

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Mindaugas Šimulis

CIKLINIO TAMPRIAI PLASTINIO
DEFORMAVIMO CHARAKTERISTIKŲ
TYRIMAS

MAGISTRO DARBAS

Vadovas dr. S. Rimovskis

ŠIAULIAI, 2006

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas
Z. Ramonas

2006 06

CIKLINIO TAMPRIAI PLASTINIO
DEFORMAVIMO CHARAKTERISTIKŲ
TYRIMAS

MAGISTRO DARBAS

Atliko MM3 gr. stud.

2006 06 M. Šimulis

Vadovas dr. S. Rimovskis

2006 06

Recenzentas
ŠU Technologijos fakulteto
Mechanikos inžinerijos
katedros

2006 06 dr. R. V. Ulozas

ŠIAULIAI, 2006

Šimulis M. Research of cyclic elastic plastic deformation characteristics: Master thesis of mechanical research advisor dr. S. Rimovskis; Šiauliai University, Technological Faculty, Mechanical Engineering Department. – Šiauliai 2006. – 44p.

SUMMARY

In real conditions, a great majority of machine and structure elements and parts are subjected to cyclic deformation. There is no possibility to improve their quality, to increase their reliability and durability without good knowledge of working condition and materials feature.

During cyclic loading, stresses can overpass proportionality limits. It causes residual stresses which reduce durability of elements to limited number of loading cycles. Such a loading is called low cycle loading. Usually it happens in small volumes of material, concentration zones, welded joints, so on.

In this work, main cyclic elastic plastic characteristics of materials are presented and explained. It also contains experimental and analytical methods of estimation that characteristics and detail research of experimental cyclic stress strain curve approximation methods.

TURINYS

SUMMARY	3
TURINYS	4
LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	5
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	6
ĮVADAS.....	8
1. MAŽACIKLIS NUOVARGIS.....	10
2. PAGRINDINIAI CIKLINIO DEFORMAVIMO PARAMETRAI IR CHARAKTERISTIKOS, JŲ NUSTATYMO BŪDAI.....	14
2.1 Proporcingumo riba s_{pr}	14
2.2 Kilpos plotis $\bar{\delta}_k$	16
2.3 Sustiprėjimo modulis G_k	19
2.4 Laipsnio rodiklis m_k	25
2.5 Ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagramų platinės dalies aproksimavimas laužtine linija.....	31
2.5.1 Aproksimacija pagal statinio deformavimo kreivės parametrus	32
2.5.2 Aproksimacija pagal pirmojo pusciklio deformavimo kreivės parametrus	34
3. TEORIŠKAI APROKSIMUOTŲ KREIVIŲ PALYGINIMAS SU EKSPERIMENTINĖMIS.....	36
IŠVADOS.....	41
LITERATŪRA.....	42
PRIEDAI.....	43

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė. Vidutinės kai kurių medžiagų \bar{s}_{pr} reikšmės.....	15
2.2 lentelė. Laipsnio rodiklio $m_{k_{vid}}$ reikšmės.....	30
2.3 lentelė. Ciklinės deformavimo diagramos aproksimavimo parametrų reikšmių lentelė.....	35
3.1 lentelė. Plieno 45 ciklinio deformavimo charakteristikos.....	36

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Mažaciklio apkrovimo diagrama.....	10
1.2 pav. Minkšto mažaciklio apkrovimo schemas: a – cikliškai stabili medžiaga; b – cikliškai stiprėjanti medžiaga; c – cikliškai silpnėjanti medžiaga.....	12
1.3 pav. Standaus mažaciklio apkrovimo shemos: a – cikliškai stabili medžiaga; b – cikliškai stiprėjanti medžiaga; c – cikliškai silpnėjanti medžiaga.....	13
2.1 pav. Ciklinės proporcingumo ribos priklausomybės nuo pradinės deformacijos grafikas.....	15
2.2 pav. Pirmojo pusciklio kilpos pločio priklausomybė nuo pradinės deformacijos	17
2.3 pav. Lydinio D16T1 histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus ($\alpha = 0,46 \pm 8,58 \%$).....	17
2.4 pav. Lydinio B96T1 histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus ($\alpha = -0,27 \pm 2,28 \%$).....	18
2.5 pav. Plieno 40 histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus ($\alpha_1 = 0,39 \pm 18,7 \%$; $\alpha_4 = -0,05 \pm 10,0 \%$).....	18
2.6 pav. Tiesė aproksimuota statinio deformavimo $\sigma - e$ diagrama.....	19
2.7 pav. Pirmojo pusciklio tampriai plastinio deformavimo diagramos schema (minkštas apkrovimas).....	20
2.8 pav. Pirmojo pusciklio sustiprėjimo modulio G_k priklausomybės nuo pradinės deformacijos grafikas (punktyrinės tiesės – G_k reikšmės, apskaičiuotos (2.11) lygybe).....	24
2.9 pav. 10-ojo pusciklio sustiprėjimo modulio G_k priklausomybės nuo pradinės deformacijos grafikas (punktyrinės tiesės – G_k reikšmės, apskaičiuotos (2.11) lygybe).....	24
2.10 pav. 100-ojo pusciklio sustiprėjimo modulio G_k priklausomybės nuo pradinės deformacijos grafikas (punktyrinės tiesės – G_k reikšmės, apskaičiuotos (2.11) lygybe).....	25
2.11 pav. Laipsninė funkcija aproksimuota statinio deformavimo $\sigma - e$ diagrama	26
2.12 pav. 1-ojo pusciklio laipsnio rodiklio m_k priklausomybė nuo pradinės deformacijos ...	28
2.13 pav. 10-ojo pusciklio laipsnio rodiklio m_k priklausomybė nuo pradinės deformacijos	28

2.14 pav. 100-ojo pusciklio laipsnio rodiklio m_k priklausomybė nuo pradinės Deformacijos	29
2.15 pav. Laipsnio rodiklio m_k vidutinės reikšmės nustatymo schema	30
2.16 pav. Tiesėmis aproksimuota statinio deformavimo $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}$ diagrama	31
2.17 pav. Tiesėmis aproksimuota pirmojo pusciklio diagrama ($k = 1$).....	33
3.1 pav. Plieno 45 ciklinio deformavimo diagrama (parodyti puscikliai: $k = 2, 10, 20, 40, 60, 80, 100$); statinio deformavimo diagrama (tempimas) – $k = 0$ ($\bar{\sigma}_{max} = 1,8$; $\bar{\epsilon}_{max} = 4,05$).....	36
3.2 pav. Tiesinė ir laipsninė aproksimacija: a) – neporinių pusciklių; b) – porinių pusciklių	37
3.3 pav. Plieno 45 statinio deformavimo diagramos plastinės dalies aproksimavimas laužtinėmis linijomis	38
3.4 pav. Aproksimacija laužtine linija pagal statinio deformavimo kreivės taškus: a) – porinių pusciklių kreivės; b) – neporinių pusciklių kreivės	39
3.5 pav. Aproksimacija laužtine linija: a – gauta grafiškai aproksimavus 1-ojo pusciklio kreivę; b – gauta grafiškai aproksimavus 2-ojo pusciklio kreivę	40

IVADAS

Šiuolaikinės mašinos ir įrengimai dažniausiai dirba ciklinio apkrovimo sąlygomis. Pagerinti mašinų kokybės, padidinti jų patikimumo ir ilgaamžiškumo negalima detaliam neištyrus jų darbo sąlygų ir medžiagos savybių.

Ciklinio deformavimo metu įtempimai viršija proporcingumo ribą, atsiranda liekamosios plastinės deformacijos ir detalės ilgaamžiškumas sumažėja iki kelių arba keliasdešimt tūkstančių ciklų. Dažniausiai deformuojasi nedideli medžiagos tūriai įtempimų koncentracijos ir plyšių zonose, taip pat suvirintuosiuose sujungimuose. Dėl mažo ciklų skaičiaus iki suirimo toks deformavimas vadinamas mažacikliu.

Parentant medžiagą konstrukcijoms, dirbančioms mažaciklio apkrovimo sąlygomis, visų pirma būtina žinoti, kokiam tipui (stiprėjanti, silpnėjanti ar cikliškai stabili) ji priklauso, kadangi deformacijos ir įtempimai eksploatacijos metu kinta priklausomai nuo medžiagos tipo. Ir tik žinant medžiagos ciklines savybes, galima pasakyti apie jos pritaikymo galimybę duotomis eksploatacijos sąlygomis.

Šiame darbe nagrinėjamos pagrindinės medžiagų ciklinio tampriai plastinio deformavimo charakteristikos ir parametrai, aprašomas jų eksperimentiniai ir analitiniai nustatymo metodai, detaliam tiriama deformavimo kreivių aproksimavimas. Pasirinktas vienas ar kitas kreivių aproksimavimo būdas turi įtakos konstrukcijų ar atskirų jos elementų ciklinio stiprumo skaičiavimo tikslumui. Todėl labai svarbu įvertinti kreivių aproksimavimo parametrų taikymo ribas ir galimas paklaidas.

Tyrimo objektas. Ciklinio tampriai plastinio deformavimo kreivės, jų charakteristikos ir parametrai.

Tyrimo tikslas. Ištirti skirtingus ciklinio tampriai plastinio deformavimo kreivių aproksimavimo būdus, įvertinti jų tikslumą ir taikymo galimybes konstrukcijų ir elementų stiprumo ir ilgaamžiškumo skaičiavimuose.

Tyrimo uždaviniai:

- ciklinio deformavimo kreivės plastinės dalies aproksimavimo parametrų nustatymas, pagal statinio ir ciklinio deformavimo kreivių parametrus;
- palyginti teorinius skaičiavimo rezultatus su duomenimis, gautais eksperimentiniu būdu.

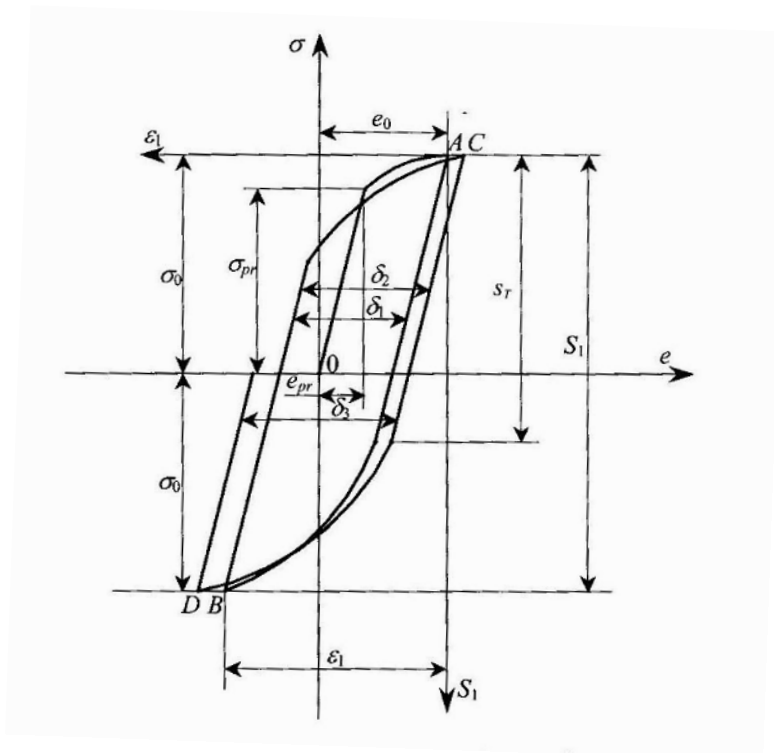
Teorinė darbo reikšmė. Darbe pateikta metodika leidžia nustatyti įvairių medžiagų ciklinio deformavimo charakteristikas. Šios charakteristikos gali būti naudojamos elementų ciklinio stiprumo ir ilgaamžiškumo analitiniuose skaičiavimuose bei skaičiavimuose taikant skaitinius metodus.

Praktinė darbo reikšmė. Atliktas įvairių medžiagų ciklinių charakteristikų bei parametrų nustatymas. Analitinių tyrimų duomenys palyginti su eksperimentų rezultatais.

Darbo struktūra. Magistro darbą sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, literatūros sąrašas, 5 priedai. Darbo apimtis: 44 puslapiai, 25 iliustracijos ir 4 lentelės.

1. MAŽACIKLIS NUOVARGIS

Kai cikliška kintantys įtempimai viršija medžiagos proporcingumo ribą, prasideda tampriai plastinis deformavimas. Tokį deformavimą charakterizuoja įtempimų-deformacijų diagramos histerezio kilpa, o svarbiausias jo parametras – tos kilpos plotis (žr. 1.1 pav.). Pagal jį galima spręsti apie medžiagoje atsirandančias liekamašias (plastines) deformacijas, kurių dydis, atitinkamame apkrovimo lygyje, ir parodo medžiagos pažeidžiamumo laipsnį. Esant tokioms deformacijoms, konstrukcijos eksploatavimo laikas (o tiksliau – apkrovimo ciklų skaičius) turi būti ribojamas, priešingu atveju jis gali pasibaigti avarija. Mažaciklio nuovargio klausimai yra plačiai išnagrinėti daugelio autorių darbuose [1, 2].



1.1 pav. Mažaciklio apkrovimo diagrama

1.1 pav. parodyti keturi mažaciklio simetrinio apkrovimo puscikliai, esant apribotiems įtempimams. Pradinio (nulinio) pusciklio diagrama pavaizduota $\sigma - e$ koordinatėse (kreivė OA), kadangi ši kreivė atitinka statinio apkrovimo diagramos dalį. O pirmojo ir visų likusių pusciklių diagramos pavaizduotos koordinatėse $S - \varepsilon$, kurių pradžia yra kiekvieno pusciklio tampriosios dalies (nukrovimo) pradžioje. Esant simetriniam ciklui, koordinatėse $S - \varepsilon$ mastelis yra dvigubai didesnis už $\sigma - e$.

Nulinį pusciklį charakterizuoja pradinis įtempimas σ_0 ir jį atitinkanti pradinė deformacija e_0 , medžiagos proporcingumo ribos įtempimas σ_{pr} bei deformacija e_{pr} . Kiekvieno tolimesnio pusciklio diagramą charakterizuoja įtempimas S , jį atitinkanti deformacija ε_k , ciklinė proporcingumo riba s_{pr} bei pusciklio histerezio kilpos plotis δ_k . Indeksas k nurodo pusciklio numerį (skaičių).

Analitinių tyrimų palengvinimui, tiek statinio, tiek ciklinio deformavimo diagramos parametrai dažnai nurodomi santykiniais vienetais, t.y. išreiškiami proporcingumo ribų atžvilgiu. Tokiu atveju, virš simbolių rašomas brūkšnelis, o parametrų reikšmės apskaičiuojami tokiomis lygybėmis:

$$\bar{e}_0 = \frac{e_0}{e_{pr}}; \bar{\sigma}_0 = \frac{\sigma_0}{\sigma_{pr}}; \bar{\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{e_{pr}}; \bar{s}_{pr} = \frac{s_{pr}}{\sigma_{pr}}; \bar{S}_k = \frac{S_k}{\sigma_{pr}}; \bar{\delta} = \frac{\delta}{e_{pr}} \text{ ir kt.}$$

Ciklinės tampriai plastinės deformavimo diagramos, esant įvairiems apkrovimo tipams

Deformavimo diagramų nustatymui dažniausiai atliekami tempimo gniuždymo eksperimentiniai tyrimai, kadangi užduotos apkrovos ir poslinkiai lengviausiai perskaičiuojami į deformacijas ir įtempimus. Eksperimentinėms nuovargio kreivėms sudaryti gali būti naudojami ir kiti apkrovimo būdai: grynasis lenkimas, gmbinis lenkimas, sukimas ir kt. [3-5].

