

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**DONATAS RADVILAVIČIUS**

**KONSTRUKCINIŲ MEDŽIAGŲ CIKLINIO STABILUMO  
ĮVERTINIMAS**

Magistro darbas

Darbo vadovas:  
Doc. dr. R. Šniuolis

Šiauliai, 2011

Radvilavicius D. Evaluation of cyclic stability for structural materials: Master theses of mechanical engineer / research advisor associate professor dr. R. Sniuolis; Siauliai University, Technological Faculty, Mechanical Engineering Department. – Šiauliai, 2011. – 35 p.

## SUMMARY

It is impossible to improve the quality of the machines, to increase their reliability and lifetime if the working conditions and the properties of the material are not analyzed. We must know the type of the material (hardening, softening or cyclically stable), what is chosen for the constructions in low cycle loading, because strain and stress change during the exploitation and depend on this type. If we know the type of the material, we can determine the possibility of its application in concrete exploitation conditions. Real working conditions of the most constructions are close to loading with limited strain (hard straining), because elastic and plastic deformation is met in the zones of crack and stress concentration, that are surrounded with elastically deformed material.

The low cycle loading curves parameters  $A$ ,  $\alpha$  and  $ST$  are used for the computation of elastic plastic strain curves. These parameters are obtained from the soft low cycle loading results in many cases. The other possible ways for the determination of parameters  $A$ ,  $\alpha$  and  $ST$  are shown in this work.

The most investigated materials had the initial instability in the interval  $k < 10 - 20$ . For more objective evaluation of stress strain curves parameters  $A$ ,  $\alpha$  and  $ST$ , all values of width of hysteresis loop up to  $k - 10$  semicycle were rejected as insignificant in comparison with the rest lifetime in cycles range  $N_f < 10^4$ . The parameter  $a$  for the evaluation of hardening (softening) intensity was determined, when the values of semicycle and  $8k$  were determined from the dependences in coordinates  $\lg S_k - \lg k$ . The stress proportionality limit  $S_{sT}$  was determined from low cycle stress strain curves, when linear approximation was used and  $k = 1; 10; 1000; 2000$  and  $4000$ . Approximate value of parameter  $sT$  was obtained from  $S_k$  and  $s$  interrelation, when the line crosses coordinate  $S_k$  in the lowest position.

Statistically well-founded parameters  $A$ ,  $\alpha$  and  $ST$  were determined for stainless steel at room and elevated temperature by low cycle straining results. Low cycle loading curves parameters  $A$ ,  $\alpha$  and  $ST$  are close to experimental results when they are determined according to the 3-rd method.

## TURINYS

<b>IIVADAS</b> .....	<b>6</b>
<b>I. EKSPERIMENTINIO TYRIMO YPATUMAI ESANT MAŽACIKLIAM APKROVIMUI</b> .....	<b>8</b>
<b>II. CIKLINIŲ DEFORMAVIMO KREIVĖS PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖ NUO MECHANINIŲ CHARAKTERISTIKŲ</b> .....	<b>11</b>
2.1. Mažaciklis nuovargis.....	11
2.2. Pagrindinių mechaninių charakteristikų nustatymas.....	12
2.3. Mažaciklio deformavimo charakteristikų priklausomybė nuo apkrovimo tipo.....	12
2.4. Ciklinių deformavimo charakteristikų nustatymas .....	14
<b>III. ATSPARUMO MAŽACIKLIAM DEFORMAVIMUI TYRIMO REZULTATAI</b> .....	<b>22</b>
3.1. Histerezės kilpos pločio priklausomybės tyrimas nuo pusciklių skaičiaus.....	22
3.1.1. Pirmojo pusciklio histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo pradinės deformacijos...24	
3.1.2. Ciklinį stabilumą įvertinančio parametro priklausomybė nuo pradinės deformacijos .....	26
3.1.3. ciklinio proporcingumo ribos nustatymas .....	27
<b>IŠVADOS</b> .....	<b>29</b>
<b>LITERATŪRA</b> .....	<b>30</b>
<b>PRIEDAI</b> .....	<b>31</b>
1 PRIEDAS.....	32
2 PRIEDAS.....	34

