būsimo trūkimo vieta – kaklelis. Peržengus šią ribą, medžiaga deformuojasi be apkrovos didėjimo ir diagramos taške G bandinys nutrūksta. Įvertinant medžiagos tikrąjį stiprumą, tenka atsižvelgti ir į bandinio skerspjuvio mažėjimą, kuris taip pat labiausiai išryškėja paskutinėje deformavimo stadijoje.

Stiprumo skaičiavimuose, kai viršijama proporcingumo riba, yra labai svarbu pasirinkti tinkamą diagramos aproksimavimo būdą. Diagramos aproksimavimas – tai realiosios tempimo kreivės pakeitimas schematizuota, turinčia tam tikrą analitinę išraišką, keive. Kadangi pati diagrama yra pakankamai sudėtinga, tai aproksimuojamos atskiros jos dalys.

Kaip jau buvo minėta, iki proporcingumo (tamprumo) ribos, kuriai galioja Huko dėsnis, deformavimo diagrama tiesiog pakeičiama tiese. Šiame darbe nenagrinėjamas atvejas, kai esant tampriam deformavimui, tarp įtempių ir deformacijų yra netiesinis ryšys. Taip deformuojamos gumos, kurias nukraunant, įtempiai ir deformacijos mažėja pagal tą pačią kreivę, kaip apkrovimo metu.

Deformavimo diagramos plastinės dedamosios aproksimavimas yra sudėtingesnis ir priklauso nuo realios kreivės pavidalo. Aproksimavimo būdų yra daug, tačiau patys populiariausi – aproksimavimas tiese, laipsnine funkcija, poligonalinis (sudarytas iš kelių tiesių) aproksimavimas. Jei diagrama turi takumo aikštelę, ją galima pakeisti horizontalia tiese. Plastinio deformavimo kreivę nuo takumo ribos (o jei jos nėra – nuo tamprumo ribos) dažniausiai tenka aproksimuoti vienu iš išvardintų būdų, pasirenkant tokį plastinių deformacijų intervalą, kuris neviršytų skaičiavimuose gautas deformacijas. Akivaizdu, kad ši trečioji diagramos dalis gali būti aproksimuojama tik iki stiprumo ribos taško D.

Tiesinio ir laipsninio aproksimavimo pavyzdžiai pateikti 1.2 pav.



1.2 pav. Statinio deformavimo kreivė (I) ir jos plastinės dedamosios aproksimavimas: 2 – tiesinis; 3 – laipsninis

Aproksimavimas tiese yra paprasčiausias. Jo privalumas yra tai, kad gaunamos nesudėtingos įtempimus ir deformacijas aprašančios analitinės išraiškos. Medžiagai su takumo aikštele, deformavimo kreivė pakeičiama trejomis laužytomis linijomis. Linijos OA posvyrio kampo β tangentas yra lygus tamprumo moduliui E . Linijos CD posvyrio kampo β_1 tangentas lygus sustiprėjimo modulis E_T . Taigi, diagramos dalis OA aprašoma lygybe

$$\sigma = Ee, \quad (1.1)$$

dalis AC aprašoma lygybe

$$\sigma = \sigma_y, \quad (1.2)$$

o dalis CD

$$\sigma = Ee_y + E_T(e - e_y). \quad (1.3)$$

Jei taikomas laipsninis aproksimavimas, tai vietoj (1.3) lygybės naudojama

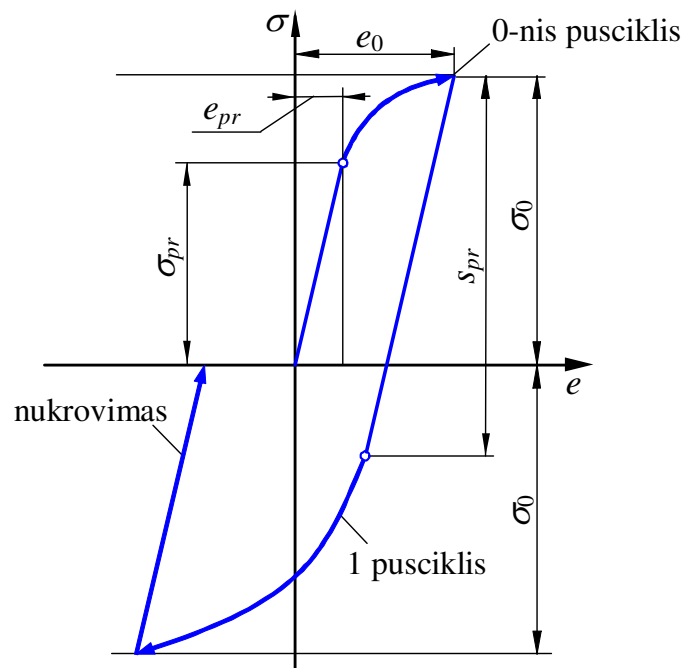
$$\sigma = \sigma_y \left(\frac{e}{e_y} \right)^m \quad (1.4)$$

čia: m – laipsnio rodiklis, nustatomas diagramos dalį BC atidėjus logritminėse koordinatėse $\lg(\sigma/\sigma_y) - \lg(e/e_y)$.

Jei takumo aikštelės nėra, tai (1.3) ir (1.4) lygybėse σ_y ir e_y pakeičiami atitinkamai σ_{pr} ir e_{pr} .

1.2 Ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagramos

Ciklinio deformavimo metu, elementą veikianti apkrova kinta periodiškai pulsuojančiais ciklais. Šių elementų skerspjūviuose įtempimai ir deformacijos taip pat kinta ciklais nuo maksimalios iki minimalios reikšmės. Jei įtempimai viršija proporcingumo ribą, atsiranda liekamosios plastinės deformacijos, todėl diagramose matoma histerizės kilpa. 1.3 pav. pavaizduotos simetrinio pulsuojančio ciklo nulinio ir 1-ojo pusciklio kreivės $\sigma - e$ koordinatėse.



1.3 pav. Ciklinio tampriai plastinio deformavimo nulinio ir 1 pusciklio kreivės

Ciklinios deformavimo įtempimai ir deformacijos dažniausiai vaizduojamos $S - \varepsilon$ koordinatėse, kurių pradžia yra kiekvieno pusciklio tampriosios dalies pradžios (nukrovimo) taške (žr. 1.4 pav.). Esant simetriniam ciklui, $S - \varepsilon$ koordinatinių mastelis yra du kartus didesnis už $\sigma - e$. Taigi, kiekvieno pusciklio diagramą apibūdina tokie pagrindiniai parametrai:

- įtempimas S_k ;
- deformacija ε_k ;
- proporcingumo riba S_{pr} ;
- liekamoji deformacija arba histerezio kilpos plotis δ_k .

Indeksas k nurodo parametrų S_k , ε_k ir δ_k pusciklio numerį. Ciklinė proporcingumo riba S_{pr} deformavimo metu kinta nežymiai, visiems puscikliams jos reikšmė yra vienoda ($S_{pr} = const$), todėl indeksas k nerašomas.