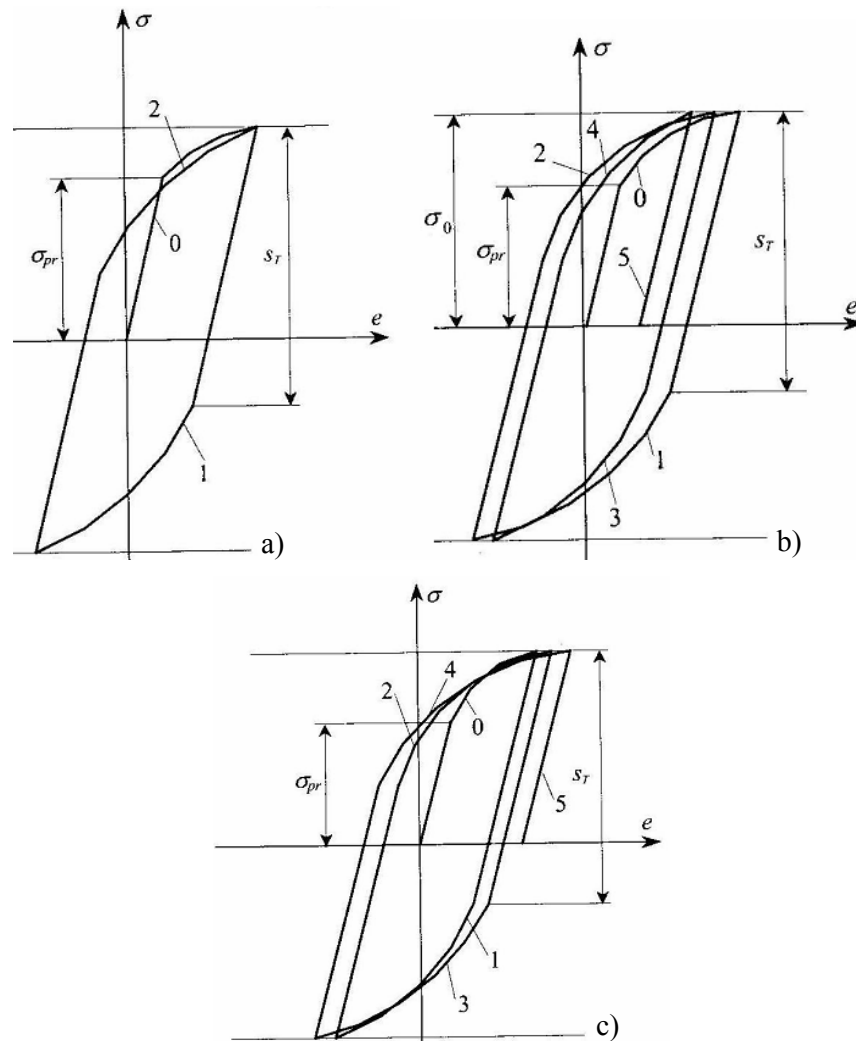
Medžiagos pasipriešinimas mažacikliam deformavimui priklauso nuo apkrovimo tipo, t.y. nuo to kas ribojama: įtempimai ar deformacijos. Ribojant įtempimus deformacijos vystosi nevaržomai ir toks deformavimas vadinamas minkštu, o ribojant deformacijas nevaržomai vystosi įtempimai – toks deformavimas vadinamas standžiu.

Priklausomai nuo cheminės sudėties ir struktūrinio mechaninio būvio, pagal pasipriešinimą tampriai plastiniam cikliniam deformavimui, konstrukcinės medžiagos skirstomos į cikliškai stiprėjančias, silpnėjančias ir stabilias (žr. 1.2 pav.). Nepriklausomai nuo apkrovimo tipo ar įtempimų lygio, cikliškai stabilioms medžiagoms įtempimų ir deformacijų kreivė, mažaciklio deformavimo metu, nekinta. Tokių medžiagų $\delta_k = const$, jų ciklinio deformavimo diagrama minkšto apkrovimo atveju pavaizduota (1.2 pav., a). Cikliškai stiprėjančioms medžiagoms, esant minkštam apkrovimui, kilpos plotis δ_k , didėjant apkrovimo pusciklių skaičiui k , mažėja (žr. 1.2 pav., b), o silpnėjančioms medžiagoms atvirkščiai δ_k didėjant pusciklių skaičiui k – didėja (žr. 1.2 pav., c).

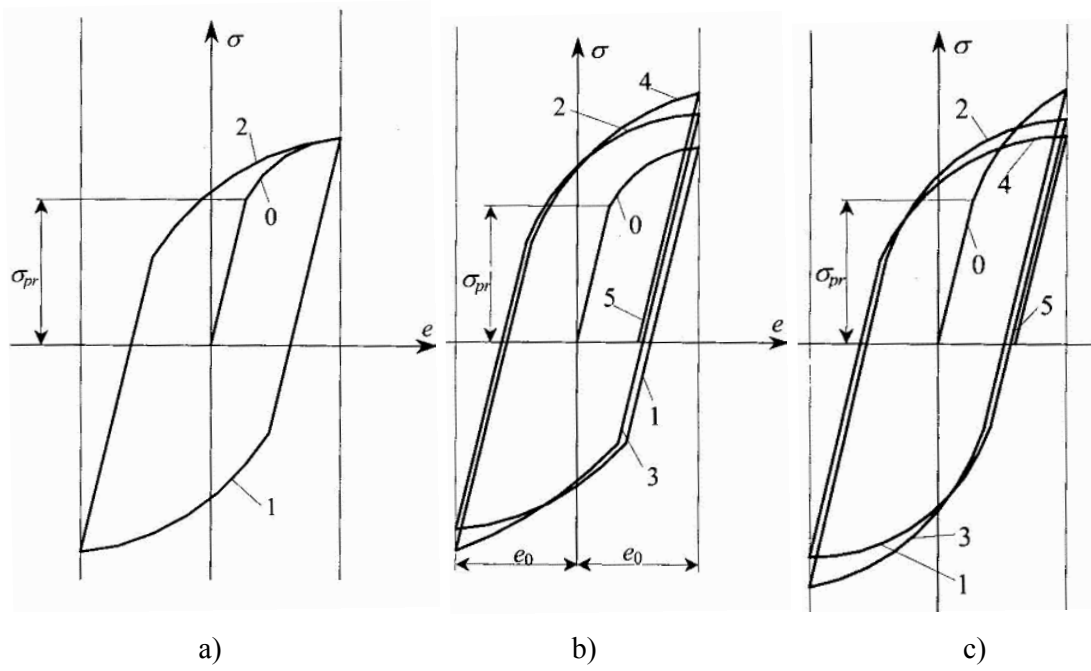
Standaus apkrovimo atveju, deformacijos yra suvaržytos, gali kisti tik įtempimai. Kaip ir esant minkštam apkrovimui, stabilų medžiagų deformavimo diagramos ir kilpos plotis išlieka pastovus visą deformavimo laikotarpį (žr. 1.3 pav., a). Stiprėjančioms medžiagoms didėjant pusciklių skaičiui k , cikliniai įtempimai S didėja (1.3 pav., b), silpnėjančioms medžiagoms – atvirkščiai S mažėja (1.3 pav., c).

Atliekant skaičiavimus, deformacijų ciklinis nestacionarumas gali būti neįvertinamas tik medžiagoms su nedideliu stiprėjimo ar silpnėjimo laipsniu. Visais kitais atvejais, į šias medžiagų charakteristikas būtina atsižvelgti.

Eksperimentiškai nustatyta, kad dažniausiai stiprėja aliuminio lydiniai, minkšti plienai. Vidutinio stiprumo atkaitinti arba normalizuoti plienai yra stabilūs arba stiprėja. Grūdinti plienai beveik visada silpnėja.



1.2 pav. Minkšto mažaciklio apkrovimo schemas: a – cikliškai stabili medžiaga; b – cikliškai stiprėjanti medžiaga; c – cikliškai silpnėjanti medžiaga



1.3 pav. Standaus mažaciklio apkrovimo shemos: a – cikliškai stabili medžiaga;
 b – cikliškai stiprėjanti medžiaga; c – cikliškai silpnėjanti medžiaga

2. PAGRINDINIAI CIKLINIO DEFORMAVIMO PARAMETRAI IR CHARAKTERISTIKOS, JŲ NUSTATYMO BŪDAI

Kaip jau buvo minėta 1 skyriuje, pagrindinės medžiagos ciklinio deformavimo charakteristikos nustatomos pagal mažaciklio minkšto simetrinio tempimo gniuždymo diagramas. Šios charakteristikos yra [6]:

- ciklinė proporcingumo riba \bar{s}_{pr} ;
- laipsnio rodiklis α ;
- konstantos A_1 ir A_2 .

Visos šios charakteristikos naudojamos apskaičiuojant k -tojo pusciklio įtempimų-deformacijos kreivės histerezės kilpos plotį $\bar{\delta}_k$. Esant tempimui gniuždymui, jų pakanka analitiniam sukauptos plastinės deformacijos, vienpusės plastinės deformacijos apskaičiavimui ir medžiagos pažeidimo laipsnio nustatymui.

Atliekant kitų apkrovimo tipų (pvz., lenkimo, sukimo) ciklinio tampriai plastinio deformavimo skaičiavimus, kaip ir statinio apkrovimo atveju, reikalingas analitinis ciklinio deformavimo diagramos aprašymas, t. y., jos plastinės dalies sustiprėjimą įvertinančių parametrų nustatymas. Šie parametrai gali būti:

- a) santykinis sustiprėjimo modulis \bar{G}_k , naudojamas, kai taikoma tiesinė deformavimo diagramos plastinės dalies aproksimacija;
- b) laipsnio rodiklis m_k , naudojamas, kai taikoma laipsninė deformavimo diagramos plastinės dalies aproksimacija.

2.1 Proporciumo riba s_{pr}

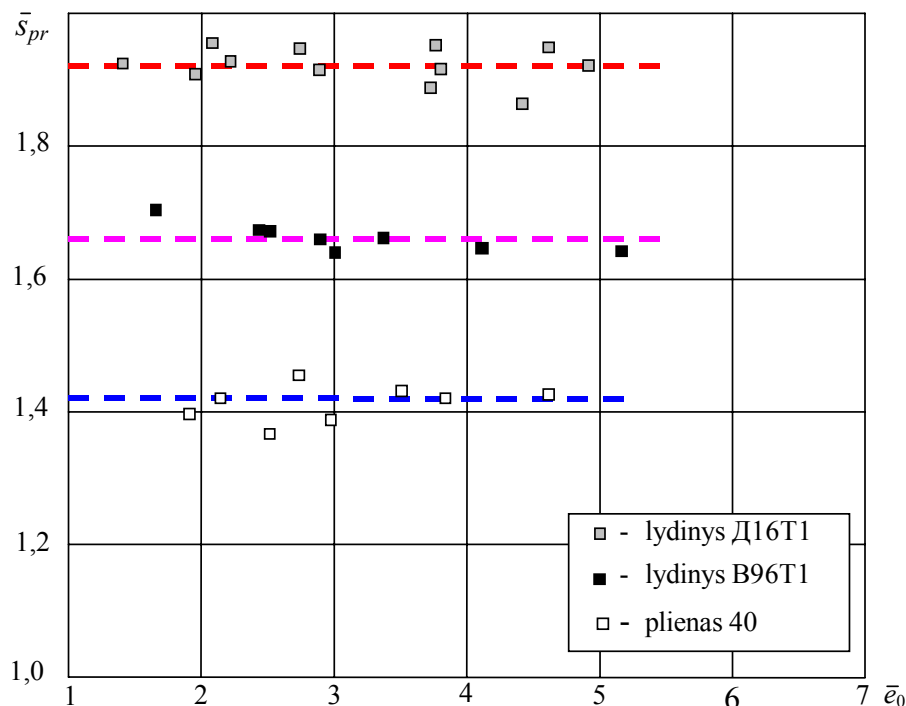
Įtempimai s_{pr} ir deformacijos ε_{pr} k -tajame pusciklyje nustatomi pagal ciklinio deformavimo diagramas. Skaičiavimuose dažniausiai naudojami dydžiai išreikšti santykinėse koordinatėse, todėl:

$$\bar{s}_{pr} = \frac{s_{pr}}{\sigma_{pr}}. \quad (2.1)$$

Daugelių eksperimentų duomenys rodo, kad cikliškai silpnėjančių, stabilių ir stiprėjančių medžiagų ciklinė proporcingumo riba \bar{s}_{pr} nepriklauso nuo pradinės deformacijos

$\bar{\epsilon}_0$ (žr. 2.1 pav. [6]). Jos kitimas mažaciklio deformavimo metu taip pat yra nežymus, t. y. neviršijantis eksperimento tikslumo ribų, todėl visiems puscikliams $\bar{s}_{pr} = \bar{s}_{prk} = const$.

Skaičiavimuos paprasčiausia taikyti ciklinę proporcingumo ribą prilyginant dvigubai proporcingumo ribai σ_{pr} , t. y., $\bar{s}_{pr} = \frac{2\sigma_{pr}}{\sigma_{pr}} = 2$. Tačiau, kaip rodo daugelis eksperimentai, \bar{s}_{pr} kinta gana plačiose ribose – nuo 1,32 iki 2,3 [1]. Kai kurių medžiagų \bar{s}_{pr} reikšmės yra pateiktos 2.1 lentelėje [6]. Taigi, bendru atveju $\bar{s}_{pr} \neq 2$.



2.1 pav. Ciklinės proporcingumo ribos priklausomybės nuo pradinės deformacijos grafikas

2.1 lentelė

Vidutinės kai kurių medžiagų \bar{s}_{pr} reikšmės

Medžiaga	Proporcingumo riba \bar{s}_{pr}
Aliuminio lydinys D16T1	$1,92 \pm 1,36 \%$
lydinys V96T1	$1,66 \pm 2,4 \%$
Plienas 40	$1,42 \pm 2,8 \%$

2.2 Kilpos plotis $\bar{\delta}_k$

Tampriai plastinio deformavimo histerezės kilpos plotį $\bar{\delta}_k$, pradinę deformaciją \bar{e}_0 ir pusciklių skaičių k sieja priklausomybė [6]

$$\bar{\delta}_k = A_{1;2} \left(\bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2} \right) k^\alpha, \quad (2.2)$$

čia: A_1 ir A_2 – ciklinį anizotropiškumą įvertinančios konstantos, priklausančios nuo nulinio pusciklio pradinės deformacijos \bar{e}_0 (neporinių pusciklių kilpos pločio skaičiavime naudojama A_1 , porinių - A_2);

$\alpha > 0$ – cikliškai silpnėjančioms medžiagoms;

$\alpha = 0$ – cikliškai stabilioms medžiagoms;

$\alpha < 0$ – cikliškai stiprėjančioms medžiagoms.