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė.....	16
2.2 lentelė.....	17
2.3 lentelė.....	18
2.4 lentelė.....	18
3.1 lentelė.....	25

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

<b>1.1 pav.</b> Suvirintų bandinių ruošinių išplovimo schemas .....	10
<b>2.1 pav.</b> Mažaciklio apkrovimo diagrama.....	11
<b>2.2 pav.</b> Minkšto mažaciklio apkrovimo schemas.....	13
<b>2.3 pav.</b> Mažaciklio standaus deformavimo diagramos esant simetriniam ciklui .....	14
<b>2.4 pav.</b> Apibendrintos k-ojo pusciklio ciklinio deformavimo diagramos sudarymo schema.....	15
<b>2.5 pav.</b> Plienų ir suvirintųjų siūlių medžiagų ciklinių savybių priklausomybė nuo mechaninių charakteristikų aukštesnėje temperatūroje.....	19
<b>2.6 pav.</b> Legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų ciklinių savybių ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybė kambario temperatūroje.....	20
<b>2.7 pav.</b> Legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų ciklinių savybių ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybė aukštesnėje temperatūroje .....	21
<b>3.1 pav.</b> Histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo pusciklių skaičiaus silpnėjančiai medžiagai (plienas 15X2MFAA) .....	22
<b>3.2 pav.</b> Histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo pusciklių skaičiaus stiprėjančiai medžiagai (plienas 22KE).....	23
<b>3.3 pav.</b> Histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo pusciklių skaičiaus stabiliai medžiagai (plienas 22K po grūdinimo).....	23
<b>3.4 pav.</b> Pirmojojo pusciklio histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo pradinės deformacijos plienui C45 .....	24
<b>3.5 pav.</b> Parametro $\alpha$ priklausomybė nuo pradinės deformacijos plienui 22K $\Theta$ .....	26
<b>3.6 pav.</b> Parametro $\bar{s}_{Tk}$ nustatymas iš ciklinio deformavimo diagramos plienui 15_8K kambario temperatūroje.....	27

## IVADAS

**Darbo aktualumas.** Mus supanti konstrukcijų įvairovė yra žmogaus inžinerinės veiklos rezultatas (pastatai, mašinos, įvairūs mechanizmai, detalės); vienu konstrukcija sudėtinga (televizijos bokštas, įvairių tipų kranai, pastatų konstrukcijos), kitų konstrukcija – vienas elementas (vinis, lynas ir kt.). Visas šias konstrukcijas veikia aplinka, nuo kurios mechaninio poveikio jie deformuojasi, t.y. keičia savo matmenis ir formą. Per didelis mechaninis poveikis gali sukelti nepageidautinas konstrukcijų deformacijas arba, dar blogiau, – juos suardyti. Kad to neįvyktų, inžinierius, kurdamas pastatų ar mašinų konstrukcijas, turi remtis ne nuojauta, bet tų konstrukcijų parametrais, cheminėmis bei mechaninėmis savybėmis. Jis turi mokėti įvertinti aplinkos poveikį konstrukcijai, gerai pažinti konstrukcines medžiagas, naudotis praktikos patikrintais metodais. Tada jo sukurtos konstrukcijos nesuirs ir bus stabilios.

Kurti patikimas konstrukcijas, t.y. tokias konstrukcijas, kurios nustatytą laiką, nepažeisdamos eksploatacijos reikalavimų, vykdytų savo funkciją ir būtų stabilios, yra vienas iš svarbiausių inžinieriaus uždavinių.

Dažniausiai pasitaikantis apkrovos tipas, eksploatuojant konstrukcijas, mechanizmus ir mašinas, yra ciklinė apkrova, kuriai veikiant formuojasi nestabilumo židiniai. Ji charakteringa įvairių tipų varikliams, transportui ir kitiems įrenginiams. Konstrukciniai medžiagai dėl jo nestabilumo suirus gali įvykti avarijos su sunkiai prognozuojamomis pasekmėmis. 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.

Prenkant 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.