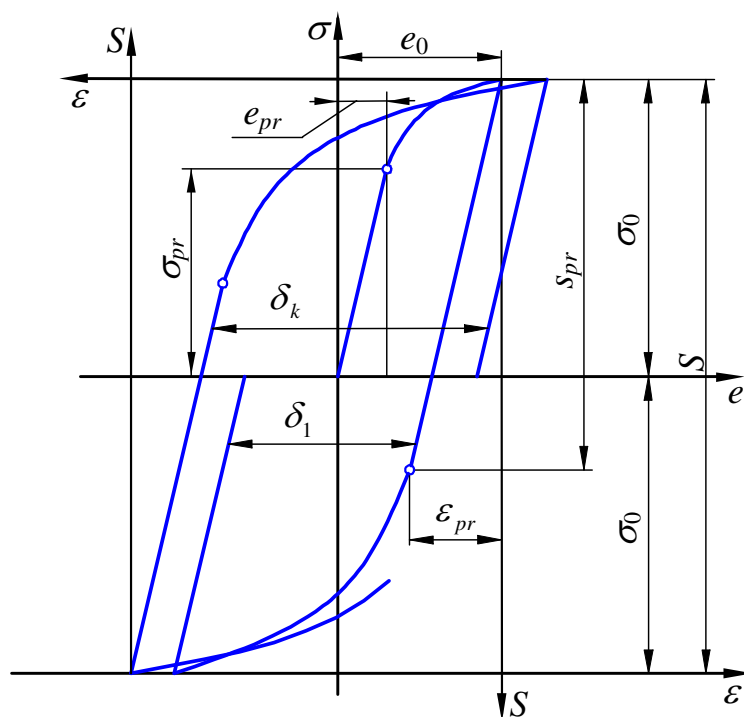
1.4 pav. yra pavaizduota deformavimo diagramos nulinio, 1-ojo ir k -tojo pusciklio kreivės. Taikomas minkštas apkrovimo tipas (ribojami įtempimai S). Šiuo atveju deformacijos ε ir δ kinta nevaržomai. Iš paveikslo matyti, kad jame pavaizduota cikliška silpnėjančios medžiagos diagrama, kadangi $\delta_1 < \delta_k$. Priešingu atveju (kai $\delta_1 > \delta_k$), medžiaga yra cikliška stiprėjanti. Kai kurios medžiagos yra cikliška stabilios, jų liekamosios deformacijos nekinta ($\delta_k = const$). Būtina pažymėti ir tai, kad yra medžiagos (dažniausiai tai plienai), kurios neišlaiko pastovių ciklinių savybių – pradžioje jos silpnėja, o po tam tikro ciklų skaičiaus stabilizuojasi arba stiprėja.

Tuo atveju, kai ribojamos deformacijos, gaunamas standus ciklinis apkrovimas. Esant šiam apkrovimo tipui, kinta įtempimai: cikliška stiprėjančių medžiagų S didėja, silpnėjančių – S mažėja, stabilių – išlieka pastovūs. Visi šie atvejai yra plačiai aprašyti daugelio autorių darbuose [1, 2, 13, 14].

Skaičiavimuose ir eksperimentiniuose tyrimuose taikomos santykinės statinio ir ciklinio deformavimo parametrų išraiškos. Jie žymimi su brūkšneliu virš simbolio:

$$\bar{e}_0 = \frac{e_0}{e_{pr}}; \bar{\sigma}_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_{pr}}; \bar{s}_{pr} = \frac{S_{pr}}{\sigma_{pr}}; \bar{S}_k = \frac{S_k}{\sigma_{pr}}; \bar{\varepsilon}_k = \frac{\varepsilon_k}{e_{pr}}; \bar{\delta}_k = \frac{\delta_k}{e_{pr}}.$$

Koordinatės $\bar{\sigma} - \bar{e}$ ir $\bar{S} - \bar{\varepsilon}$ yra patogesnės skaičiavimuose, kadangi santykiniai parametrai parodo, kiek yra viršyta medžiagos proporcingumo riba.



1.4 pav. Ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagrama

Ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagramų aproksimavimas yra išsamiai aprašytas darbuose [12] ir [13]. Būtina pažymėti, kad nepriklausomai nuo to, ar statinio apkrovimo atveju medžiaga turi takumo aikštelę ar ne, visose ciklinio deformavimo diagramose (nepriklausomai nuo k) takumo aikštelės nėra. Taigi, ciklinio deformavimo kreivė sudaryta iš dviejų dedamųjų – tampriosios ir plastinės.

Kaip ir statinio apkrovimo atveju, dažniausiai yra taikomi 1.1 skyriuje aprašyti aproksimavimo būdai. Tamprioji dedamoji deformacijų srityje $\bar{\varepsilon}_k \leq \bar{\varepsilon}_{pr}$ išreiškiama tokia priklausomybe:

$$\bar{S}_k = \bar{\varepsilon}_k, \quad (1.5)$$

plastinė dedamoji deformacijų srityje $\bar{\varepsilon}_k > \bar{\varepsilon}_{pr}$, taikant tiesinę aproksimaciją aprašoma lygybe

$$\bar{S}_k = G_k (\bar{\varepsilon}_k - 1) + 1, \quad (1.6)$$

taikant laipsninę aproksimaciją,

$$\bar{S}_k = \bar{\varepsilon}_k^{m_k}, \quad (1.7)$$

čia: $G_k - k$ pusciklio santykinis sustiprėjimo modulis;

$m_k - k$ pusciklio laipsnio rodiklis.

Statinio deformavimo parametrai G_T ir m nustatomi pagal eksperimentinę statinio tempimo kreivę. Ciklinio deformavimo atveju, kiekvieno pusciklio k parametrai G_k ir m_k dažniausiai būna skirtingi, todėl nustatomos jų analitinės išraiškos. Šie parametrai priklauso nuo ciklinių medžiagos charakteristikų.

Nagrinėjant ciklinį tampriai plastinį deformavimą, labai svarbu išsiaiškinti diagramos histerizės kilpos pločio kitimą, kuris nustatomas lygybe [1]:

$$\bar{\delta}_k = A \left(\bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2} \right) k^\alpha, \quad (1.8)$$

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

Bendru atveju, sustiprėjimo modulis G_k gali būti apskaičiuojamas tokia lygybe:

$$G_k = \frac{1 - G_T + G_T \bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2}}{\frac{A}{2} \left(\bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2} \right) k^\alpha + 1 - G_T + G_T \bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2}}. \quad (1.9)$$

Tuo atveju, kai santykinė ciklinio proporcingumo riba $\bar{s}_{pr} = 2$, arba yra artima jai, (1.9) lygybė tampa paprastesnė:

$$G_k = \frac{1}{\frac{Ak^\alpha}{2G_T} + 1}. \quad (1.10)$$

Iš (1.9) ir (1.10) lygybių matyti, kad G_k priklauso nuo medžiagos statinio deformavimo parametrų ir nuo ciklinių savybių. Svarbus yra ir pasirenkamas pradinių deformacijų (nulinio pusciklio) intervalas e_0 . Didėjant pusciklių k skaičiui, cikliškai silpnėjančių medžiagų G_k reikšmė mažėja, cikliškai stiprėjančių medžiagų G_k – didėja, o cikliškai stabilių medžiagų $G_k = const$.

Statinio deformavimo laipsnio rodiklio m reikšmė dažniausiai nustatoma pagal eksperimentinės deformavimo kreivės taškus, pasirinktoje plastinių deformacijų srityje, pvz.,

$$m = \frac{\lg \bar{\sigma}_2 - \lg \bar{\sigma}_1}{\lg \bar{e}_2 - \lg \bar{e}_1}, \quad (1.11)$$

čia: $\bar{\sigma}_1$ ir \bar{e}_1 – pasirinkto deformavimo diagramos intervalo pradžios įtempimas ir deformacija;

$\bar{\sigma}_2$ ir \bar{e}_2 – pasirinkto deformavimo diagramos intervalo pabaigos įtempimas ir deformacija.