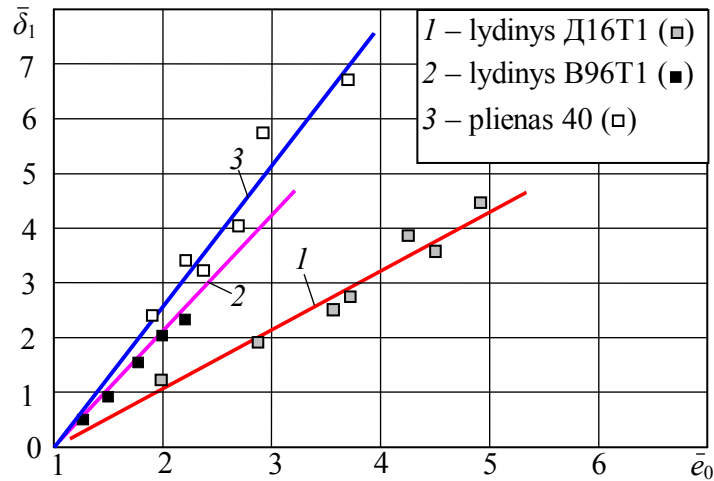
Konstantų A_1 ir A_2 nustatymui, pagal eksperimentinius mažaciklio minkšto tempimo gniuždymo duomenis sudarome grafinę priklausomybę $\bar{\delta}_{1;2} = f(\bar{e}_0)$, pagal kurią gauname

$$A_{1;2} = \frac{\bar{\delta}_{1;2}}{\left(\bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_T}{2} \right)}. \quad (2.3)$$

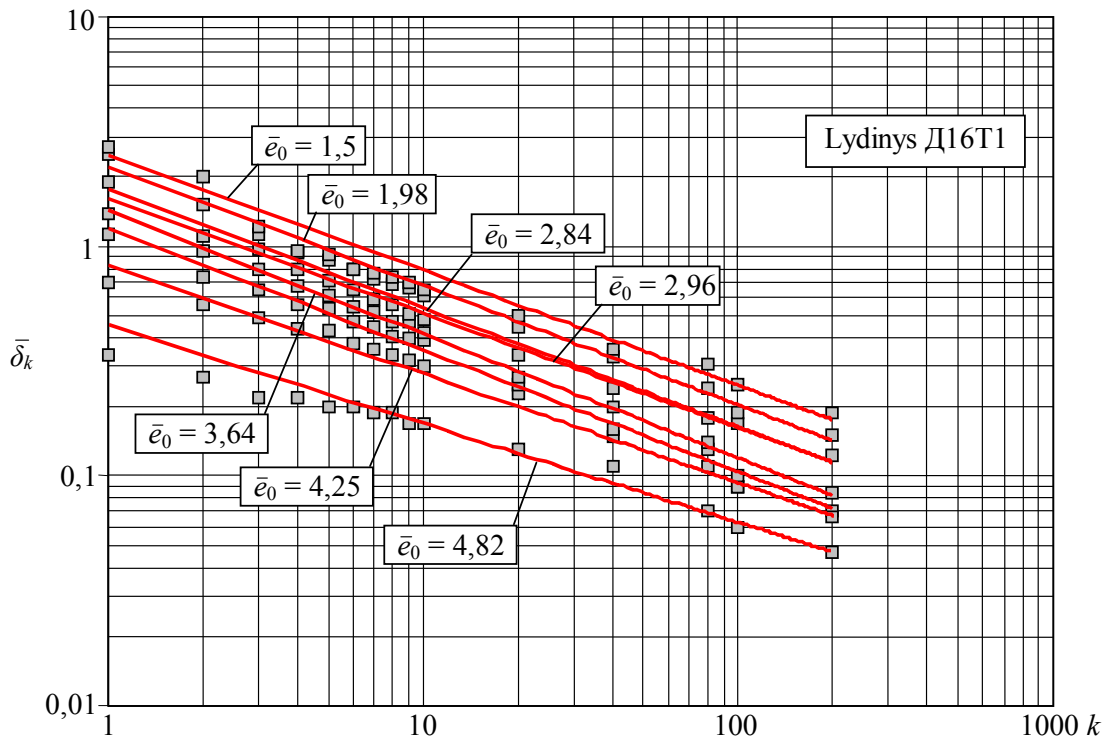
Pirmo pusciklio priklausomybės $\bar{\delta}_1 = f(\bar{e}_0)$ grafikas yra pateiktas 2.2 pav. [6].

Pagal 2.2 pav. nustatytos nagrinėjamų medžiagų vidutinės A_1 reikšmės yra tokios [6]: lydiniai Д16Т1 – 0,66; lydiniai В96Т1 – 1,06; plienui 40 – 1,42. Analogiškai cikliškai anizotropinėms medžiagoms gali būti nustatomos konstantos A_2 reikšmė, pvz., lydiniai В96Т1 – $A_2 = 1,1$; medžiagoms su kintamomis ciklinėmis savybėmis konstantos A reikšmė gali pasikeisti tam tikrame pusciklyje, pvz., plienui 40 – $A_4 = 0,88$ [6]. Pastarosios medžiagos dažniausiai iš pradžių (keliolikos arba keliasdešimties pradinių pusciklių) silpnėja, o toliau tampa stabiliomis arba stiprėja, todėl dažniausiai keičiasi ir jų laipsnio rodiklio α reikšmė bei ženklas.

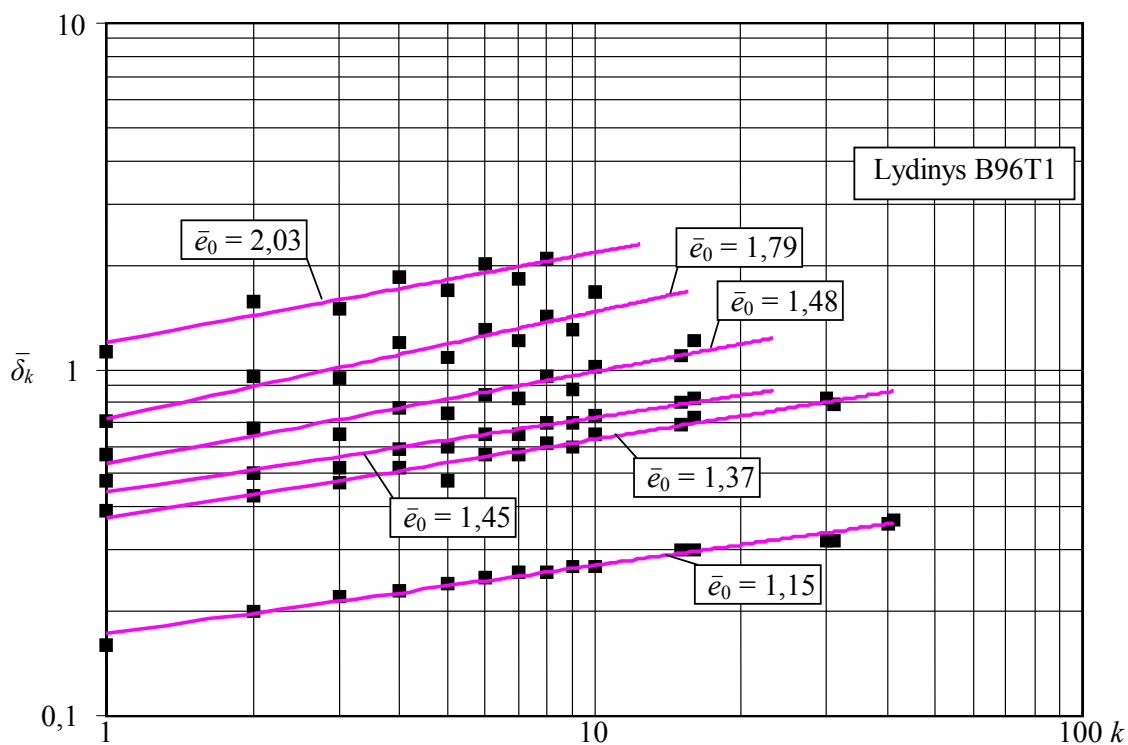
Pagrindinis parametras, nustatantis priklausomybę tarp pirmojo ir k -tojo pusciklio kilpos pločio yra (2.2) lygybėje naudojamas laipsnio rodiklis α . Šis dydis nustatomas pagal $\bar{\delta}_k - k$ priklausomybę, kuri logaritminėse koordinatėse sudaro tiesę. Šios tiesės posvirio kampas ir yra α (žr. 2.3-2.5 pav. [6]). Priklausomai nuo pradinės deformacijos, α gali kisti, todėl apskaičiuojama jos vidutinė reikšmė.



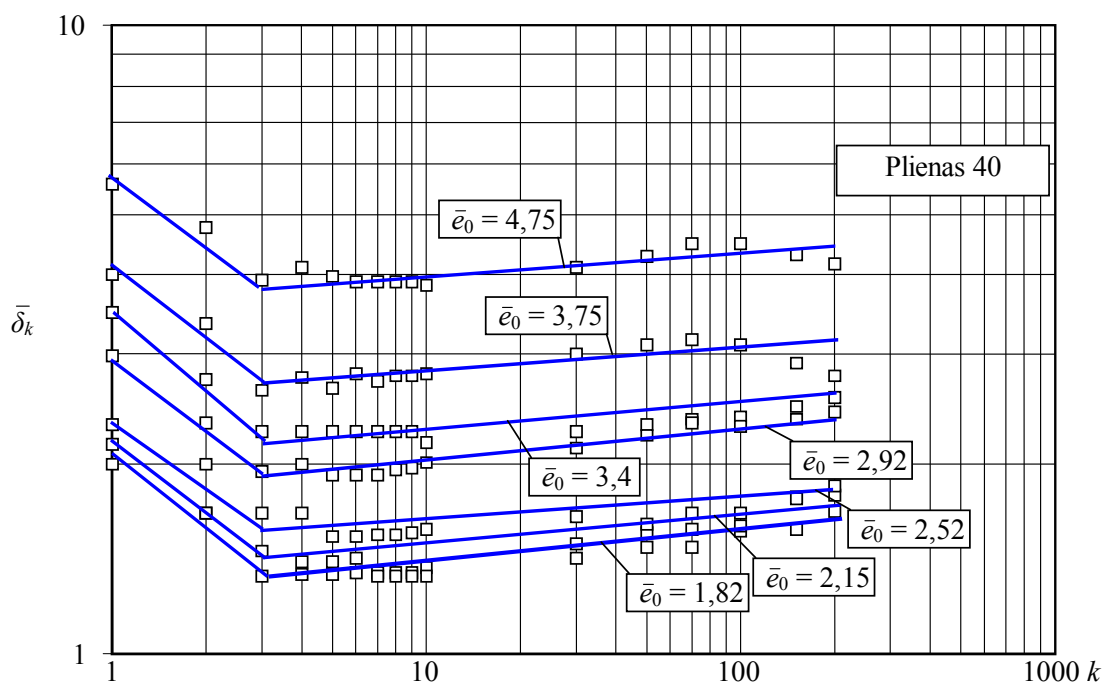
2.2 pav. Pirmojo pusciklio kilpos pločio priklausomybė nuo pradinės deformacijos



2.3 pav. Lydinio D16T1 histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo apkrovimo pusiklių skaičiaus ($\alpha = 0,46 \pm 8,58 \%$)



2.4 pav. Lydinio B96T1 histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus ($\alpha = -0,27 \pm 2,28 \%$)



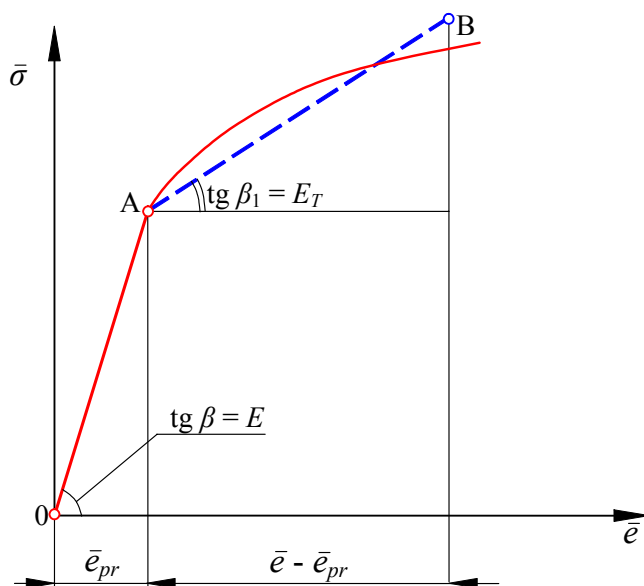
2.5 pav. Plieno 40 histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo apkrovimo pusciklių skaičiaus ($\alpha_1 = 0,39 \pm 18,7 \%$; $\alpha_4 = -0,05 \pm 10,0 \%$)

2.3 Sustiprėjimo modulis G_k

Šis medžiagos ciklinio deformavimo diagramos parametras reikalingas skaičiuojant cikliškai lenkiamus, sukamus ar kitokiais būdais apkrautus elementus, kai juose atsirandantys įtempimai ir deformacijos viršija proporcingumo ribas ir kai diagramos plastinė dalis schematizuojama (aproksimuojama) tiese. Panašiai aproksimuojamos ir statinio deformavimo (dažniausiai tempimo) diagramos, kai nustatomas sustiprėjimo modulis G_T . Aproximavimas tiese pasižymi tuo, kad gaunamos nesudėtingos įtempimus ir deformacijas aprašančios analitinės išraiškos, palengvinančios skaičiavimus, tačiau, tuo pat metu, tam tikrame deformacijų intervale pakankamu tikslumu sutampančios su eksperimentinėmis kreivėmis [1, 3, 4].

Taikant šį schematizavimo būdą, $\bar{\sigma} - \bar{e}$ diagrama pakeičiama dvejomis laužytomis linijomis (žr. 2.6 pav.). Viena linija (0A) atitinka tampriąją dalį, charakterizuojamą tamprumo modulių E ; kita (AB) – plastinę dalį. Taikant poligonalinį schematizavimą, laužytų linijų skaičius gali būti didesnis. Plastinį deformavimą charakterizuoja medžiagos sustiprėjimo modulis E_T , savo skaitine reikšme lygus $\text{tg}\beta_1$. Skaičiavimuose E_T keičiamas santykiniu sustiprėjimo modulių G_T , kurio reikšmė apskaičiuojama lygybe:

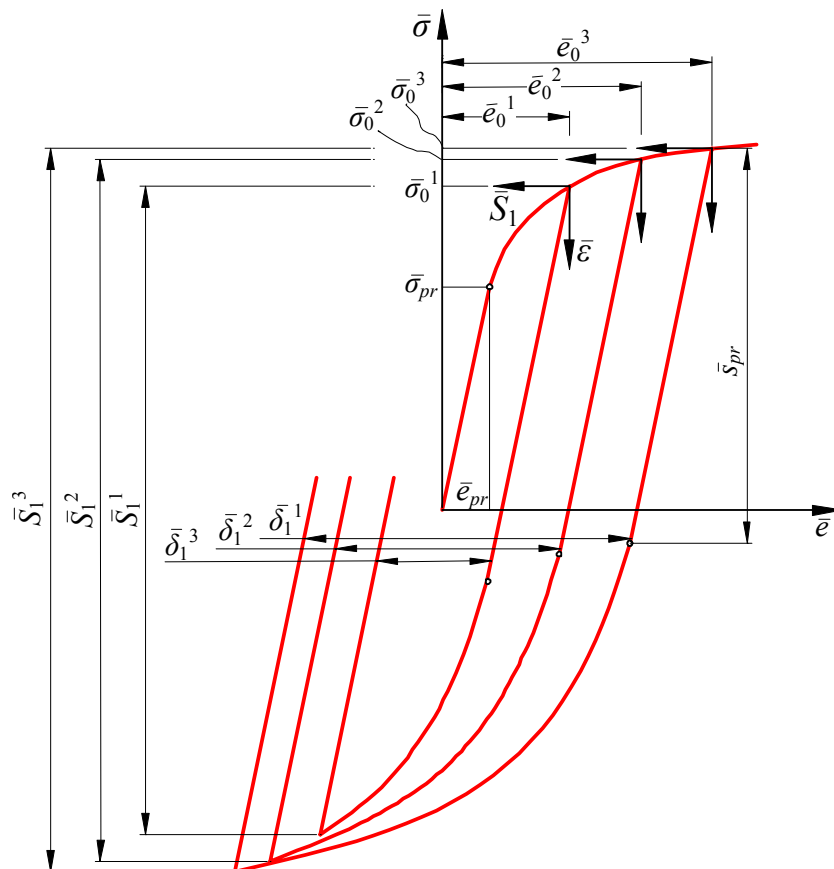
$$G_T = \frac{\text{tg}\beta_1}{\text{tg}\beta} = \frac{E_T}{E}. \quad (2.4)$$



2.6 pav. Tiesė aproksimuota statinio deformavimo $\bar{\sigma} - \bar{e}$ diagrama

Ciklinio deformavimo diagramų plastinės dalies sustiprėjimo laipsnį nusako modulis G_k . Nustatant G_k , svarbu įvertinti tai, kad ciklinio deformavimo diagramos yra braižomos koordinatėse $\bar{S} - \bar{\varepsilon}$, kad daugumos medžiagų \bar{s}_{pr} nelygus 2 ir kad pradinę deformaciją \bar{e}_0 ir kilpos plotį $\bar{\delta}_k$ sieja (2.2) priklausomybė.