**Tyrimo tikslas.** Konstrukcinių medžiagų ciklinio stabilumo įvertinimas.

**Darbo uždaviniai.** Remiantis mažaciklio nuovargio tiriamojo darbo rezultatais, pagal standaus apkrovimo rezultatus kambario ir aukštesnėje temperatūroje įvertinti plieno ir jo suvirinimo medžiagų ciklinio deformavimo diagramos parametrus.

**Tyrimo metodai.** Magistrinio darbo tyrimai paremti eksperimentiniais, analitiniais ir grafiniais metodais. Plienų ciklinio deformavimo diagramos parametrus kambario ir aukštesnėje temperatūroje analizuoti ir patikslinti, buvo panaudotas „Microcal“ kompanijos paketas „Origin 4.1“ ir sudaryti reikiami grafikai.

**Mokslinio darbo naujumas.** Išanalizavus 47 įvairių tipų plienų mechanines ir ciklines deformavimo charakteristikas kambario ir aukštesnėje temperatūroje, nustatoma parametro  $\alpha$  priklausomybė stabilioms ir nestabilioms medžiagoms. Šiuo atveju įvertinamas konstrukcinių medžiagų stabilumas. Parametru  $\alpha$  mažėjant medžiagos stiprėja, didėjant  $\alpha$  konstrukcinės medžiagos silpnėja, esant pastoviam  $\alpha$  išlieka medžiagos stabilios.

**Praktinis pritaikymas.** Šio darbo rezultatai gali būti panaudoti energetikos pramonės, sunkiai apkrautų konstrukcijų ilgaamžiškumui ir patikimumui nustatyti bei įvertinti.

## I. EKSPERIMENTINIO TYRIMO YPATUMAI ESANT MAŽACIKLIAM APKROVIMUI

**Apkrovimo tipo parinkimas.** Esant cikliniam apkrovimui tamprumo ribose, apkrovimas pagal apribotas deformacijas tapatus apkrovimui pagal apribotus įtempimus. Tačiau, peržengus medžiagos proporcingumo ribą, šie du apkrovimo tipai skiriasi. Apribojus jėgą ar įtempimą turėsime minkštą įtempimą. Apkrovimas su apribotomis deformacijomis - standus apkrovimas.

Naudojant standų apkrovimą, cikliškai stiprėjančioms ir silpnėjančioms medžiagoms pastebimas įtempimų, tampriųjų ir plastinių deformacijų nestacionarumas kiekviename apkrovimo cikle, t.y. stiprėjančioms medžiagoms įtempimai didėja ir histerezės kilpos plotis siaurėja; silpnėjančioms medžiagoms įtempimai mažėja ir histerezės kilpa plėtėja. Stabilioms medžiagoms įtempimai ir deformacijos yra pastovios.

Mašinių detalėse, konstrukcijose dažniausiai sutinkamas standus apkrovimas (ypač įtempimų koncentracijos, plyšio zonose) todėl pasirinktas standus apkrovimas, kaip artimiausias realioms konstrukcijų ir sujungimų darbo sąlygoms esant mažacikliam deformavimui.

Minkštas apkrovimas turi didelę pažintinę reikšmę, nes esant minkštam apkrovimui deformacijų augimas neribotas ir čia išryškėja medžiagos ciklinės savybės - stiprėjimas, silpnėjimas, stabilizacija bei polinkis vienpusių plastinių deformacijų kaupimui. Todėl ciklinio deformavimo diagramos parametrų nustatymo tikslu, o taip pat detalesniam medžiagų tyrimui, minkštas apkrovimas naudojamas dažnai.

**Ciklo tipo parinkimas.** Eksperimentai atlikti esant simetriniam minkštam apkrovimo ciklui, kadangi šis apkrovimo ciklas yra universaliausias ir tiksliausiai išryškina medžiagos savybes esant tampriai plastiniam cikliniam deformavimui ir jo metu beveik vienodai pasireiškia tempimo ir gniuždymo deformacijos. Be to, panaudojus žinomas lygtis, nesunku standaus simetrinio apkrovimo rezultatus pritaikyti ir asimetriniam apkrovimui.