Laipsnio rodiklio m_k reikšmė, kaip ir G_k atveju, apskaičiuojama:

$$m_k = \frac{\lg\left(\frac{2}{\bar{s}_{pr}} \bar{e}_0^m\right)}{\lg\left[\frac{A}{\bar{s}_{pr}} \left(\bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2}\right) k^\alpha + \frac{2}{\bar{s}_{pr}} \bar{e}_0^m\right]}. \quad (1.12)$$

Jei $\bar{s}_{pr} = 2$, arba yra artima jai, tai

$$m_k = \frac{\lg(\bar{e}_0^m)}{\lg\left[\frac{A}{2} (\bar{e}_0 - 1) k^\alpha + \bar{e}_0^m\right]}. \quad (1.13)$$

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

Cikliškai anizotropinėms medžiagoms, t. y. toms medžiagoms, kurios nevienodai priešinasi tempimo ir gniuždymo įtempimams, konstanta A išskaidoma į nelyginių ir lyginių pusciklių konstantas A_1 ir A_2 . Atsižvelgus į tai, (1.9), nelyginiams ir lyginiams puscikliams gaunami du skirtingi sustiprėjimo moduliai $G_{k(1)}$ ir $G_{k(2)}$ ir dvi skirtingos laipsnio rodiklio reikšmės $m_{1(k)}$ ir $m_{2(k)}$. (1.6)-(1.10) lygybių išvedimai pateikti darbe [12].

1.3 Aliuminio lydinio D16T1 statinio ir ciklinio deformavimo charakteristikų nustatymas

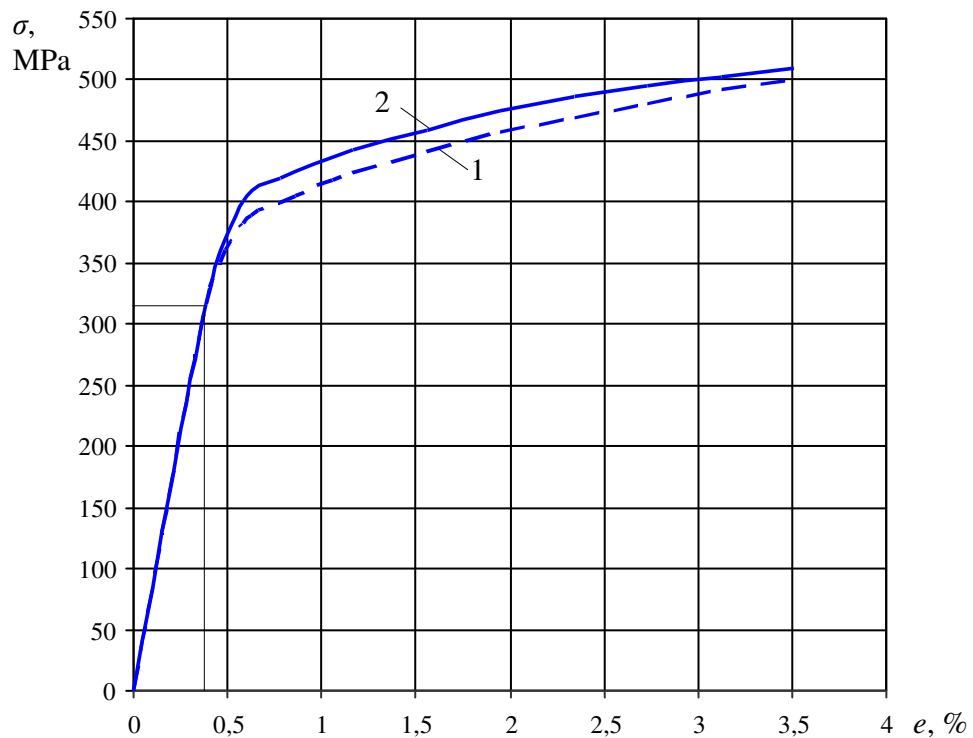
Statinio deformavimo charakteristikos.

Aliuminio lydinio D16T1 statinio deformavimo diagramos (žr. 1.5 pav.) aprašytos darbe [3, 8, 13].

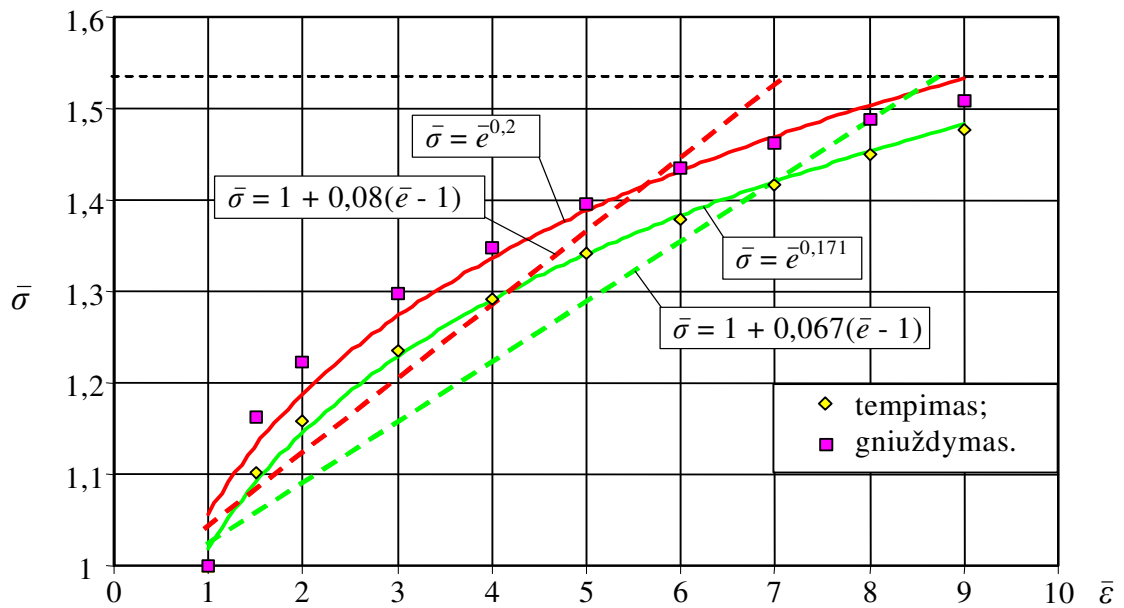
Šios diagramos buvo gautos atliekant statinio tempimo ir gniuždymo eksperimentinius tyrimus, kiekvienu atveju bandant keturis bandinius. Tiek tempimui, tiek gniuždymui buvo nustatyta vienoda

proporcingumo riba ($\sigma_{pr} = 317$ MPa; $e_{pr} = 0,39$ %), o už proporcingumo ribų, kaip matome, medžiaga nevienodai priešinasi plastinėms deformacijoms – kreivės išsiskiria.

Lydinio D16T1 statinio deformavimo diagramos plastinės dedamosios aproksimavimo tiesė ir laipsnine funkcija grafikas pateiktas 1.6 pav. Gauti aproksimavimo parametrai pateikti 1.1 lentelėje. Šioje lentelėje taip pat pateiktos ir vidutinės parametrų reikšmės. Vidutinės sustiprėjimo modulio ir laipsnio rodiklio reikšmės taip pat gali būti naudojamos konstrukcijų elementų deformavimo už proporcingumo ribų analitiniuose tyrimuose. Jų naudojimas supaprastina integralinių reiškinių analitines išraiškas, o gaunami rezultatai yra pakankamai tikslūs.