Visi šie parametrai yra pavaizduoti mažaciklio minkšto deformavimo grafike (žr. 2.7 pav. [1]). Šiame grafike nubraižytos trys pirmojo pusciklio įtempimų-deformacijų kreivės – \bar{S}_1^1 , \bar{S}_1^2 ir \bar{S}_1^3 , kurios atitinka pradinę deformaciją $\bar{e}_0^1 < \bar{e}_0^2 < \bar{e}_0^3$ ir kilpos pločius $\bar{\delta}_1^1 < \bar{\delta}_1^2 < \bar{\delta}_1^3$. Kitų pusciklių kreivės nepavaizduotos, kadangi juose gali kisti tik kilpos plotis $\bar{\delta}_k$. Kintant kilpos pločiui, atitinkamai kinta ir modulio G_k reikšmė. Didėjant k skaičiui, cikliškai silpnėjančių medžiagų G_k reikšmė mažėja, cikliškai stiprėjančių medžiagų G_k – didėja, o cikliškai stabilių medžiagų G_k lieka toks pat.



2.7 pav. Pirmojo pusciklio tampriai plastinio deformavimo diagramos schema (minkštas apkrovimas)

Įvertinus aukščiau išdėstytas sąlygas, galima nustatyti analitinę bet kurio pusciklio G_k išraišką. Tokiu būdu išvengiama pakankamai imlus šio parametro grafinis nustatymas pagal kiekvieno pusciklio diagramą.

(2.2) priklausomybė yra išreikšta $\bar{\sigma} - \bar{\varepsilon}$ koordinatėse, t. y., $\bar{\delta}_k = \frac{\delta_k}{\varepsilon_{pr}}$. Tačiau, kaip buvo minėta, pirmo ir likusių pusciklių diagramų analitinės priklausomybės išreiškiamos $\bar{S} - \bar{\varepsilon}$ koordinatėse. Taigi, abi (2.2) lygybės puses padalinę iš $\bar{s}_{pr} = \bar{\varepsilon}_{pr}$ gauname

$$\frac{\bar{\delta}_k}{\bar{\varepsilon}_{pr}} = \frac{A}{\bar{s}_{pr}} \left(\bar{\varepsilon}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2} \right) k^\alpha, \quad (2.5)$$

arba, įvertinę, kad $\bar{\varepsilon}_0 = f(\bar{\sigma}_0)$

$$\frac{\bar{\delta}_k}{\bar{\varepsilon}_{pr}} = \frac{A}{\bar{s}_{pr}} \left(f(\bar{\sigma}_0) - \frac{\bar{s}_{pr}}{2} \right) k^\alpha. \quad (2.6)$$

Paprastumo dėlei, šiose priklausomybėse vietoj konstantų $A_{1,2}$ visiems puscikliams naudojame bendrą konstantą A (t. y., neivertiname kilpų slinkimo arba vienpusės platinės deformacijos kaupimo).

Žinome, kad [6]

$$G_k = \frac{\bar{S} - 1}{\bar{\varepsilon} - 1}, \quad (2.7)$$

arba

$$G_k = \frac{\bar{S} - 1}{\bar{\delta}_k + \bar{S} - 1}. \quad (2.8)$$

Į (2.8) lygybę vietoj $\bar{\delta}_k$ įstatome (2.6) išraišką:

$$G_k = \frac{\bar{S} - 1}{\frac{A}{\bar{s}_{pr}} \left(f(\bar{\sigma}_0) - \frac{\bar{s}_{pr}}{2} \right) k^\alpha + \bar{S} - 1}, \quad (2.9)$$

čia: $f(\bar{\sigma}) = \frac{\bar{\sigma}}{G_T} - \frac{1-G_T}{G_T}$.

Darbe [6] funkcija $f(\bar{\sigma})$ buvo pakeičiama į $f(\bar{S})$, kadangi naudojamos $\bar{S} - \bar{\varepsilon}$ koordinatės, tačiau tokiu atveju (2.9) lygybėje vietoj konstantos A turi būti naudojama ši pasikeitimą įvertinanti konstanta A^* . Jos nustatymui reikalingos papildomos priklausomybės, kurios patektos [6].

Tik tuo atveju, kai $\bar{s}_{pr} = 2$, galima užrašyti, kad $f(\bar{\sigma}) = f(\bar{S})$, t. y.,

$$f(\bar{S}) = \frac{\bar{S}}{G_T} - \frac{1-G_T}{G_T},$$

kadangi $\bar{\sigma} = \frac{\bar{s}_{pr}\bar{S}}{2} = \frac{2}{2}\bar{S}$. Tada, po pakeitimų ir supaprastinimų, (2.9) lygybė užrašoma žymiai paprasčiau [6]:

$$G_k = \frac{1}{\frac{Ak^\alpha}{2G_T} + 1}. \quad (2.10)$$

(2.10) lygybė geriausiai tinka nustatant parametą G_k , jei medžiagos ciklinė proporcingumo riba \bar{s}_{pr} apytiksliai lygi 2. Todėl bendram atvejui (2.10) užrašoma taip:

$$G_k = \frac{1}{\frac{Ak^\alpha}{\bar{s}_{pr}G_T} + 1}. \quad (2.11)$$

Nagrinėjamame pusciklyje (2.10) ir (2.11) lygybėmis apskaičiuotos šiuo atveju G_k reikšmė yra konstanta, nepriklausanti nuo pradinės deformacijos dydžio.

Nustatysime G_k išraišką, kai $\bar{s}_{pr} \neq 2$.

Žinome, kad esant minkštam apkrovimui cikliniai įtempimai yra lygūs:

$$\bar{S} = \frac{2}{\bar{s}_{pr}}\bar{\sigma}_0 = \frac{2}{\bar{s}_{pr}}(1 - G_T + G_T\bar{\varepsilon}_0). \quad (2.12)$$

I (2.9) lygybę įstatę šią \bar{S} išraišką gauname:

$$G_k = \frac{\frac{2}{\bar{s}_{pr}}(1 - G_T + G_T \bar{e}_0) - 1}{\frac{A}{\bar{s}_{pr}} \left(\bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2} \right) k^\alpha + \frac{2}{\bar{s}_{pr}}(1 - G_T + G_T \bar{e}_0) - 1}, \quad (2.13)$$

arba supaprastinę:

$$G_k = \frac{1 - G_T + G_T \bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2}}{\frac{A}{2} \left(\bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2} \right) k^\alpha + 1 - G_T + G_T \bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2}}. \quad (2.14)$$

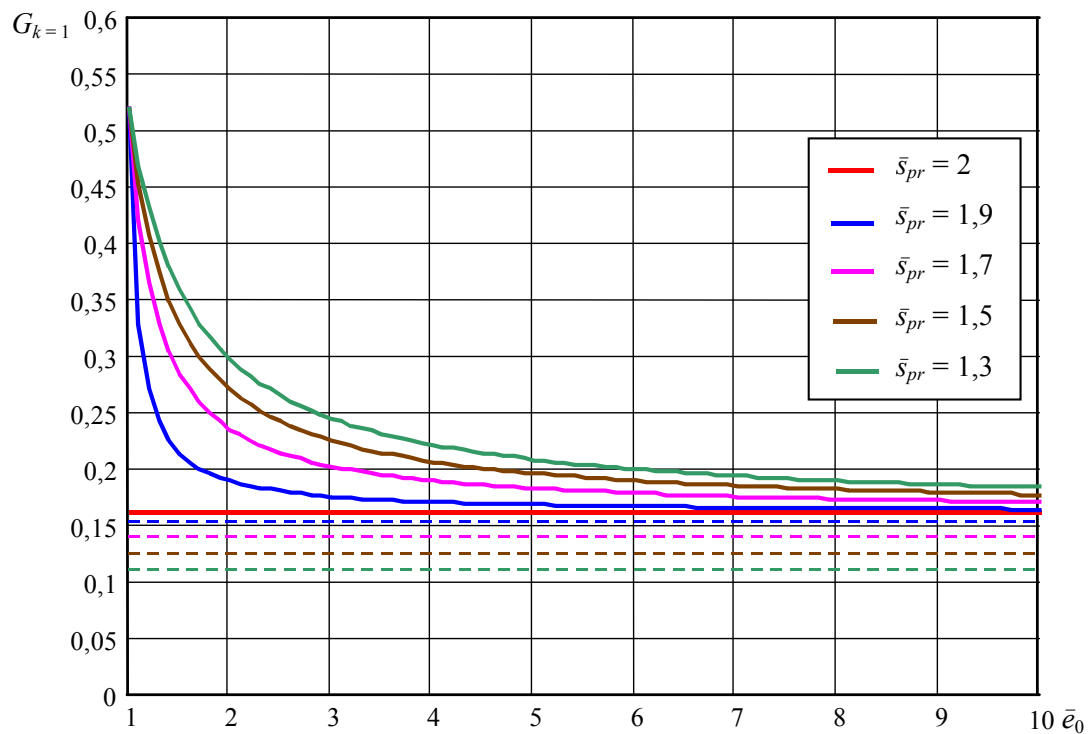
Ši priklausomybė parodo, kad, kai $\bar{s}_{pr} \neq 2$, G_k nėra pastovus dydis, o kinta priklausomai nuo pradinės deformacijos \bar{e}_0 . Tai matyti iš pirmo pusciklio G_k grafiko (žr. 2.8 pav.), kuris buvo gautas pasirinkus konstantas $G_T = 0,18$, $A = 1,85$ ir esant tokioms ciklinės proporcingumo ribos reikšmėms: $\bar{s}_{pr} = 2; 1,9; 1,7; 1,5; 1,3$. Punktyrinėmis tiesėmis pavaizduotos G_k reikšmės, apskaičiuotos (2.11) lygybe.

2.9 ir 2.10 pav. pateiktos 10-jo ir 100-jo pusciklio G_k kreivės, esant toms pačioms medžiagos konstantoms ir ciklinio silpnėjimo rodikliui $\alpha = 0,2$.

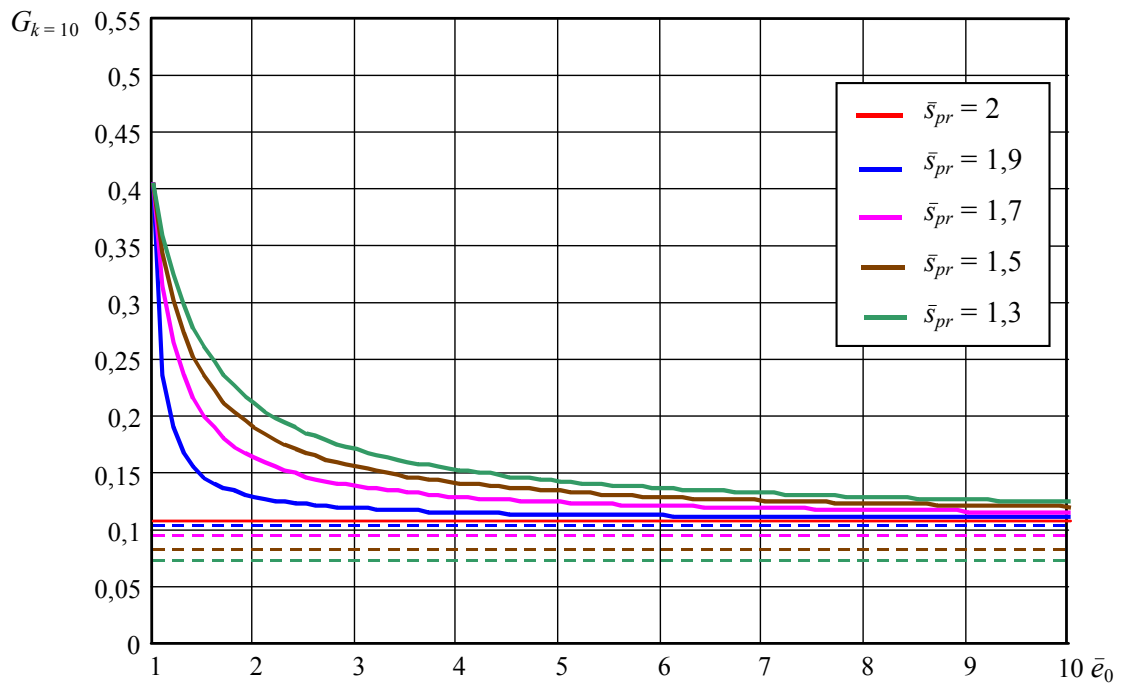
Iš pateiktų grafikų matyti, kad didėjant deformacijai \bar{e}_0 , kreivės artėja prie G_k reikšmės, kuri apskaičiuota, esant $\bar{s}_{pr} = 2$. Didėjant pusciklių skaičiui, tai dar labiau išryškėja.

Didžiausia paklaida gauta labai mažų pradinių plastinių deformacijų srityje. Pvz., esant $\bar{e}_0 = 1$ (žr. 2.8 pav.), visos kreivės prasideda prie $G_k = 0,519$, o artimiausia tiesė atitinka tik $G_k = 0,16$. Taigi, rezultatai skiriasi 3 kartus. Netgi esant deformacijai $\bar{e}_0 = 2$ ir pakankamai dideliame cikliniam proporcingumui – $\bar{s}_{pr} = 1,9$, (2.11) lygybė rodo paklaidą – 15,3 %. Atitinkamai mažėjant \bar{s}_{pr} , paklaida dar labiau didėja.

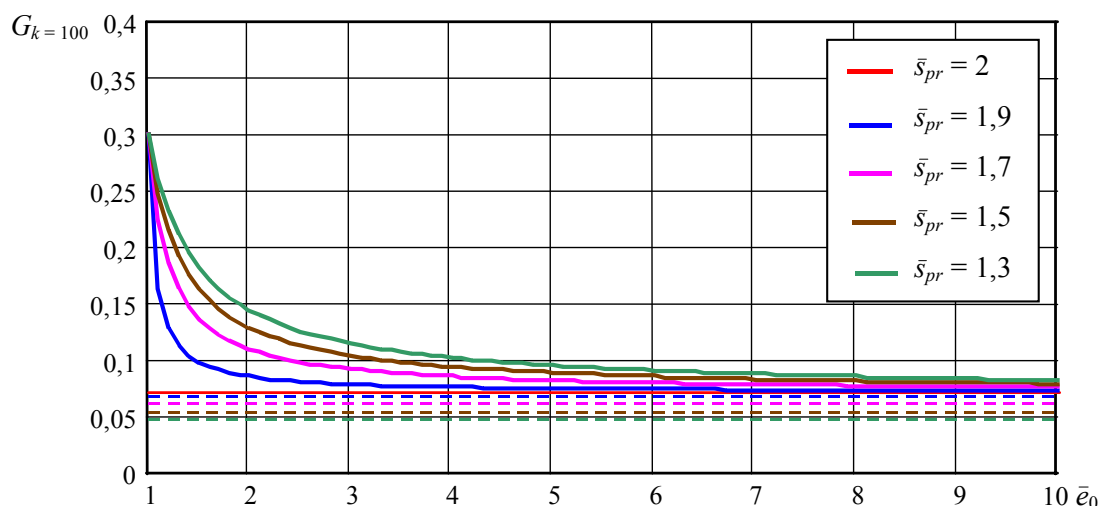
Taigi, (2.11) lygybe nustatant ciklinio sustiprėjimo modulį G_k , kai $\bar{s}_{pr} < 2$, gaunamos mažesnės šio parametro reikšmės nei taikant (2.14), o paklaidos dydis labiausiai priklauso ir nuo to, kokį pasirenkame pradinių deformacijų intervalą.