**Apkrovimo būdo parinkimas.** Esant cikliniam deformavimui bandiniai dažniausiai apkraunami tempimu gniuždymu, sukimu ir lenkimu. Šie trys apkrovimo būdai naudojami atliekant ir mažaciklius bandymus, tačiau apkrovimas tempimu gniuždymu skiriasi nuo kitų apkrovimo būdų deformacijos vienalytiškumu visame geometriškai vienalyčio kūno (bandinio ar detalės) darbiniame skerspjūvyje. Be to, nustatant medžiagų mechanines charakteristikas, dauguma statinio ir ciklinio apkrovimo rezultatų gauta atliekant tempimą gniuždymą. Šis apkrovimo būdas žymiai palengvina eksperimentinių duomenų



apdorojimą bei jų palyginimą su kitų darbų rezultatais ir dažniausiai sutinkamas atliekant mažaciklius bandymus.

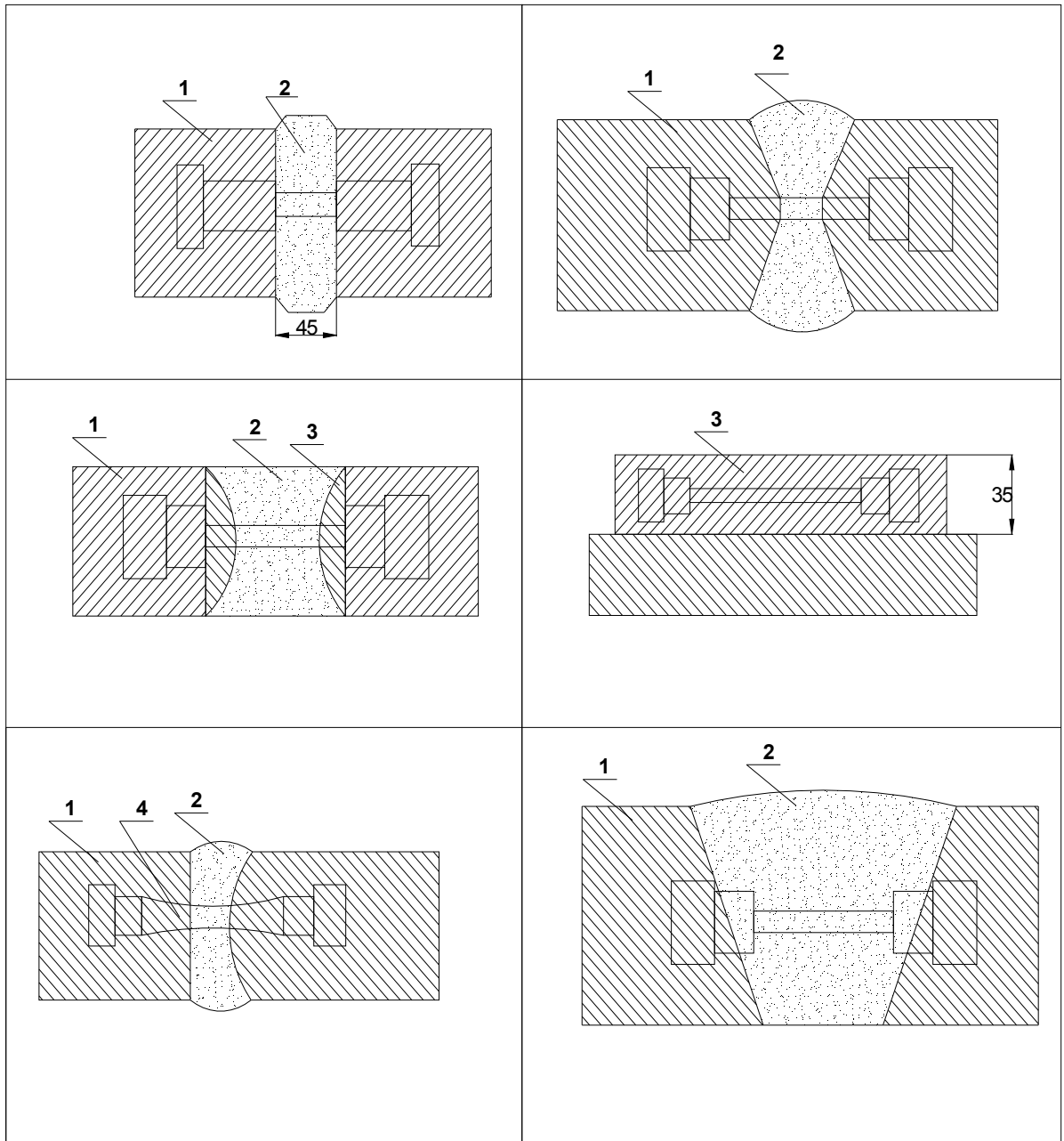
Tačiau tempimu gniuždymu turi ir trūkumų: sunkesnis bandinio nustatymas ir tvirtinimas, lyginant su cikliniu sukimu arba lenkimu; prie žymių gniuždymo deformacijų bandiniai praranda stabilumą, todėl keliami aukšti reikalavimai bandinio centravimo tikslumui (siekiant išvengti lenkimo bandymo mašinose) ir bandinių apdirbimo technologijai; matuojant išilginę deformaciją būtinas optimalus bandinio formos ir matmenų parinkimas.