1.5 pav. Aliuminio D16T1 statinio tempimo (1) ir gniuždymo (2) diagrama



1.6 pav. Aliuminio lydinio D16T1 tempimo ir gniuždymo diagramos ir jų aproksimavimas tiese bei laipsnine funkcija

1.1 lentelė

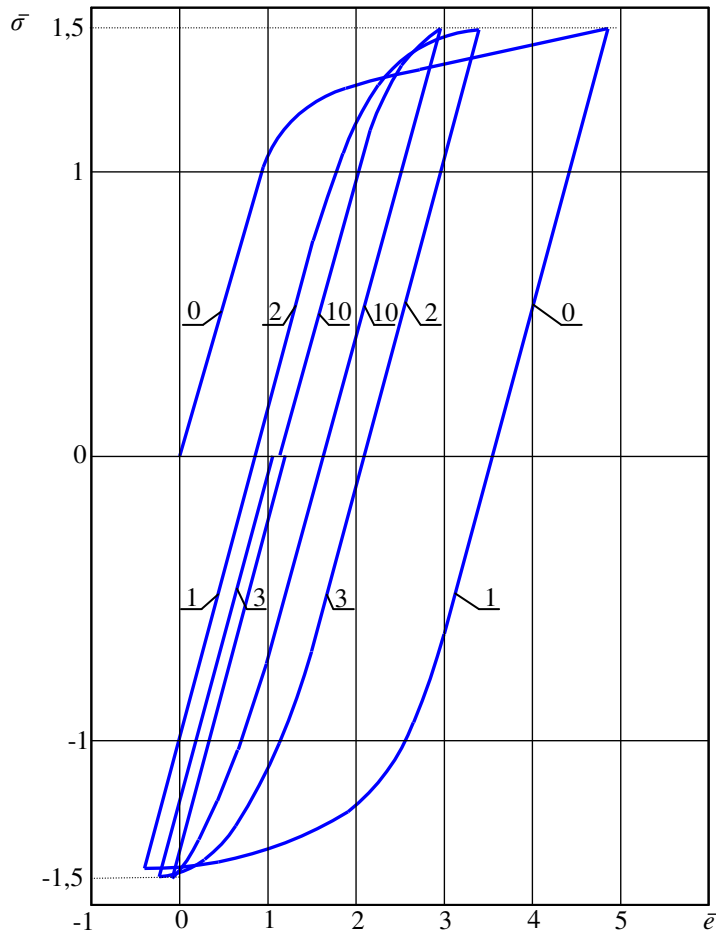
Aliuminio lydinio D16T1 aproksimavimo parametrų reikšmės

Tempimas		Gniuždymas		Vidutinė reikšmė	
G_T	m	G_T	m	G_T	m
0,067	0,171	0,08	0,2	0,0735	0,185

Ciklinio deformavimo charakteristikos.

Aliuminio lydinio D16T1 ciklinio tampriai plastinio deformavimo eksperimentinių tyrimų rezultatai pateikti darbe [13]. Jame aprašomas apkrovimas ir tempimu-gniuždymu, ir gniuždymu-tempimu. Toliau bus nagrinėjamas tik tempimo-gniuždymo atvejas, t. y., bus naudojamos medžiagos ciklinės charakteristikos, nustatytos bandymais, kuriuose pradiniu (nuliniu) puscikliu pasirinktas tempimas. Tokio deformavimo diagrama ($\bar{\sigma}_0 = 1,5$; $\bar{\epsilon}_0 = 4,52$) pateikta 1.6 pav. Joje pavaizduotos nulinio, 1, 2, 3 ir 10 pusciklio kreivės. Kitų bandymų duomenys pateikti 1 priede.

Iš diagramos matyti, kad aliuminio lydinys D16T1 yra cikliškai stiprėjanti medžiaga (kas beje būdinga aliuminiui ir jo lydiniams).



1.7 pav. Aliuminio lydinio D16T1 ciklinio deformavimo diagrama

Proporcingumo riba.

Nustatyta aliuminio lydinio D16T1 ciklinė proporcingumo riba $\bar{s}_{pr} = 1,92$. Skirtinguose puscikliuose jos kitimas buvo nežymus ($\pm 1,4\%$). Skaičiavimuose, visiems puscikliams ji naudojama vienoda.

Kilpos plotis.

Kilpos plotį $\bar{\delta}_k$ apibudina parametrai A_1 ir A_2 , bei α .

Darbe [12] nurodoma, kad gaunamos tokios lydinio D16T1 charakteristikos: $A_1 = 0,66$, $\alpha = -0,46$. Ši medžiaga yra cikliškai anizotropiška, todėl parametras $A_2 = A_1$.

Taigi taikant (1.8) lygybę galima užrašyti tokią lydinio D16T1 kilpos pločio kitimo priklausomybę nuo pradinės deformacijos ir pusciklių skaičiaus:

$$\bar{\delta}_k = 0,66 \left(\bar{\epsilon}_0 - \frac{1,92}{2} \right) k^{-0,46}. \quad (1.14)$$

Sustiprėjimo modulis G_k .

Aluminio lydinio D16T1 proporcingumo riba $\bar{s}_{pr} = 1,92$. Ši reikšmė yra artima 2, todėl nustatant G_k , galima taikyti (1.10) lygybę, tik vietoj A reikia įrašyti A_1 :

$$G_k = \frac{1}{\frac{A_1 k^\alpha}{2G_T} + 1}. \quad (1.15)$$

Laipsnio rodiklis m_k .

Kaip ir skaičiuojant G_k , įvertinama tai, kad \bar{s}_{pr} yra artima 2. Taikant (1.13), galima užrašyti

$$m_k = \frac{\lg(\bar{e}_0^m)}{\lg\left[\frac{A_1}{2}(\bar{e}_0 - 1)k^\alpha + \bar{e}_0^m\right]}. \quad (1.16)$$

Pagal (1.15) ir (1.16) lygybes apskaičiuotų parametų G_k ir m_k reikšmės, kai $k = 1, 2$, pateiktos 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė

Aluminio lydinio D16T1 G_k ir m_k reikšmės

Pusciklis k	1	2	3	4	5	10	16	20
G_k	0,176	0,227	0,262	0,288	0,310	0,381	0,433	0,459
m_k	0,293	0,341	0,373	0,396	0,416	0,479	0,524	0,546