2.8 pav. Pirmojo pusciklio sustiprėjimo modulio G_k priklausomybės nuo pradinės deformacijos grafikas (punkttyrinės tiesės – G_k reikšmės, apskaičiuotos (2.11) lygybe)



2.9 pav. 10-ojo pusciklio sustiprėjimo modulio G_k priklausomybės nuo pradinės deformacijos grafikas (punkttyrinės tiesės – G_k reikšmės, apskaičiuotos (2.11) lygybe)



2.10 pav. 100-ojo pusciklio sustiprėjimo modulio G_k priklausomybės nuo pradinės deformacijos grafikas (punktyrinės tiesės – G_k reikšmės, apskaičiuotos (2.11) lygybe)

2.4 Laipsnio rodiklis m_k

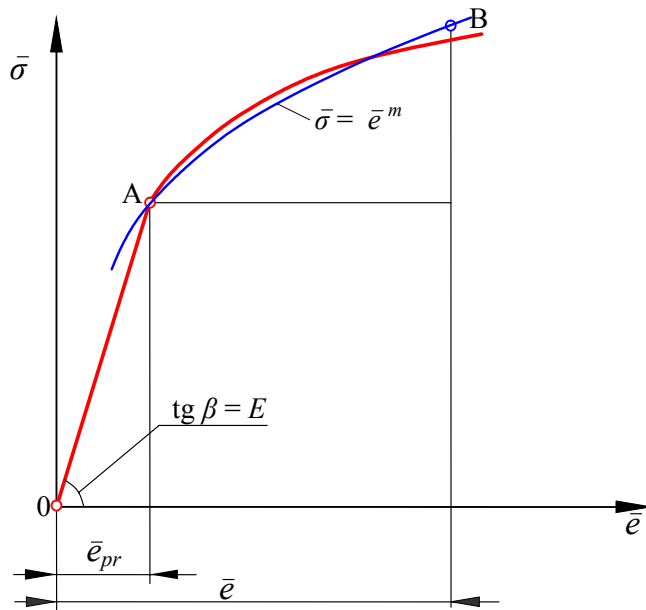
Laipsnio rodiklis m_k – tai ciklinės deformavimo diagramos plastinės dalies parametras, įvertinantis kiekvieno pusciklio įtempimų-deformacijų kreivės sustiprėjimo laipsnio kitimą, kai deformuojamos cikliškai silpnėjančios arba stiprėjančios medžiagos. Stabilių medžiagų $m_1 = m_k = const$, tai reiškia, kad reikia nustatyti tik šio parametro pirmojo pusciklio reikšmę.

Statinio deformavimo atveju, kai schematizuojam tempimo arba gniuždymo diagrama, medžiagos sustiprėjimas įvertinamas laipsnio rodikliu m (žr. 2.11 pav.). Toks schematizavimo būdas plačiai aprašytas literatūroje ([7, 8] ir kt., o diagramos santykinėse $\bar{\sigma} - \bar{e}$ koordinatėse aproksimavimas pateiktas [9].

Aproksimuojant laipsnine funkcija, teorinė deformavimo kreivė gaunama artimesnė eksperimentinei. Šiuo atveju, tamprioji dalis įvertinama tiese 0A, o plastinė dalis kreive AB. Analitiškai tai užrašoma taip:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} &= \bar{e}, & \text{kai } 0 < \bar{e} < 1 \\ \bar{\sigma} &= \bar{e}^m, & \text{kai } \bar{e} > 1 \end{aligned} \quad (2.15)$$

(3.15) lygybės išreikštos santykinėse koordinatėse, įvertinant, kad $\bar{\sigma}_{pr} = \bar{e}_{pr} = 1$.



2.11 pav. Laipsnine funkcija aproksimuota statinio deformavimo $\sigma - e$ diagrama

Tiksliausiai laipsnio rodiklio m reikšmė gali būti nustatoma pagal eksperimentinius deformavimo kreivės taškus taikant mažiausių kvadratų metodą. Paprasčiausias būdas – kai m apskaičiuojamas:

$$m = \frac{\lg \bar{\sigma}_2 - \lg \bar{\sigma}_1}{\lg \bar{e}_2 - \lg \bar{e}_1}, \quad (2.16)$$

čia: $\bar{\sigma}_1$ ir \bar{e}_1 – pasirinkto deformavimo diagramos intervalo pradžios įtempimas ir deformacija (dažniausiai tai $\bar{\sigma}_{0,2}$ ir $\bar{e}_{0,2}$ arba $\bar{\sigma}_{pr}$ ir \bar{e}_{pr});

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

Jei $\bar{\sigma}_{pr} = 1$ ir $\bar{e}_{pr} = 1$, tai (2.16) tampa paprastesnė:

$$m = \frac{\lg \bar{\sigma}_2}{\lg \bar{e}_2}. \quad (2.17)$$

Žinome, kad koordinatėse $\bar{S} - \bar{\varepsilon}$ proporcingumo riba prilyginama vienetui ($\bar{S}_{pr} = 1$, $\bar{\varepsilon}_{pr} = 1$). Taigi, nustatant m_k , naudosime (2.17) lygybę, statinius įtempimus ir deformacijas

joje pakeisdami cikliniais \bar{S} ir $\bar{\varepsilon}_k$:

$$m_k = \frac{\lg \bar{S}}{\lg \bar{\varepsilon}_k}. \quad (2.18)$$

Šioje lygybėje \bar{S} naudojama be indekso k , kadangi minkšto apkrovimo atveju cikliniai įtempimai išlieka pastovūs.

Kadangi $\bar{\varepsilon}_k = \bar{\delta}_k + S$, tai

$$m_k = \frac{\lg \bar{S}}{\lg(\bar{\delta}_k + \bar{S})}. \quad (2.19)$$

Atlikę pakeitimus, (2.19) užrašome taip:

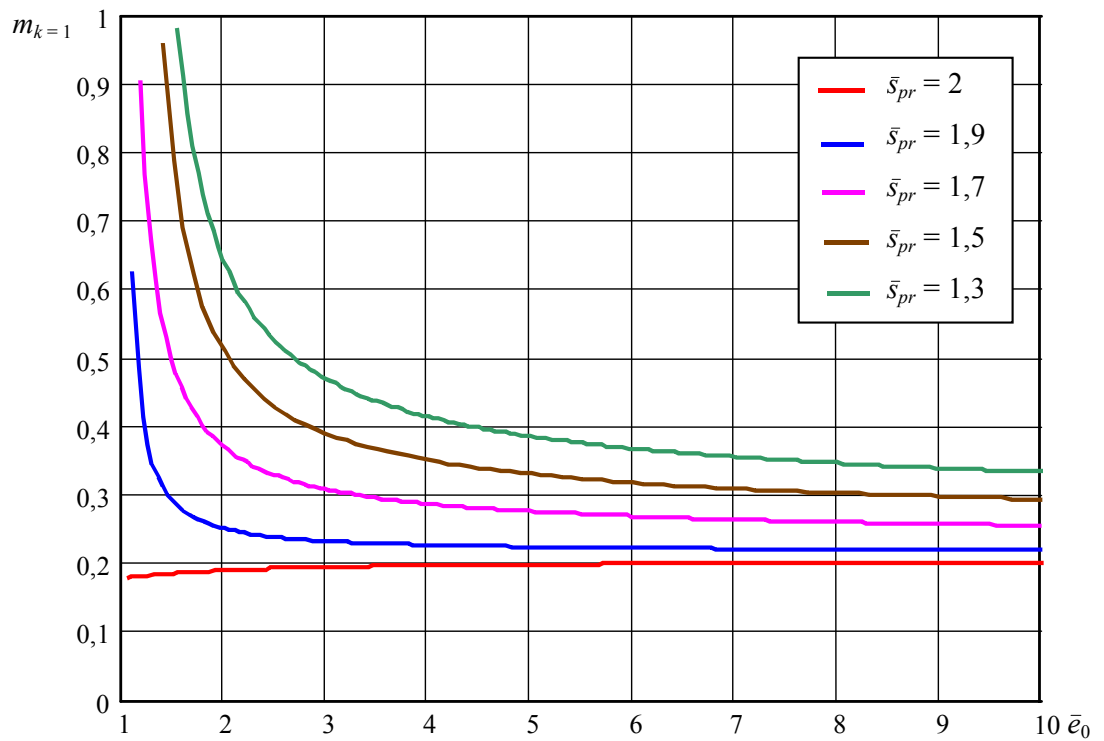
$$m_k = \frac{\lg\left(\frac{2}{\bar{s}_{pr}} \bar{e}_0^m\right)}{\lg\left[\frac{A}{\bar{s}_{pr}} \left(\bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2}\right) k^\alpha + \frac{2}{\bar{s}_{pr}} \bar{e}_0^m\right]}. \quad (2.20)$$

Jei $\bar{s}_{pr} = 2$, (2.20) lygybė gali būti užrašyta taip:

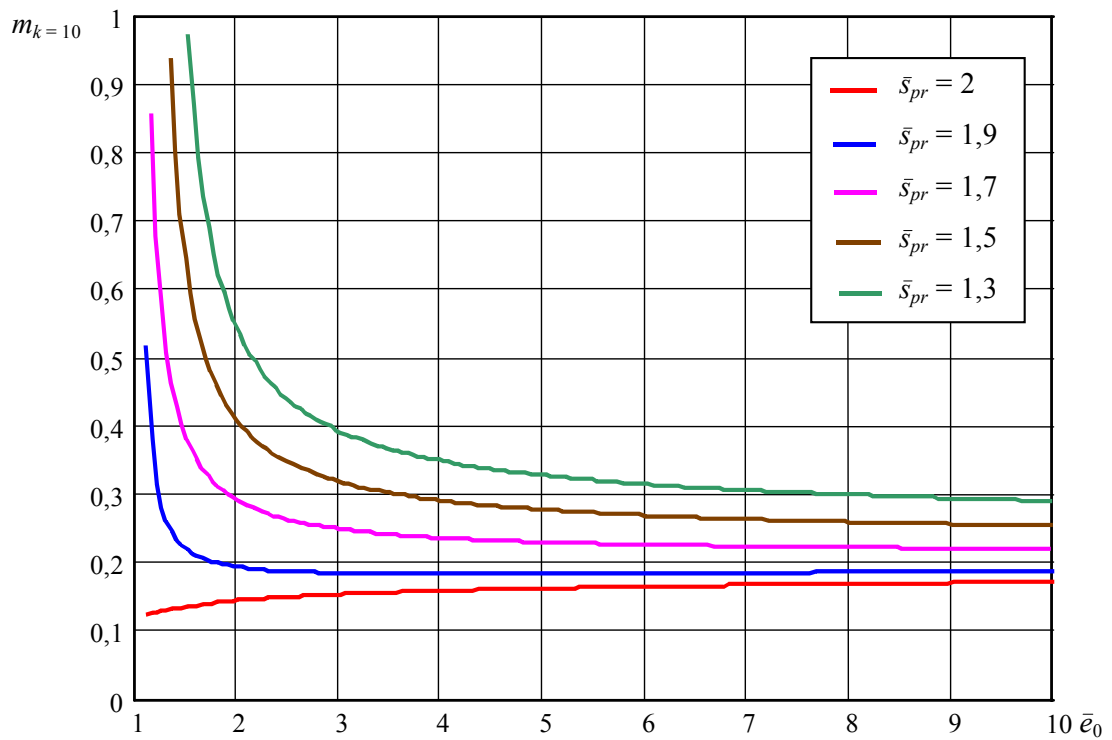
$$m_k = \frac{\lg(\bar{e}_0^m)}{\lg\left[\frac{A}{2} (\bar{e}_0 - 1) k^\alpha + \bar{e}_0^m\right]}. \quad (2.21)$$

Panašia laipsnio rodiklis m_k išvedamas ir darbe [1]. 2.12-2.14 pav. pateiktos laipsnio rodiklio m_k priklausomybės nuo pradinės deformacijos \bar{e}_0 kreivės, atitinkamai 1-ame, 10-ame ir 100-ame puscikliuose. Šios kreivės gautos naudojant (2.20) priklausomybę, kaip ir tiesinio aproksimavimo atveju pasirinkus konstantą $A=1,85$, ciklinio silpnėjimo rodiklį $\alpha=0,2$ bei ciklinės proporcingumo ribos reikšmes – $\bar{s}_{pr}=2; 1,9; 1,7; 1,5; 1,3$. Statinio deformavimo laipsnio rodiklio reikšmė – $m=0,2$.

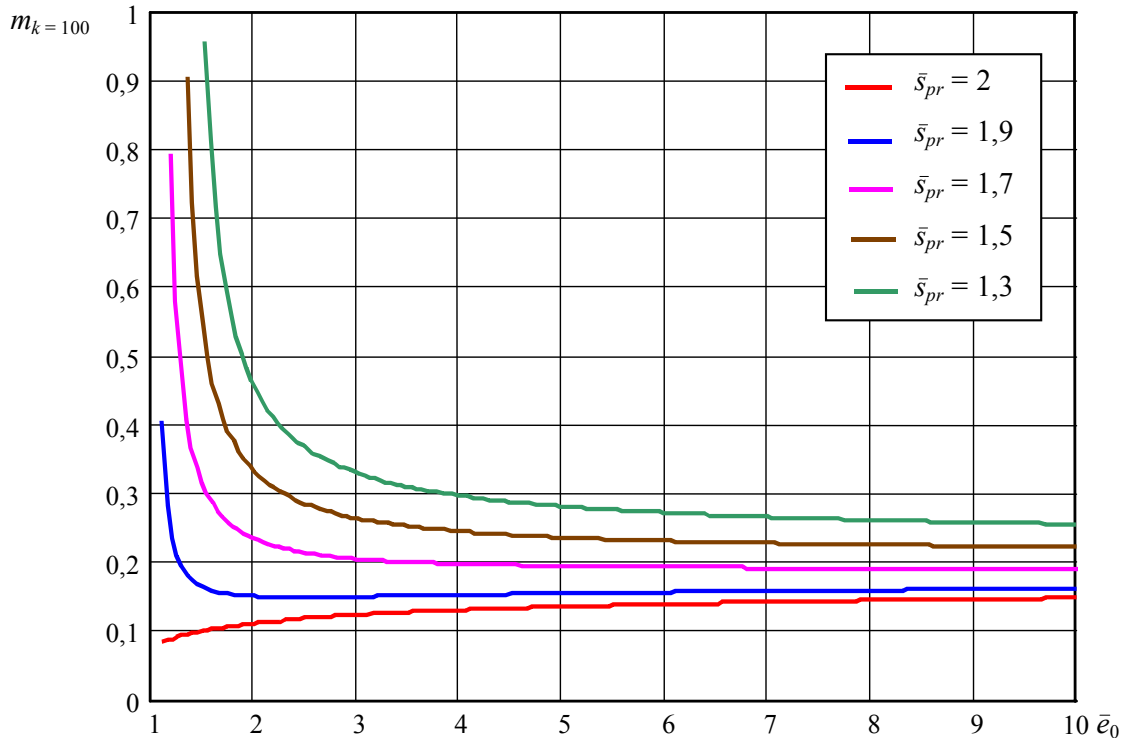
Iš gautų kreivių matyti, kad esant $\bar{s}_{pr} = 2$, visame pradinės deformacijos intervale m_k reikšmės kitimas yra nedidelis, todėl galima užrašyti $m_k = const$.



2.12 pav. 1-ojo pusciklio laipsnio rodiklio m_k priklausomybė nuo pradinės deformacijos



2.13 pav. 10-ojo pusciklio laipsnio rodiklio m_k priklausomybė nuo pradinės deformacijos



2.14 pav. 100-ojo pusciklio laipsnio rodiklio m_k priklausomybė nuo pradinės deformacijos

Kai $\bar{s}_{pr} < 2$, laipsnio rodiklis m_k kinta priklausomai nuo pradinės deformacijos. Kai pradinės deformacijos yra labai mažos ($\bar{e}_0 \rightarrow 1$), m_k reikšmė negali būti nustatoma dėl (2.20) priklausomybės vardiklio pirmuose skliausteliuose esančio reiškinio $\bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2}$ neapibrėžtumo, kadangi kai $\bar{e}_0 = 1$, gauname $\bar{\delta}_k \neq 0$. Šiuo atveju, šioje deformacijų srityje vietoj reiškinio $\bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2}$ turėtų būti naudojama $\bar{e}_0 - 1$.