Nežiūrint minėtų trūkumų, čia naudojami rezultatai gauti tempimu gniuždymu, užtikrinant vienalytį deformavimą  $N_f = 10^2 \div 10^4$  ciklų intervale.

Norint supaprastinti analitines išraiškas ir grafinį sudarymą atliekant mažaciklius skaičiavimus, tampriai plastinės srities priklausomybėse naudoti santykiniai vienetai:

$$\bar{e}_0 = e_0 / e_{pr}; \bar{\delta}_0 = \delta_0 / \delta_{pr}; \bar{\delta} = \delta / e_{pr}; \bar{S}_k = S_k / \delta_{pr} \text{ ir t.t.}$$

Panaudotų medžiagų cheminė sudėtis, terminio apdirbimo režimai ir bandinių ruošinių išpjovimo schemos, atliekant bandymus, pateikti kitų autorių darbuose. Principinės suvirintų bandinių ruošinių schemos parodytos 1.1 paveiksle.

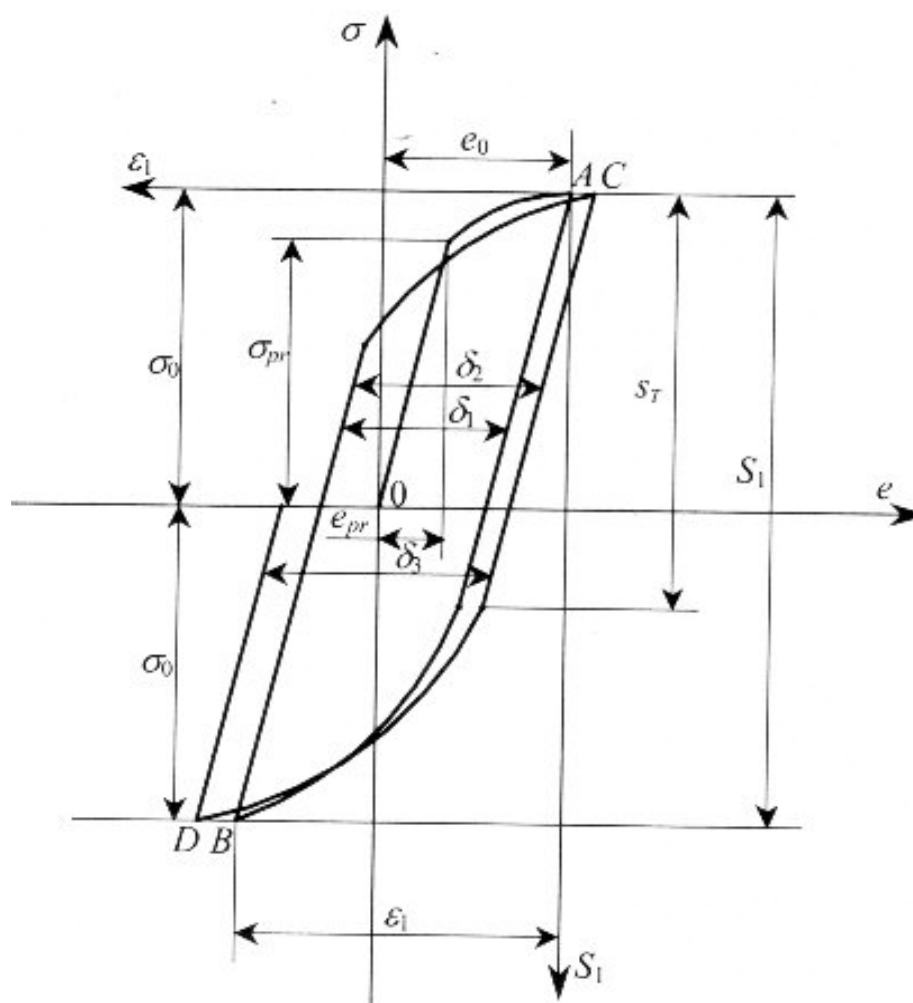


**1.1 pav.** Suvirintų bandinių ruošinių išpjovimo schemas  
 1 – pagrindinis metalas; 2 – siūlės metalas; 3 – aplydytas metalas; 4 – terminio poveikio zona.

## II. CIKLINIŲ DEFORMAVIMO KREIVĖS PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖ NUO MECHANINIŲ CHARAKTERISTIŲ

### 2.1. Mažaciklis nuovargis

Kai cikliška kintantys įtempiai viršija medžiagos proporcingumo ribą, prasideda tampriai plastinis deformavimas, susidaro plastinės deformacijos histerezės kilpa ir medžiagos ilgaamžiškumas sumažėja iki tūkstančių arba šimtų ciklų. Tipiškas mažaciklio nuovargio intervalas - nuo kelių iki kelių dešimčių tūkstančių ciklų.



2.1 pav. Mažaciklio apkrovimo diagrama

2.1 pav. parodyti keturi mažaciklio simetrinio apkrovimo puscikliai, esant apribotiems įtempimams. Pradinio (nulinio) pusciklio diagrama pavaizduota  $\sigma - \epsilon$  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, koordinatė  $S - \varepsilon$  mastelis