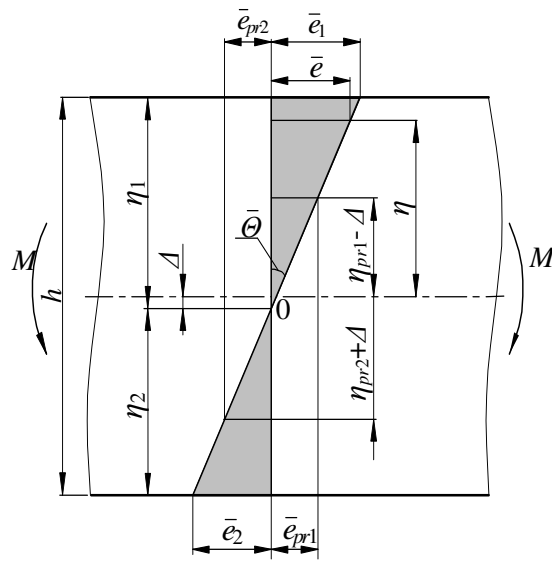
2. CIKLINIO TAMPRIAI PLASTINIO GRYNJOJO LENKIMO ANALITINIS TYRIMAS

Tiriant įvairių detalių tampriai plastinių įtempių-deformacijų būvį esant statinėms ir ciklinėms apkrovoms, seniau buvo rekomenduojama taikyti tiesinį arba poligonalinį deformavimo kreivės plastinės dedamosios aproksimavimą. Tai dažniausiai buvo siejama su tuo, kad už proporcingumo ribų, kai deformacijos siekia iki $10e_{pr}$, kreivės analitinė išraiška gali būti labai sudėtinga. Todėl buvo būtina pasirinkti tokį aproksimavimo būdą, kad sprendžiant plastiškumo uždavinius būtų gaunami nesudėtingai integruojami reiškiniai, o skaičiavimo tikslumas būtų pakankamai aukštas. Poligonalinis aproksimavimas (aproksimavimas laužtinėmis linijomis) yra detaliam aprašytas darbuose [13, 14]. Pagrindinis jo privalumas – galima gauti labai didelį aproksimavimo tikslumą. Pagrindinis jo trūkumas – deformavimo kreivę reikia skaidyti į keletą intervalų, kiekvieną tokį intervalą būtina įvertinti skirtingomis konstantomis (a_n ir b_n , čia n - intervalų skaičius). Akivaizdu, kad siekiant didesnio tikslumo, buvo būtina nustatyti labai daug šių medžiagos konstantų. Be to, gaunamos labai gremėzdiškos tampriai plastinio deformavimo integralinės išraiškos. Atskiras poligonalinio aproksimavimo atvejas – deformacijos kreivės plastinės dalies pakeitimas tiese. Jis yra paprastesnis, tačiau mažiau tikslus.

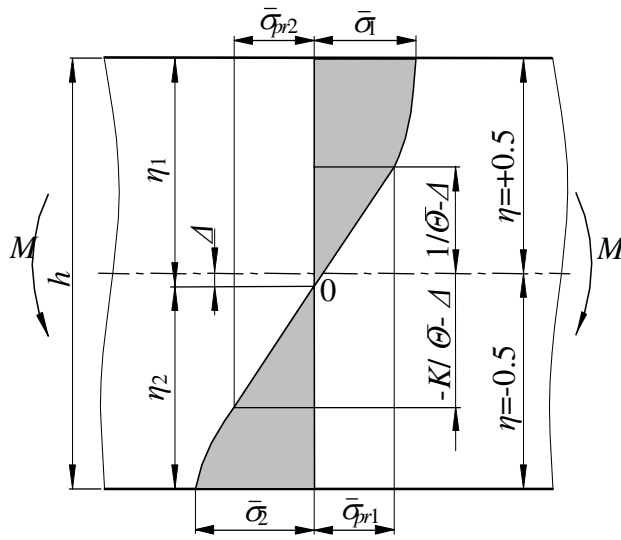
Aproksimavimas laipsnine funkcija yra patogus tuo, kad gaunama ne tiesė (ar aibė tiesių), o kreivė, kuri jau savo forma yra artimesnė įtempių-deformacijų diagramai ir kuri dažnai gali būti įvertinama vienu parametru – laipsnio rodikliu m [12]. Tampriai plastinio deformavimo integraliniai reiškiniai su laipsninėmis funkcijomis ne visada lengvai integruojami, tačiau pradėjus taikyti kompiuterines skaičiavimo programas, šios problemos nebeliko.

Stačiakampio skerspjuvio elemento statinio grynjojo lenkimo už proporcingumo ribų analitiniai tyrimai aprašyti darbuose [3, 8]. Šiuose darbuose autoriai skaičiavimuose naudojo tiek tiesinę, tiek ir laipsninę įtempių-deformacijų kreivės plastinės dedamosios aproksimaciją. Ciklinis tampriai plastinis grynasis lenkimas, naudojant tiesinę aproksimaciją, buvo tirtas darbuose [4-6]. Autoriai palygino analitinių ir eksperimentinių tyrimų duomenis ir gavo pakankamai gerą jų sutapimą.

Pasinaudokime grynjojo lenkimo tyrimo metodika, kuri pateikta darbe [8]. Šiame darbe buvo laikomasis nuostatos, kad plokščių pjūvių hipotezė galioja ir tada, kai deformacijos grynjoju lenkimu apkrautame strype žymiai viršija proporcingumo ribą. Deformacijų ir įtempių vaizdai strypo išilginiame skerspjuvyje pateikti 2.1 pav.



a)



b)

2.1 pav. Deformacijų (a) ir įtempių (b) pasiskirstymo lenkiamo strypo išilginiame pjūvyje schema

Kadangi realių statinio deformavimo tempimu ir gniuždymu kreivių parametrai dažnai būna nevienodi, skaičiavimai buvo atlikti įvertinant skirtingas tempimo ir gniuždymo proporcingumo ribas.

Be to, indeksu 1 buvo žymimos apkrovimo tipo charakteristikos kurios proporcingumo riba yra mažesnė:

$$e_{pr2} > e_{pr1} \text{ ir } \sigma_{pr2} > \sigma_{pr1}.$$

Tokiu būdu, buvo naudojama papildoma medžiagos charakteristika – nevienodo priešinimosi tampriai deformacijai koeficientas, kurio išraiška tokia:

$$K = \frac{e_{pr2}}{e_{pr1}}.$$

Kitos skaičiavime naudojamos charakteristikos ir parametrai:

- E – tamprumo modulis (tiek tempimo, tiek ir gniuždymo atvejais E reikšmė vienoda);
- m_1 ir m_2 – statinio deformavimo kreivių plastinės dedamosios sustiprėjimą įvertinantys laipsnio rodikliai;
- Θ – santykinis strypo skerspjuvių pokrypių kampas,
- η – santykinis bet kurio strypo sluoksnio atstumas nuo skerspjuvio simetrijos ašies ($\eta = +0,5 \dots -0,5$);

Nagrinėjant stačiakampio skerspjuvio strypo grynąjį lenkimą, galima užrašyti tokią momento išraišką:

$$\bar{M} = 6 \int_{-0,5}^{0,5} \bar{\sigma} \eta d\eta, \quad (2.1)$$

čia: \bar{M} – santykinis lenkimo momentas ($\bar{M} = \frac{M}{\sigma_{pr} W}$).

Bendru atveju, vietoj $\bar{\sigma}$ įrašius jos reikšmes, (2.1) integralas [8]:

$$\bar{M} = 6 \left\{ \int_{\frac{1}{\Theta}-\Delta}^{0,5} (\Theta(\eta + \Delta))^{m_1} \eta d\eta + \int_{-\frac{K}{\Theta}-\Delta}^{\frac{1}{\Theta}-\Delta} \Theta(\eta + \Delta) \eta d\eta + \int_{\frac{K}{\Theta}+\Delta}^{0,5} K \left(\frac{\Theta}{K} (\eta - \Delta) \right)^{m_2} \eta d\eta \right\}. \quad (2.2)$$

čia: Δ – santykinis įtempimų neutraliojo sluoksnio padėties poslinkis strypo skerspjuvio simetrijos ašies atžvilgiu ($\Delta \neq 0$, kai $K \neq 1$ ir (arba) $m_1 \neq m_2$).

Gautas integralas leidžia apskaičiuoti grynuoju lenkimu veikiamo stačiakampio skerspjuvio strypo santykinio momento reikšmę, pagal kampą Θ , arba jį atitinkančią didžiausią deformaciją \bar{e} . Iš 2.1 pav. a) schemos matome, kad kampą Θ , atstumą η ir deformaciją \bar{e} sieja priklausomybė:

$$\Theta = \frac{\bar{\epsilon}}{\eta}. \quad (2.3)$$

Prieš apskaičiuojant \bar{M} , būtina dar įvertinti ir tą patį kampą Θ atitinkantį įtempių neutraliojo sluoksnio poslinkį Δ , kurio lygybė taip pat pateikta darbe [8].