Tačiau, paprastumo dėlei, m_k kreivės nustatymui pagal (2.20) priklausomybę mažų deformacijų \bar{e}_0 sritis gali būti tiesiog atmesta, t. y., deformacijų intervalo pradžia pasirinktas taškas $\bar{e}_0 \neq 1$. Kaip rodo 2.12-2.14 pav. pateiktos diagramos, mūsų atveju tokiu tašku galėtų būti deformacija $\bar{e}_0 = 2$. Tada, jei $\bar{s}_{pr} \approx 2$, pvz., $\bar{s}_{pr} = 1,9$ (žr. 2.12 pav.), m_k reikšmių kitimas yra labai nežymus ($m_k = 0,251 \div 0,219$), todėl deformacijų intervale $\bar{e}_0 = 2 \dots 10$ tiesiog apskaičiuojama arba nustatoma grafiškai šio parametro vidutinė reikšmė.

Jei m_k kitimas yra labiau išreikštas, pvz., kai $\bar{s}_{pr} < 1,7$ (žr. 2.12 pav.), jo vidutinė reikšmė gali būti apskaičiuojama taip:

$$m_{k\text{vid}} = \frac{\int_a^b \frac{\lg\left(\frac{2}{\bar{s}_{pr}} \bar{e}_0^m\right)}{\lg\left[\frac{A}{\bar{s}_{pr}} \left(\bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{pr}}{2}\right) k^\alpha + \frac{2}{\bar{s}_{pr}} \bar{e}_0^m\right]} d\bar{e}_0}{b-a}, \quad (2.22)$$

čia: a – deformacijų \bar{e}_0 intervalo pradžia;

b – deformacijų \bar{e}_0 intervalo pabaiga.

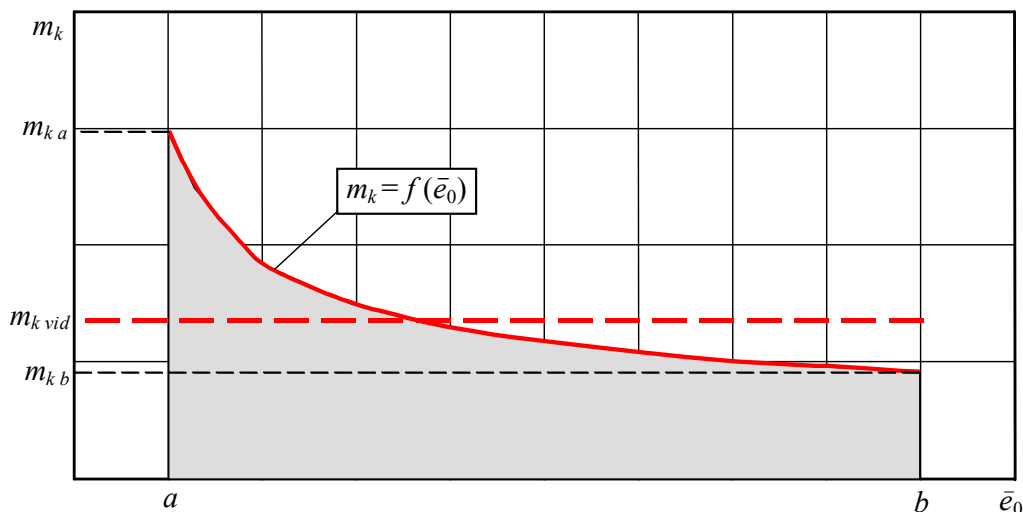
Pateikta priklausomybė grafiškai yra paašikinta 2.15 pav. Jos skaitiklyje yra gaunamos m_k kreivės ribojamas plotas, o vardiklyje integravimo arba deformacijų \bar{e}_0 intervalas.

2.2 lentelėje yra pateiktos (2.22) lygybe apskaičiuotos $m_{k\text{vid}}$, kai $\bar{s}_{pr} = 1,7; 1,5; 1,3$.

2.2 lentelė

Laipsnio rodiklio $m_{k\text{vid}}$ reikšmės

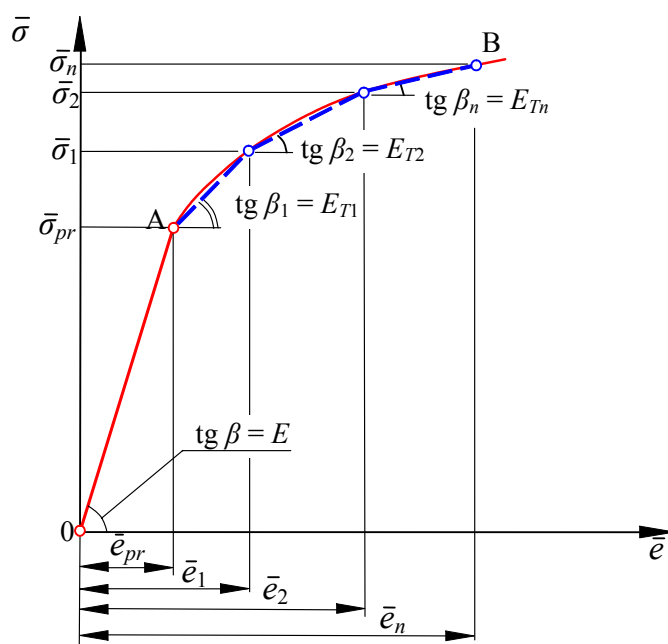
Pusciklis	Ciklinės proporcingumo riba		
	$\bar{s}_{pr} = 1,7$	$\bar{s}_{pr} = 1,5$	$\bar{s}_{pr} = 1,3$
$k = 1$	0,278	0,334	0,392
$k = 10$	0,232	0,282	0,335
$k = 100$	0,197	0,24	0,288



2.15 pav. Laipsnio rodiklio m_k vidutinės reikšmės nustatymo schema

2.5 Ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagramų plastinės dalies aproksimavimas laužtine linija

Kaip jau buvo minėta, analitiniuose skaičiavimuose dažniausiai taikoma tiesinė ir laipsninė statinių ir ciklinių tampriai plastinių deformavimo diagramų aproksimacija. Tačiau taikant skaitinius metodus struktūros įtempimų-deformacijų būvio už proporcingumo ribų nustatymui (pvz., baigtinių elementų metodą programa ANSYS), labai patogu naudoti taip vadinamą poligonalią aproksimaciją, kai plastinė deformavimo kreivės dalis pakeičiama laužtine linija, sudaryta iš dviejų ir daugiau tiesių (žr. 2.16 pav.) [10]. Pasirinkus didesnę sudalinimo atkarpų skaičių n kreivės AB dalyje, gaunamas didesnis aproksimavimo tikslumas. 2.16 paveiksle deformacija $e_n = e_{0max}$.



2.16 pav. Tiesėmis aproksimuota statinio deformavimo $\bar{\sigma} - \bar{e}$ diagrama

Kiekvienos atkarpos sustiprėjimo modulių reikšmes galima apskaičiuoti pagal tokias priklausomybes:

$$E_{Tn} = \frac{\sigma_n - \sigma_{(n-1)}}{e_n - e_{(n-1)}}. \quad (2.23)$$

Nustatant $E_{T1} - \bar{\sigma}_0 = \bar{\sigma}_{pr} = 1$, $\bar{e}_0 = \bar{e}_{pr} = 1$.

Sustiprėjimo modulių reikšmės santykinėse koordinatėse apskaičiuojamos taip:

$$G_{Tn} = \frac{E_{Tn}}{E}, \quad (2.24)$$

todėl (2.23) gali būti išreiškiama:

$$G_{Tn} = \frac{\bar{\sigma}_n - \bar{\sigma}_{(n-1)}}{\bar{e}_n - \bar{e}_{(n-1)}}. \quad (2.25)$$

Aproximaciją laužtine linija galima pritaikyti ir ciklinėms deformavimo diagramoms. Čia galimi du būdai.

Pirmas būdas – statinio deformavimo kreivės sudalinimo $\bar{\sigma} - \bar{e}$ intervalams proporcingai nustatyti k -tojo pusciklio kreivės sudalinimo $\bar{S} - \bar{\varepsilon}_k$ arba $\frac{2\bar{\sigma}}{\bar{s}_{pr}} - \bar{\varepsilon}_k$ intervalus, atsižvelgiant į ciklinę proporcingumo ribą \bar{s}_{pr} ir kilpos plotį $\bar{\delta}_k$.

Antras būdas – grafiškai nustatyti pirmojo pusciklio kreivės sudalinimo $\bar{S} - \bar{\varepsilon}_1$ intervalus, o kitiems puscikliams sudalinimo intervalų reikšmių pokyčius išreikšti per kilpos pločių $\bar{\delta}_k$ pokyčius.

2.5.1 Aproximacija pagal statinio deformavimo kreivės parametrus

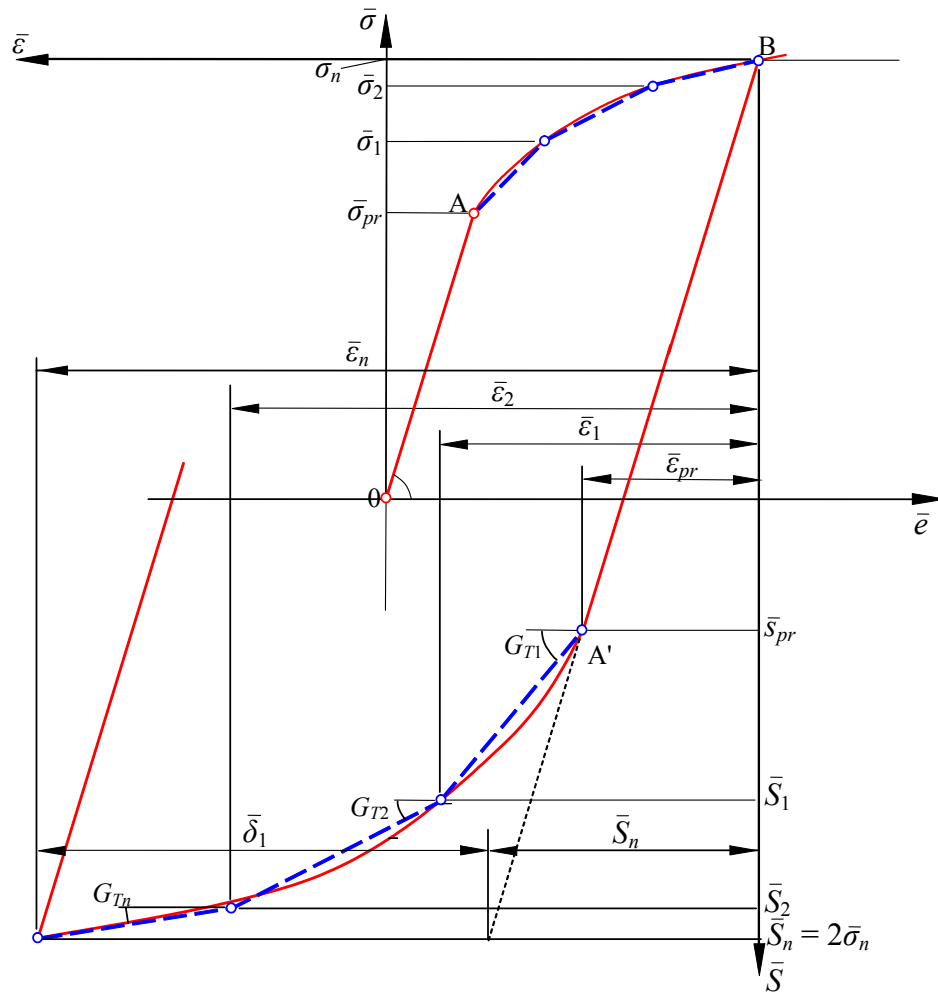
Pirmas aproximacijos laužtine linija būdas atliekamas pagal 2.17 pav. pateiktą schemą, kurioje pavaizduotos statinio ir pirmojo pusciklio ciklinio deformavimo kreivės.

Statinio deformavimo sustiprėjimo moduliai santykinėse koordinatėse apskaičiuojami (2.25) lygybe. Ciklinių įtempimų reikšmės, atsižvelgus į tai, kad minkšto pakrovimo atveju $\bar{S}_{max} = 2\bar{\sigma}_{max}$, apskaičiuojamos pagal lygybę:

$$\bar{S}_n = \bar{s}_{pr} + a(\bar{\sigma}_n - 1), \quad (2.26)$$

čia: a – konstanta, nustatoma taip:

$$a = \frac{2(\bar{\sigma}_{max} - \bar{s}_{pr}/2)}{\bar{\sigma}_{max} - 1}. \quad (2.27)$$



2.17 pav. Tiesėmis aproksimuota pirmojo pusciklio diagrama ($k = 1$)

Akivaizdu, kad kai $\bar{\sigma}_{pr} = 2$, gauname $a = 2$, ir (2.26) lygybė tampa paprastesne:

$$\bar{S}_n = 2\bar{\sigma}_n. \quad (2.28)$$

Reikia atminti, kad (2.26) ir (2.28) lygybėse gaunamų įtempimų \bar{S}_1 , \bar{S}_2 ir t. t. indeksai nurodo ne pusciklių skaičių (kaip įprasta), o sudalinimo intervalo numerį. Gaunamos įtempimų reikšmės visuose deformavimo puscikliuose išlieka pastovios.

Toliau nustatome sudalinimo intervalų ciklinių deformacijų reikšmes k -jame pusciklyje:

$$\bar{\epsilon}_{nk} = \bar{\epsilon}_{pr} + a'_k(\bar{\epsilon}_n - 1), \quad (2.29)$$

čia: a'_k – parametras, kiekvienam deformavimo puscikliui nustatomas lygybe:

$$a'_k = \frac{2\bar{\sigma}_{max} + A(\bar{\epsilon}_{0max} - \bar{s}_{pr}/2)k^\alpha}{\bar{\epsilon}_{0max} - 1}. \quad (2.30)$$

(2.26) ir (2.29) lygybėmis apskaičiuojamos ciklinių įtempimų ir deformacijų reikšmės išreikštos $\bar{S} - \bar{\epsilon}_k$ koordinatėse. Įtempimų ir deformacijų reikšmės $\frac{\bar{S}}{\bar{s}_{pr}} - \frac{\bar{\epsilon}_k}{\bar{\epsilon}_{pr}}$ koordinatėse nesunkiai apskaičiuojamos jas padalinus iš ciklinės proporcingumo ribos.

Tuo atveju, kai įvertinami porinių ir neporinių pusciklių deformacijos kreivės kilpų pločių skirtumai, dėl kurių medžiagoje vystosi vienpusės plastinės deformacijos kaupimas, (2.30) lygybėje vietoj konstantos A reikia naudoti porinių ir neporinių pusciklių konstantas A_1 ir A_2 .

Ciklinio sustiprėjimo moduliai k -jame pusciklyje apskaičiuojami tokia lygybe:

$$G_{Tnk} = \frac{\bar{S}_n - \bar{S}_{(n-1)}}{\bar{\epsilon}_{nk} - \bar{\epsilon}_{(n-1)k}}. \quad (2.31)$$

Akivaizdu, kad G_{Tnk} reikšmės deformacijos metu kinta tik cikliškai nestabilioms medžiagoms. Cikliškai stabilioms medžiagoms, nepriklausomai nuo pusciklių skaičiaus, $G_{Tnk} = \text{const}$.