Pačiu paprasčiausiu atveju, kai $K = 1$ ir $m_1 = m_2 = m$ (o tai reiškia, kad $\Delta = 0$), (2.2) integralą galima užrašyti trumpiau:

$$\bar{M} = 6 \left\{ 2 \int_{\frac{1}{\Theta}}^{0.5} (\Theta \eta)^m \eta d\eta + \int_{\frac{1}{\Theta}}^{\frac{1}{\Theta}} \Theta \eta^2 d\eta \right\}. \quad (2.4)$$

Pateikti integralai gali būti pritaikyti ir ciklinio tampriai plastinio grynojo lenkimo tyrimui. Šiuo atveju, deformacijos $\bar{\epsilon}$ ir įtempimai $\bar{\sigma}$ turi būti pakeisti santykinėmis ciklinėmis deformacijomis $\bar{\epsilon}$

įtempimais \bar{S} ($\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon}{\epsilon_{pr}}$, $\bar{S} = \frac{S}{S_{pr}}$). Taigi, (2.1) užrašome taip:

$$\bar{M} = 6 \int_{-0.5}^{0.5} \bar{S} \eta d\eta. \quad (2.5)$$

Akivaizdu, kad (2.5) integrale įrašydami \bar{S} išraiškas, bendru atveju gausime (2.2) integralą, kuriame laipsnio rodikliai m_1 , m_2 pakeisti atitinkamais ciklinio deformavimo pusciklyje k charakteristikomis $m_{1(k)}$, $m_{2(k)}$. 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 $\bar{\epsilon}_0$, nei nuo pusciklio skaičiaus ir visiems puscikliams laikoma vienoda $\bar{S}_{pr} = \bar{S}_{prk} = \text{const}$ [15]. Taigi, gauname $K = 1$, todėl santykinis lenkimo momentas, esant cikliniam deformavimui, bendru atveju užrašomas taip:

$$\bar{M}_k = 6 \left\{ \int_{\frac{1}{\Theta}}^{0.5} (\Theta \eta)^{m_{1(k)}} \eta d\eta + \int_{\frac{1}{\Theta}}^{\frac{1}{\Theta}} \Theta \eta^2 d\eta + \int_{\frac{1}{\Theta}}^{0.5} (\Theta \eta)^{m_{2(k)}} \eta d\eta \right\}, \quad (2.6)$$

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

$$\bar{M}_k = 6 \left\{ 2 \int_{\frac{1}{\theta}}^{0.5} (\Theta \eta)^{m_k} \eta d\eta + \int_{\frac{1}{\theta}}^{\frac{1}{\theta}} \Theta \eta^2 d\eta \right\}. \quad (2.7)$$

Be to, cikliniam deformavimui šiek tiek pasikeis ir (2.3) lygybė:

$$\Theta = \frac{\bar{\varepsilon}_k}{\eta}. \quad (2.8)$$

Reikia pažymėti ir tai, kad santykinė ciklinei deformacijai apskaičiuoti buvo taikoma tokia lygybė

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{\varepsilon_k}{e_{pr}}, \quad (2.9)$$

tačiau, statinio grynojo lenkimo skaičiavimo metodiką pritaikant ciklinio apkrovimo atvejui, santykinė $\bar{\varepsilon}_k$ turi būti siejama su cikline proporcingumo riba:

$$\bar{\varepsilon}_k = \frac{\varepsilon_k}{\varepsilon_{pr}}. \quad (2.10)$$

Tiriant statinį grynąjį lenkimą, darbe [8] buvo išnagrinėta ir situacija, kai vienoje pusėje strypo pusėje deformacijos viršija proporcingumo ribą, o kita vis dar deformuojama tampriai. Tai galiojo iki $\bar{e}_2 < K$. Kaip jau minėjome, ciklinio deformavimo metu $K = 1$. Tai reiškia, kad plastinės deformacijos pakartotinai apkraunant strypą grynuoju lenkimu tiek tempiamoje, tiek ir gniuždomoje dalyje prasideda vienu metu.

Taigi, taikant (2.6) arba (2.7) integralus, galima nustatyti priklausomybę tarp strypą veikiančio lenkimo momento \bar{M}_k ir jame atsirandančių didžiausių ciklinių deformacijų $\bar{\varepsilon}_k$.

Kaip buvo minėta, cikliškai anizotropinėms medžiagoms gaunami du skirtingi laipsnio rodikliai $m_{1(k)}$ ir $m_{2(k)}$. Tačiau, būtina įvertinti tai, kad toks m_k išskaidymas į nelyginių ir lyginių puselių $m_{1;2(k)}$ tinka tik cikliniam tempimui-gniuždymui (arba gniuždymui-tempimui). Lenkimo atveju, kai vienu metu strypte atsiranda ir tempimo, ir gniuždymo deformacijos, parametrų $m_{1(k)}$ ir $m_{2(k)}$ prasmė šiek tiek kitokia. Šiuo atveju, jie tiesiog priskiriami skirtingoms strypo plastinių deformacijų sritims. Todėl, kaip matyti iš (2.6) integralo, kiekvienas deformavimo grynuoju lenkimu puskelis įvertinamas abiem šiais parametrais.

3. ANALITINIŲ IR EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ DUOMENŲ PALYGINIMAS

Stačiakampio skerspjūvio bandinių tampriai plastinio grynojo lenkimo eksperimentiniai tyrimai aprašyti darbe [3]. Eksperimentams buvo pasirinktos kelios medžiagos, tarp jų ir aliuminio lydinys D16T1. Buvo naudojamas simetrinis minkštas apkrovimas. Pradinės deformacijos kito tokiose ribose $3,4 < \bar{\varepsilon}_0 < 6,6$. Pusciklių skaičius neviršijo 200. Bandinių skaičius – 5.

Eksperimentai atlikti tempimo gniuždymo bandymų mašina, jos griebtuvuose sumontavus specialų įrenginį [3]. Šiuo įrenginių bandinio vidurinė (darbinė) dalis, kurios ilgis 25 mm, buvo veikiami vienodu lenkimo momentu. Ciklinio lenkimo diagrama buvo užrašoma savirašiu-valdikliu.

Eksperimentų duomenys yra pateikti 2 priede.

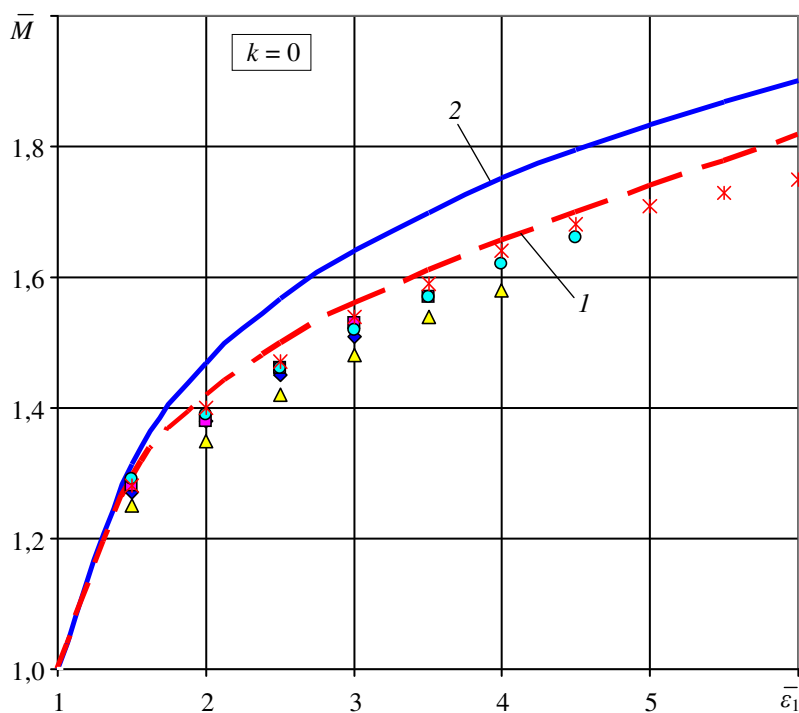
Kaip buvo minėta, eksperimentinių ir analitinių tyrimų rezultatų palyginimas buvo atliktas M. Daunio darbe [3]. Skaičiavimuose buvo taikytas deformavimo diagramos plastinės dedamosios aproksimavimas tiese. Buvo gautas pakankamai geras rezultatų sutapimas. 3 priedas.

Aproksimavimas laipsnine funkcija yra tikslesnis ir labiau atitinkantis realią kreivės formą. Buvo laikomasi nuostatos, kad kiekvieno pusciklio laipsnio rodiklio m_k reikšmės yra vienodos tiek tempimui, tiek ir gniuždymui. Jis apskaičiuojamas (1.16) lygybe arba parenkamas iš 1.2 lentelės. Analitiniai lenkimo tyrimams buvo atliekami, naudojant (2.7) integralą. Santykinis skerspjūvių pokrypių kampas Θ buvo apskaičiuojamas (2.8) lygybe, įvertinus (2.10) lygybę.

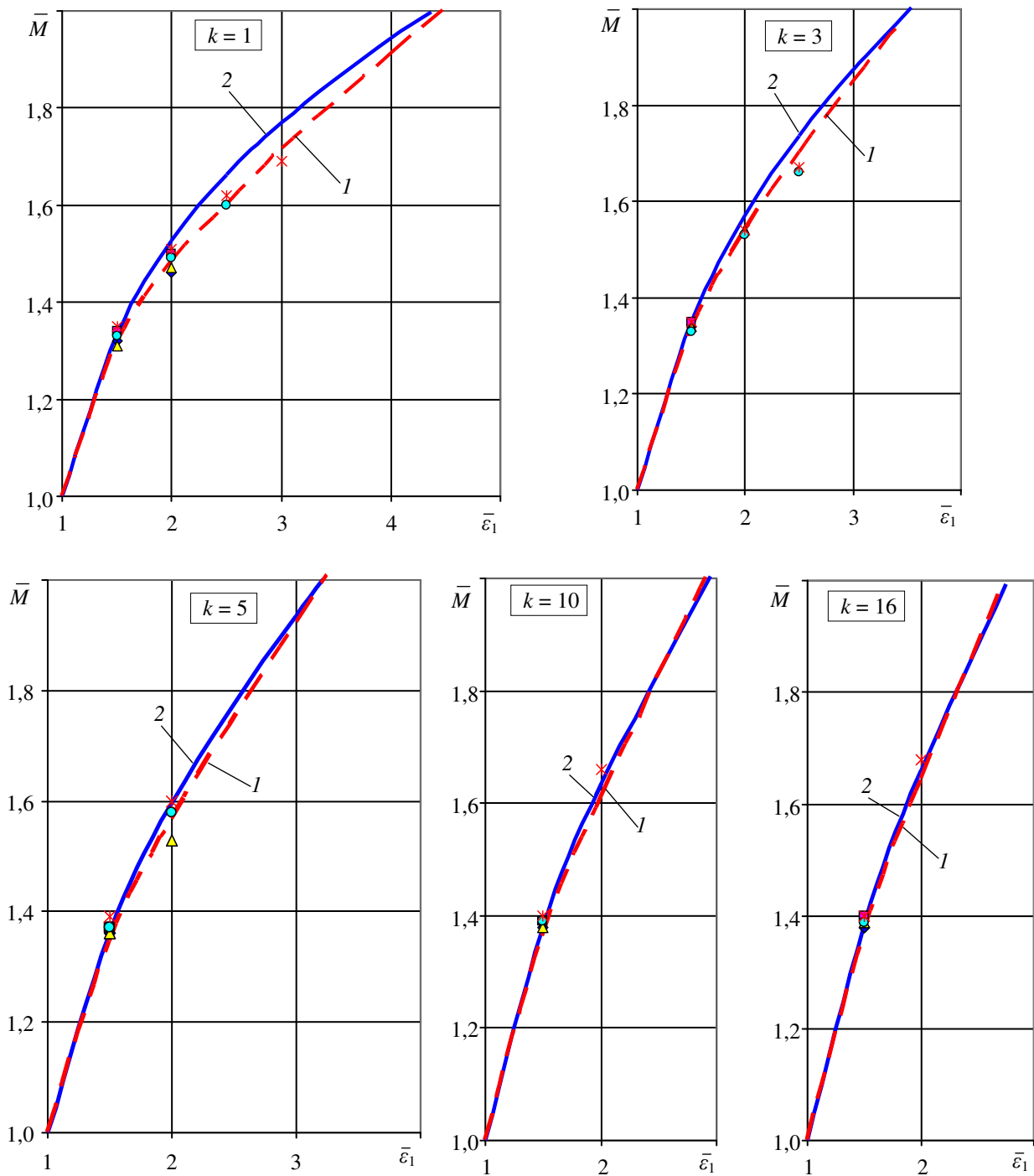
Gautos analitinės statinio ir ciklinio lenkimo santykinų momentų \bar{M} reikšmės deformacijų intervale $1,5 < \bar{\varepsilon}_k < 6$ yra pateiktos 3.1 lentelėje, o analitinės \bar{M} kreivės, apskaičiuotos taikant tiesinę ir laipsninę aproksimaciją, pateiktos 3.1 ir 3.2 pav. Šiose diagramose pažymėti ir eksperimentiniai taškai. Kaip matyti iš grafikų, taikant tiek tiesinį, tiek ir laipsninį aproksimavimą, ciklinio lenkimo kreivės sutapo su eksperimentinių tyrimų rezultatais. Tik nulinio pusciklio teorinės kreivės išsidėstė šiek tiek aukščiau eksperimentinių taškų. Taigi nagrinėjamame deformacijų intervale gali būti sėkmingai taikomi abu aproksimavimo atvejai (žr. 3.1 lent).

Statinio ir ciklinio deformavimo grynuoju lenkimu momentų \bar{M} reikšmės, apskaičiuotos naudojant laipsninę deformavimo diagramos plastinės dalies aproksimaciją

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



3.1 pav. Aliuminio lydinio D16T1 stačiakampio skerspjūvio strypo statinio lenkimo analitinės kreivės (1 – tiesinė aproksimacija; 2 – laipsninė aproksimacija) ir eksperimentiniai taškai



3.2 pav. Aliuminio lydinio D16T1 stačiakampio skerspjūvio strypo ciklinio lenkimo analitinės kreivės (1 – tiesinė aproksimacija; 2 – laipsninė aproksimacija) ir eksperimentiniai taškai

IŠVADOS

Darbe pateikta analitinių tyrimų metodika, leidžianti modeliuoti ciklinį tampriai plastinį stačiakampio skerspjūvio strypų grynąjį lenkimą, taikant laipsninį deformavimo kreivės plastinės dedamosios aproksimavimą.

Taikant analitinių tyrimų metodiką, apskaičiuotos aliuminio lydinio D16T1 strypo statinio ir ciklinio defromavimo grynuoju lenkimu momentų kreivės.