2.5.2 Aproximacija pagal pirmojo pusciklio deformavimo kreivės parametrus

Taikant šį būdą, visų pirma $\bar{S} - \bar{\epsilon}_k$ koordinatėse grafiškai aproksimuojama pirmojo pusciklio kreivės plastinė dalis. Gaunamos ciklinių įtempimų intervalų reikšmės $\bar{S}_1, \bar{S}_2 \dots \bar{S}_n$, ir ciklinių deformacijų intervalų reikšmės $\bar{\epsilon}_{11}, \bar{\epsilon}_{21} \dots \bar{\epsilon}_{n1}$. Kituose puscikliuose įtempimų intervalai ir \bar{S}_n reikšmės nekinta, kaip ir taikant aproksimacija pagal statinio deformavimo kreivės parametrus, gali kisti tik ciklinių deformacijų intervalų ilgiai ir juos sudarančių deformacijų reikšmės. Visa tai patogiu užrašyti lentelės pavidalu (žr. 2.3 lentelę).

Ciklinių deformacijų reikšmių pokyčiai k -jame pusciklyje išreiškiami tokia lygybe:

$$\bar{\epsilon}_{nk} = \bar{\epsilon}_{pr} + a_k''(\bar{\epsilon}_{n1} - \bar{\epsilon}_{pr}), \quad (2.32)$$

čia: a_k'' – parametras, nustatomas lygybe:

$$a_k'' = \frac{\bar{\varepsilon}_{k \max} - \bar{\varepsilon}_{pr}}{\bar{\varepsilon}_{1 \max} - \bar{\varepsilon}_{pr}} = \frac{(\bar{\varepsilon}_{1 \max} - S)k^\alpha + S - \bar{\varepsilon}_{pr}}{\bar{\varepsilon}_{1 \max} - \bar{\varepsilon}_{pr}}. \quad (2.33)$$

Ciklinio sustiprėjimo moduliai G_{Tnk} gali būti apskaičiuojami, naudojant (2.31) lygybę.

Skaičiavimų supaprastinimui, gautas įtempimų ir deformacijų reikšmės galima išreikšti ir santykinėse $\frac{\bar{S}}{\bar{S}_{pr}} - \frac{\bar{\varepsilon}_k}{\bar{\varepsilon}_{pr}}$ koordinatėse. Tokiu atveju, visos reikšmės 2.3 lentelėje turi

būti padalintos iš ciklinės santykinės proporcingumo ribos.

Jei įvertinama medžiagos ciklinė anizotropija, grafiškai turi būti aproksimuojama ir antrojo pusciklio diagramos plastinė dalis, o tolesni skaičiavimai atliekami, išskiriant porinius ir neporinius pusciklius, t.y., (2.32) ir (2.33) lygybėse poriniams puscikliams vietoj $\bar{\varepsilon}_{1 \max}$ naudojama deformacijos $\bar{\varepsilon}_{2 \max}$ reikšmė.

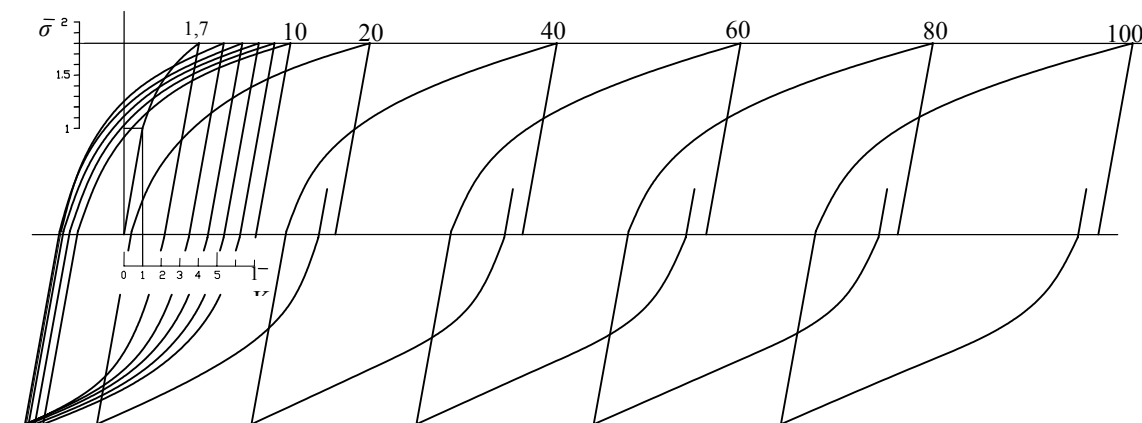
2.3 lentelė

Ciklinės deformavimo diagramos aproksimavimo parametrų reikšmių lentelė

Įtempimų reikšmės	Deformacijų reikšmės			
	$k = 1$	$k = 2$...	k
\bar{S}_1	$\bar{\varepsilon}_{11}$	$\bar{\varepsilon}_{12}$...	$\bar{\varepsilon}_{1k}$
\bar{S}_2	$\bar{\varepsilon}_{21}$	$\bar{\varepsilon}_{22}$...	$\bar{\varepsilon}_{2k}$
...
\bar{S}_n	$\bar{\varepsilon}_{n1}$	$\bar{\varepsilon}_{n2}$...	$\bar{\varepsilon}_{nk}$

3. TEORIŠKAI APROKSIMUOTŲ KREIVIŲ PALYGINIMAS SU EKSPERIMENTINĖMIS

Teorinių skaičiavimų rezultatų palyginimui su eksperimentų duomenimis pasirinktas cikliška silpnėjančio plieno 45 kreivės. Šios medžiagos statinio ir ciklinio deformavimo diagrama santykinėse koordinatėse pateikta 3.1 pav. Plieno 45 ciklinio deformavimo charakteristikos pateiktos 3.1 lentelėje.



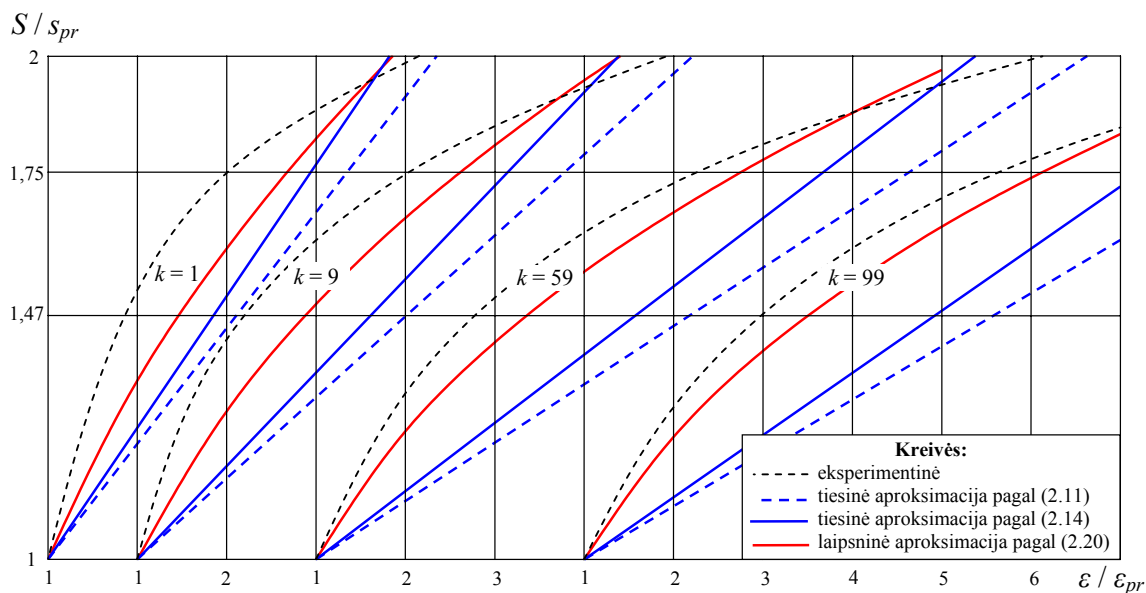
3.1 pav. Plieno 45 ciklinio deformavimo diagrama (parodyti puscikliai: $k = 2, 10, 20, 40, 60, 80, 100$); statinio deformavimo diagrama (tempimas) – $k = 0$ ($\bar{\sigma}_{max} = 1,8$; $\bar{\epsilon}_{max} = 4,05$)

3.1 lentelė

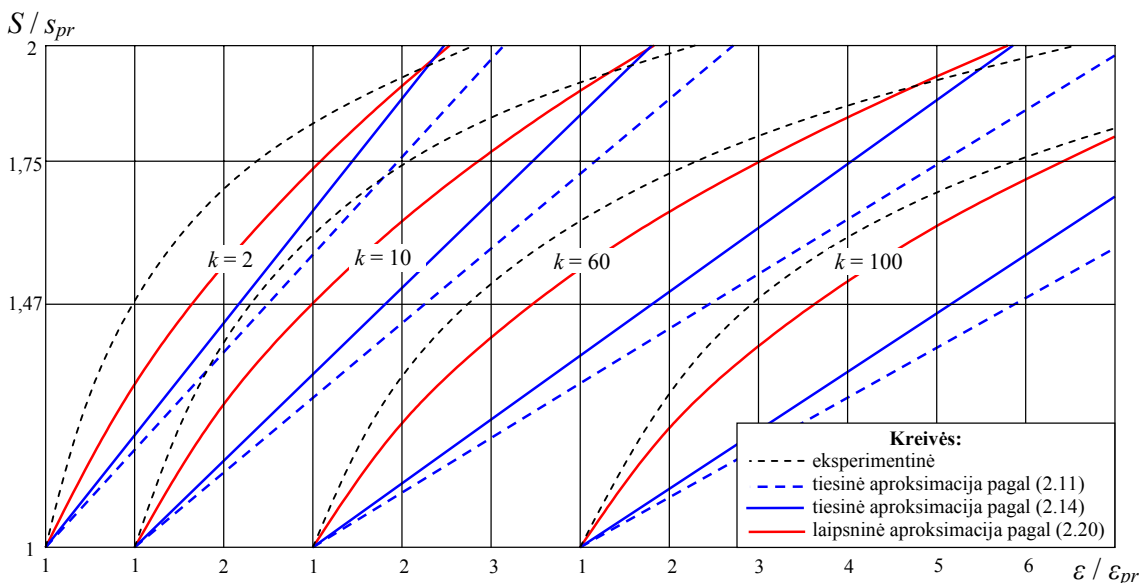
Plieno 45 ciklinio deformavimo charakteristikos

Charakteristika	\bar{s}_{pr}	A_1	A_2	α
Reikšmė	1,8	1,86	2,0	0,2

Grafiškai nustatyta, kad statinės deformavimo kreivės aproksimavimui geriausiai tinka sustiprėjimo modulis $G_T = 0,307$ ir laipsnio rodiklis $m = 0,45$. Eksperimentinės ir schematizuotos ciklinio deformavimo kreivių plastinės, kai naudojama tiesinė ir laipsninė aproksimacija, dalys pateiktos 3.2 pav., a ir b. Šiuose paveiksluose pasirinkti tokie deformavimo puscikliai: neporiniai – 1, 9, 59, 99; poriniai – 2, 10, 60, 100. Sustiprėjimo modulių reikšmės G_k pasirinktuose puscikliuose buvo apskaičiuotos, naudojant (2.11) ir (2.14) lygybes, Gautos reikšmės pateiktos 1 ir 2 priede. Laipsnio rodiklių m_k reikšmės apskaičiuotos (2.20) lygybe, jos pateiktos 3 priede.



a)

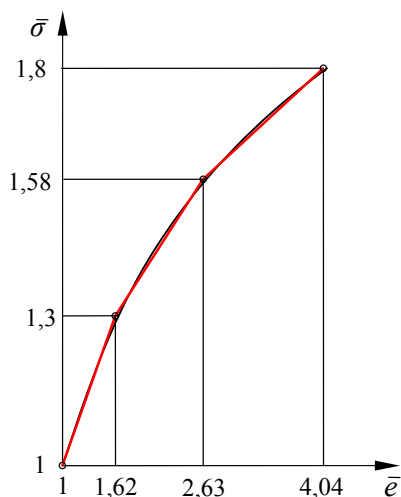


b)

3.2 pav. Tiesinė ir laipsninė aproksimacija: a) – neparinių pusciklių; b) – porinių pusciklių

Plieno 45 ciklinių deformavimo diagramų aproksimavimo laužtinėmis linijomis pagal statinio deformavimo kreivės taškus (žr. 3.3 pav.) grafikai parodyti 3.4 pav.

Statinio deformavimo kreivės plastinė dalis buvo sudalinama į tris segmentus, taip, kad būtų kuo artimesnė eksperimentinei. Ciklinio deformavimo laužtinės linijos nubraižytos, apskaičiavus įtempimus \bar{S}_{nk} ir deformacijas $\bar{\varepsilon}_{nk}$ pagal (2.26) ir (2.29) lygybes. Skaičiavimų duomenys pateikti 4 priede.



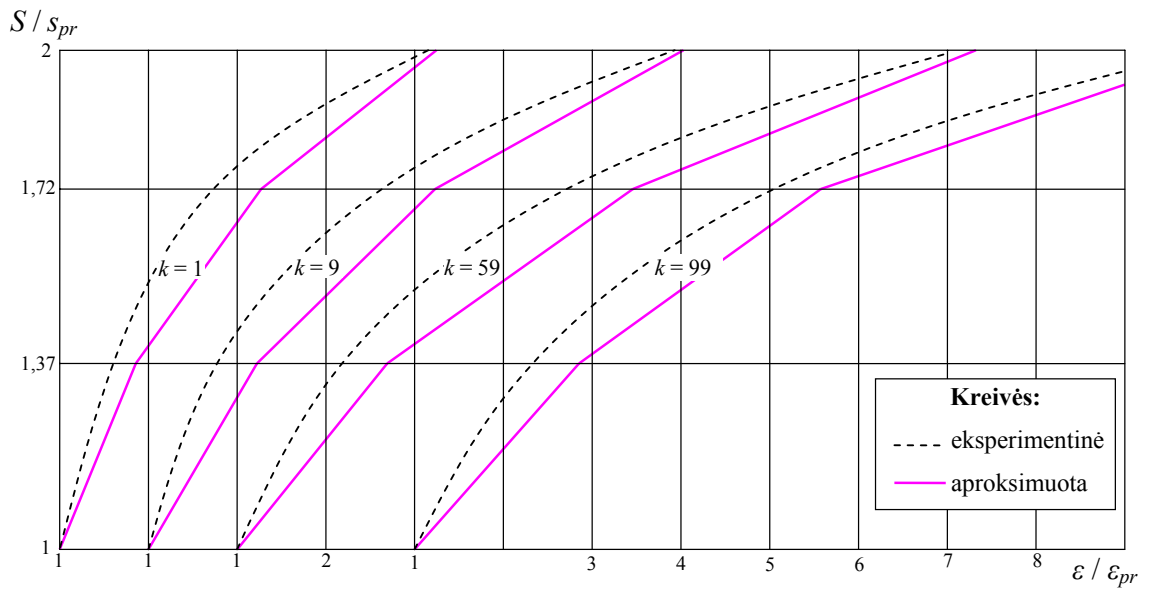
3.3 pav. Plieno 45 statinio deformavimo diagramos plastinės dalies aproksimavimas laužtinėmis linijomis

Taip pat atliktas ir plieno 45 ciklinių deformavimo diagramų aproksimavimas laužtinėmis linijomis pagal pirmojo ir antrojo pusciklio kreives (antruoju būdu). Šiuo atveju, pirmojo ir antrojo pusciklio kreivės plastinė dalis buvo sudalinama į tris segmentus, taip, kad būtų kuo artimesnė eksperimentinei. Kitų pusciklių parametrai apskaičiuoti, taikant (2.32) lygybę. Rezultatai pateikti 3.5 pav. ir 5 priede.