Analitinės lenkimo momentų kreivės palygintos su eksperimentiniais duomenimis; gautas geras eksperimentinių ir analitinių duomenų sutapimas (statinio lenkimo atveju paklaida neviršija 8 %; ciklinio lenkimo atveju visuose puscikliuose maksimali paklaida 4 %).

Pasirinktame deformacijų intervale, analitinės stačiakampio skerspjūvio strypo ciklinio tampriai plastinio grynojo lenkimo momentų kreivės ir kiti ciklinio deformavimo parametrai gali būti pakankamai tiksliai nustatomi taikant tiek tiesinį, tiek ir laipsninį deformavimo diagramos plastinės dedamosios aproksimavimą.

LITERATŪRA

1. Daunys M.(2005). Ciklinis konstrukcinis stiprumas ir ilgaamžiškumas. Technologija. Kaunas, 2005, p. 286 .
2. Schutz W. (1996). A history of fatigue. Engineering fracture mechanics. Vol 54, p. 263-300.
3. Daunys M. (1964). Stačiakampių strypų skaičiavimas lenkimui už proporcingumo ribų. Lietuvos TSR aukštųjų mokyklų mokslo darbai. Elektrotechnika ir mechanika. T. III.p. 61-69.
4. Daunys M., Rimovskis S. (2002). Analysis of circular cross-section bar, loaded by static and cyclic elasto-plastic pure bending. Mechanika - 2002. Kaunas, Nr. 1 (33), p. 5-10, ISSN 1392-1207.
5. Daunys M., Rimovskis S. (2002). Analysis of low-cycle loading characteristics at pure bending. Mechanika - 2002. Kaunas, Nr. 5 (37), p. 5-9, ISSN 1392-1207.
6. Daunys. M., Rimovskis S. (2003). Analysis of Low-cycle Strength and Durability of steel 45 at Pure Bending. Mechanika - 2003. Kaunas, Nr.1 (39), 5-10p. ISSN 1392 – 1207.
7. Rimovskis S. (2003). Reseach of low cycles strength and durability under pure bending. Summary of doctoral dissertation. Kaunas, p. 26.
8. Uzėla S., Rimovskis S. (2005). Theoretical Analysis of Rectangular Cross-Section Power-Hardening Element under Pure Bending. Journal of Young Scientists. Siauliai, 2(6), p. 119-123.
9. Paulauskas, A., Rimovskis, S., Sabaliauskas S. (2008). Analysis of circular cross section power hardening element under pure bending. Mechanika 2008. Kaunas, p. 398-402.
10. Paulauskas, A., Rimovskis, S., Sabaliauskas S. (2008). Skritulinio skerspjuvio strypo tampriai plastinio grynojo lenkimo tyrimas. Jaunųjų mokslininkų darbai. Šiauliai, 5 (21), p. 27-32 .
11. Uzėla, S. (2005). Stačiakampio skerspjuvio elementų tampriai plastinio grynojo lenkimo tyrimas. Magistro darbas. Šiauliai, p. 46.
12. Šimulis, M., Rimovskis S. (2006). Ciklinio tampriai plastinio deformavimo kreivių aproksimavimo tyrimas. Jaunųjų mokslininkų darbai. Šiauliai, 3(10), p. 80-85.
13. С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность. Руководство и справочное пособие. М.: «Машиностроение», 1975, 488 с.
14. М. Шнейдерович. Прочность при статическом и повторно-статическом нагружениях. М.: «Машиностроение», 1968, 343 с.
15. М. Даунис. Исследование диаграмм циклического деформирования при растяжении-сжатии и сдвиге. Автореферат. Каунас. 1964. 18с.

PRIEDAI

1 priedas

Aluminio lydinio D16T1 kilpos pločio $\bar{\delta}_k$ priklausomybė nuo pusciklių skaičiaus k , esant tempimui-gniuždymui

Bnadinio Nr	1	2	3	4	5	6	7
Deformacija							
Kilpos plotis $\bar{\delta}_k$	1,5	1,98	2,84	2,96	3,64	4,25	4,82
$\bar{\delta}_1$	0,34	0,7	1,13	1,39	1,89	2,53	2,72
$\bar{\delta}_2$	0,27	0,56	0,74	0,95	1,12	1,53	1,36
$\bar{\delta}_3$	0,22	0,49	0,65	0,8	0,98	1,14	1,23
$\bar{\delta}_4$	0,22	0,44	0,56	0,67	0,79	0,94	0,92
$\bar{\delta}_5$	0,2	0,43	0,54	0,61	0,71	0,88	0,89
$\bar{\delta}_6$	0,2	0,38	0,47	0,55	0,65	0,8	0,77
$\bar{\delta}_7$	0,19	0,36	0,45	0,52	0,59	0,73	0,77
$\bar{\delta}_8$	0,19	0,34	0,41	0,47	0,56	0,69	0,68
$\bar{\delta}_9$	0,17	0,32	0,4	0,47	0,51	0,66	0,67
$\bar{\delta}_{10}$	0,17	0,30	0,39	0,42	0,48	0,61	0,63
$\bar{\delta}_{20}$	0,13	0,23	0,25	0,27	0,34	0,45	0,48
$\bar{\delta}_{40}$	0,11	0,15	0,16	0,20	0,24	0,33	0,36
$\bar{\delta}_{70}$	0,07	0,11	0,13	0,14	0,18	0,24	0,31
$\bar{\delta}_{100}$	0,06	0,09	0,09	0,10	0,17	0,19	0,25
$\bar{\delta}_{150}$	0,09	0,09	0,07	0,09	0,13	0,16	0,20

Aluminio lydinio D16T1 statinio ir ciklinio grynojo lenkimo momento \bar{M} eksperimentinės reikšmės

k	$\bar{e}; \bar{\varepsilon}$	Deformacijos \bar{e}_0				
		3,40	3,75	4,05	4,50	6,60
		Lenkimo momentas \bar{M}				
0	1,50	1,27	1,28	1,25	1,29	1,28
	2,00	1,38	1,38	1,35	1,39	1,40
	2,50	1,45	1,46	1,42	1,46	1,47
	3,00	1,51	1,53	1,48	1,52	1,54
	3,50		1,57	1,54	1,57	1,59
	4,00			1,58	1,62	1,64
	4,50				1,66	1,68
	5,00					1,71
	5,50					1,73
	6,00					1,75
1	1,50	1,32	1,34	1,31	1,33	1,35
	2,00	1,46	1,50	1,47	1,49	1,51
	2,50				1,60	1,62
	3,00					1,69
3	1,50	1,34	1,35	1,34	1,33	1,35
	2,00			1,54	1,53	1,54
	2,50				1,66	1,67
5	1,50	1,36	1,37	1,36	1,37	1,39
	2,00			1,53	1,58	1,60
10	1,50	1,38	1,39	1,38	1,39	1,40
	2,00					1,66
16	1,50	1,38	1,40	1,39	1,39	1,40
	2,00					1,68

Statinio ir ciklinio deformavimo grynuoju lenkimu momentų reikšmės, apskaičiuotos naudojant tiesinę deformavimo diagramos plastinės dalies aproksimaciją

Pusciklis k	Deformacija $\bar{\epsilon}$; $\bar{\epsilon}$					
	1,5	2	3	4	5	6
	Lenkimu momentas \bar{M}					
0	1,294	1,421	1,559	1,655	1,739	1,818
1	1,317	1,485	1,718	1,915	2,100	2,281
3	1,336	1,539	1,851	2,131	2,401	2,667
5	1,347	1,568	1,926	2,252	2,569	2,883
10	1,363	1,613	2,038	2,434	2,823	3,208
16	1,374	1,646	2,119	2,566	3,006	3,443