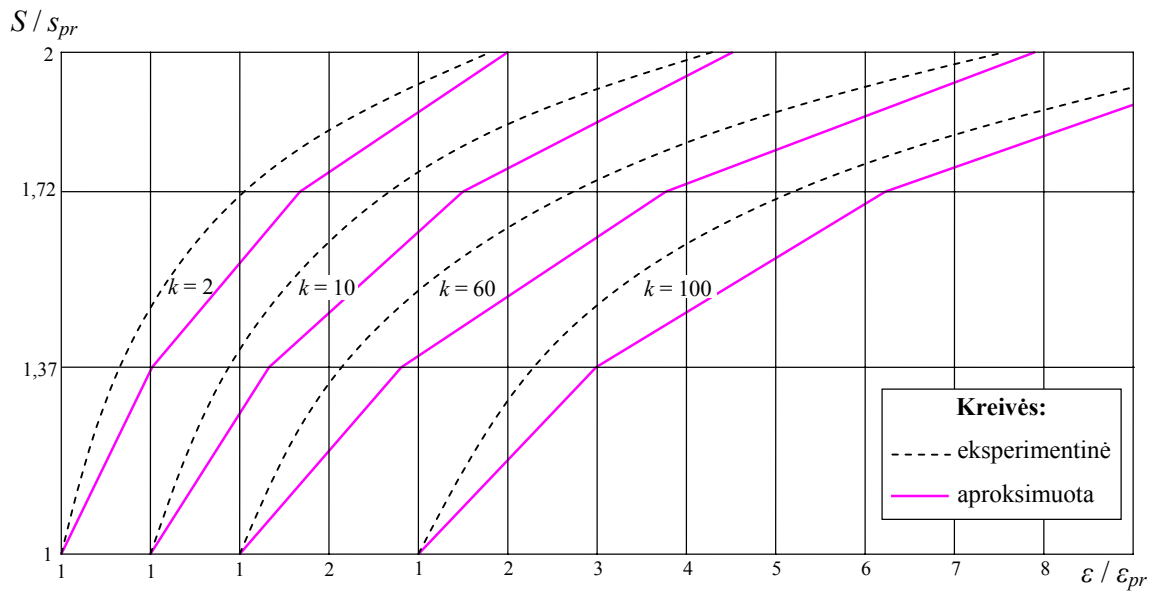
Paklaidų įvertinimui, buvo nustatyti 9-jo pusciklio įtempimų ir deformacijų aproksimuotų diagramų ribojami plotai ir palyginti su to paties pusciklio eksperimentinės kreivės ribojamu plotu.

Net vizualiai matyti, kad didžiausiais analitinių ir eksperimentinių rezultatų nesutapimas gaunamas taikant aproksimavimą tiese, kai naudojama (2.11) lygybė. Šiuo atveju, paklaida sudaro 11,9%. (2.14) lygybės taikymas yra geresnis, gaunama tiesė yra artimesnė eksperimentinei ir paklaida sumažėja iki 7,9%. Laipsninė aproksimacija skaičiavimuose naudoti dar tikslingiau – plotų nesutapimas tesudaro 3,6%.

Praktiškai idealūs rezultatai pasiekiami taikant aproksimavimą laužtine linija pagal pirmojo pusciklio kreivės taškus. Paklaida tesiekia 0,3%. Aproksimuojant laužtine linija pagal statinio deformavimo kreivės taškus, gaunamas 4,4% plotų nesutapimas (panašus, kaip ir aproksimavimo laipsnine funkcija atveju).

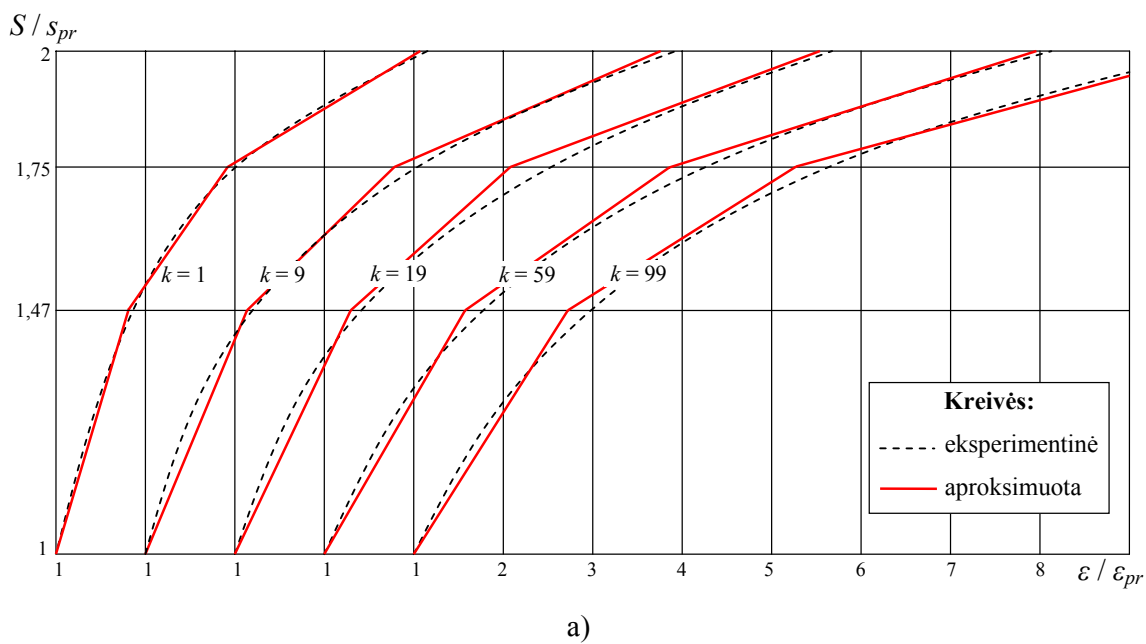


a)

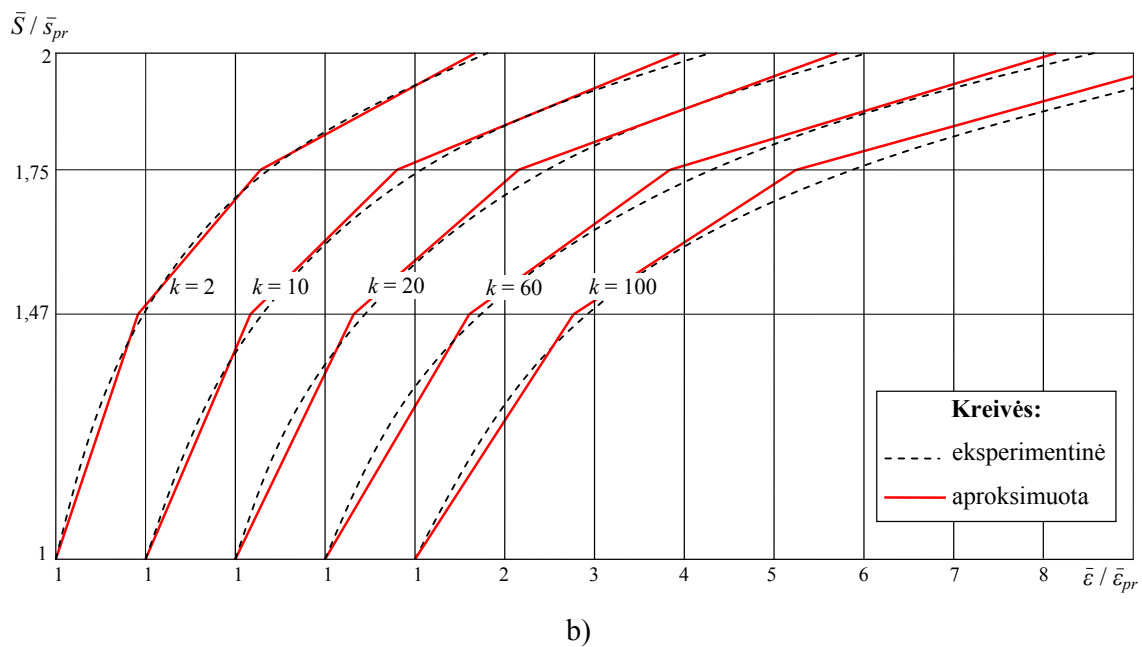


b)

3.4 pav. Aproximacija laužtine linija pagal statinio deformavimo kreivės taškus: a) – porinių pusciklių kreivės; b) – neporinių pusciklių kreivės



a)



b)

3.5 pav. Aproximacija laužtine linija: a) – gauta grafiškai aproksimavus 1-ojo pusciklio kreivę; b) – gauta grafiškai aproksimavus 2-ojo pusciklio kreivę

IŠVADOS

1. Šiame darbe pateiktos metodikos, leidžiančios nustatyti ciklinio deformavimo diagramų plastinės dalies aproksimavimo tiesę, laipsnine funkcija ir laužtine linija parametrus.
2. Nustatyta, kad aproksimavimo parametrai priklauso nuo pasirinkto deformavimo intervalo, kai ciklinio proporcingumo riba nelygi 2, todėl pasiūlyta patikslinta tiesinio aproksimavimo lygtis.
3. Geriausias eksperimentinių ir teorinių rezultatų sutapimas gaunamas, kai laužtine linija grafiškai aproksimuojama pirmojo ir antrojo pusciklio kreivės, o likusių pusciklių įtempimų ir deformacijų reikšmės apskaičiuojamos analitiškai.
4. Analitiniuose skaičiavimuose tikslingiau naudoti aproksimavimą laipsnine funkcija, nei tiese.

LITERATŪRA:

1. M. Daunys. Ciklinis konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas.
2. Bela I. Sandor. Fundamentals of cyclic stress and strain. University of Wisconsin Press, Madison. Wisconsin. 1972. 167 p.
3. M. Daunys, S. Rimovskis. Mažaciklis apvalaus elementų lenkimas. – Tarp. konf. “Mechanika 2001“ pranešim medžiaga. – Kaunas: Technologija, 2001, p. 21-26
4. M. Daunys, S. Rimovskis. Analysis of low-cycle loading characteristics at pure bending. – Mechanika. – Kaunas: Technologija, 2002, Nr. 5 (37), p. 5-9.
5. Thassan, Z. Liu. On the difference of fatigue strengths from rotating bending, four-point bending, cantiliver bending tests. International Journal of Pressure Vessels and Piping, vol.78 (1), 201, pp.19-30.
6. М. Даунис. Исследование диаграмм циклического деформирования при растяжении-сжатии и сдвиге. Автореферат. Каунас. 1964. 18с.
7. Feodosjevas V., Medžiagų atsparumas. – vadovėlis. – Vilnius: „Mokslas“. 1977. 522 psl.
8. Bražėnas A. Tamprumo ir plastiškumo teorijos pagrindai. – vadovėlis. Šiaulių universiteto leidykla, 2003, 194 psl.
9. S. Uzėla. Stačiakampio skerspjūvio elementų tampriai plastinio grynojo lenkimo tyrimas. Magistro tezė. ŠU TF. 2005 m. 46 psl.
10. <http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/IT/NonLinearMat/NonLinearMat.html>

PRIEDAI

1 PRIEDAS

Sustiprėjimo modulio G_k reikšmės, apskaičiuotos pagal 2.11 lygbę

Naudotos konstantos A reikšmė	Parametro G_k reikšmės					
$A = 1,86$	Neporiniai puscikliai					
	Pusciklis	$k = 1$	$k = 9$	$k = 19$	$k = 59$	$k = 99$
	G_k	0,23	0,161	0,42	0,117	0,106
$A = 2,0$	Poriniai puscikliai					
	Pusciklis	$k = 2$	$k = 10$	$k = 20$	$k = 60$	$k = 100$
	G_k	0,194	0,149	0,132	0,109	0,099

2 PRIEDAS

Sustiprėjimo modulio G_k reikšmės, apskaičiuotos pagal 2.14 lygbę

Naudotos konstantos A reikšmė	Parametro G_k reikšmės					
$A = 1,86$	Neporiniai puscikliai					
	Pusciklis	$k = 1$	$k = 9$	$k = 19$	$k = 59$	$k = 99$
	G_k	0,262	0,186	0,165	0,136	0,124
$A = 2,0$	Poriniai puscikliai					
	Pusciklis	$k = 2$	$k = 10$	$k = 20$	$k = 60$	$k = 100$
	G_k	0,223	0,172	0,154	0,117	0,116

3 PRIEDAS

Laipsnio rodiklio m_k reikšmės, apskaičiuotos pagal 2.20 lygbę

Naudotos konstantos A reikšmė	Parametro m_k reikšmės					
$A = 1,86$	Neporiniai puscikliai					
	Pusciklis	$k = 1$	$k = 9$	$k = 19$	$k = 59$	$k = 99$
	m_k	0,438	0,374	0,354	0,327	0,327
$A = 2,0$	Poriniai puscikliai					
	Pusciklis	$k = 2$	$k = 10$	$k = 20$	$k = 60$	$k = 100$
	m_k	0,406	0,361	0,344	0,318	0,307

Aproximacijos laužtine linija (1 būdas) duomenys

n	Grafiskai nustatytos reikšmės		Apskaičiuotos reikšmės										
	Neporiniai puscikliai												
	$k=0$		$k=1$			$k=9$		$k=59$		$k=99$			
	$\bar{\sigma}_n$	\bar{e}_n	\bar{S}_n	\bar{e}_{n1}	G_{kn1}	\bar{e}_{n9}	G_{kn9}	\bar{e}_{n59}	G_{kn59}	\bar{e}_{n99}	G_{kn99}		
1	1,3	1,62	2,47	3,358	0,43	4,016	0,302	4,86	0,219	5,153	0,199		
2	1,58	2,63	3,1	5,897	0,248	7,625	0,174	9,843	0,126	10,61	0,115		
3	1,8	4,04	3,6	9,44	0,141	12,66	0,099	16,8	0,072	18,24	0,065		
			2,513			3,573		4,935		5,41			a'_k
n	Poriniai puscikliai												
	$k=0$		$k=2$			$k=10$		$k=60$		$k=100$			
	$\bar{\sigma}_n$	\bar{e}_n	\bar{S}_n	\bar{e}_{n2}	G_{kn2}	\bar{e}_{n10}	G_{kn10}	\bar{e}_{n60}	G_{kn60}	\bar{e}_{n100}	G_{kn100}		
	1	1,3	1,62	2,47	3,535	0,386	4,197	0,279	5,072	0,205	5,38	0,187	
2	1,58	2,63	3,1	6,362	0,223	8,1	0,161	10,4	0,118	11,22	0,108		
3	1,8	4,04	3,6	10,81	0,112	13,55	0,092	17,84	0,067	19,37	0,061		
			2,8			3,866		5,27		5,78			a'_k

Aproximacijos laužtine linija (2 būdas) duomenys

n	Grafiskai nustatytos reikšmės		Apskaičiuotos reikšmės									
	Neporiniai puscikliai											
	$k=1$		$k=9$			$k=19$		$k=59$		$k=99$		
	\bar{S}_{n1}	\bar{e}_{n1}	\bar{e}_{n9}	G_{kn9}	\bar{e}_{n19}	G_{kn19}	\bar{e}_{n59}	G_{kn59}	\bar{e}_{n99}	G_{kn99}		
1	2,65	3,25	3,86	0,41	4,13	0,36	4,64	0,29	4,908	0,27		
2	3,15	5,25	6,7	0,17	7,35	0,15	8,55	0,13	9,2	0,12		
3	3,6	9,12	12,18	0,08	13,58	0,07	16,12	0,06	17,49	0,05		
1		1,419			1,609		1,96		2,144			a''_k
n	Poriniai puscikliai											
	$k=2$		$k=10$			$k=20$		$k=60$		$k=100$		
	\bar{S}_{n2}	\bar{e}_{n2}	\bar{e}_{n10}	G_{kn10}	\bar{e}_{n20}	G_{kn20}	\bar{e}_{n60}	G_{kn60}	\bar{e}_{n100}	G_{kn100}		
	1	2,65	3,45	3,92	0,4	4,19	0,35	4,7	0,29	4,98	0,27	
2	3,15	5,9	6,85	0,17	7,49	0,15	8,71	0,12	9,38	0,11		
3	3,6	10,19	12,51	0,08	13,88	0,07	16,47	0,06	17,88	0,05		
1,12		1,463			1,65		2,0		2,2			a''_k