yra dvigubai didesnis už  $\sigma - \varepsilon$ . Nulinį pusciklį charakterizuoja pradinis įtempimas  $\sigma_0$  ir jį atitinkanti pradinė deformacija  $e_0$ , medžiagos proporcingumo ribos įtempimas  $\sigma_{pr}$  bei deformacija  $e_{pr}$ . Kiekvieno tolimesnio pusciklio diagramą charakterizuoja įtempimas  $S$ , jį atitinkanti deformacija  $\varepsilon$ , ciklinė proporcingumo riba  $S_{pr}$  bei pusciklio histerezio kilpos plotis  $\sigma_k$ . Indeksas  $k$  nurodo pusciklio numerį (skaičių).

## 2.2. Pagrindinių mechaninių charakteristikų nustatymas

Pagrindinės mechaninės charakteristikos  $e_{pr}$ ,  $\sigma_{pr}$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$ ,  $S_k$  ir  $\psi$  buvo nustatytos KTU laboratorijoje iš tempimo bandymų rezultatų kambario ir aukštesnėje temperatūroje. Charakteristikos  $e_{pr}$ ,  $\sigma_{pr}$ ,  $\sigma_y$  taip pat nustatytos atlikus ciklinį deformavimą, t.y. pagal nulinio pusciklio diagramas, panaudojus didelį bandinių skaičių, nes dėl nepakankamo kai kurių medžiagų bandinių skaičiaus mažaciklio nuovargio kreivėms sudaryti, tempimo bandymai nebuvo atlikti.

Santykinis skerspjūvio susitraukimas  $\psi$  ir tikrieji suirimo įtempimai  $S_k$  nustatyti apskaičiavus kakliuko skerspjūvio plotą suirimo momentu.

2.3-2.9 lentelėse pateiktos mechaninės charakteristikos  $\sigma_u$ ,  $S_k$  ir  $\psi$  kambario ir aukštesnėje temperatūroje dažniausiai yra trijų tempimo bandymų vidurkiai.

## 2.3. Mažaciklio deformavimo charakteristikų priklausomybė nuo apkrovimo tipo

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, gembinis lenkimas, sukimas ir kt.

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 standžiuoju.

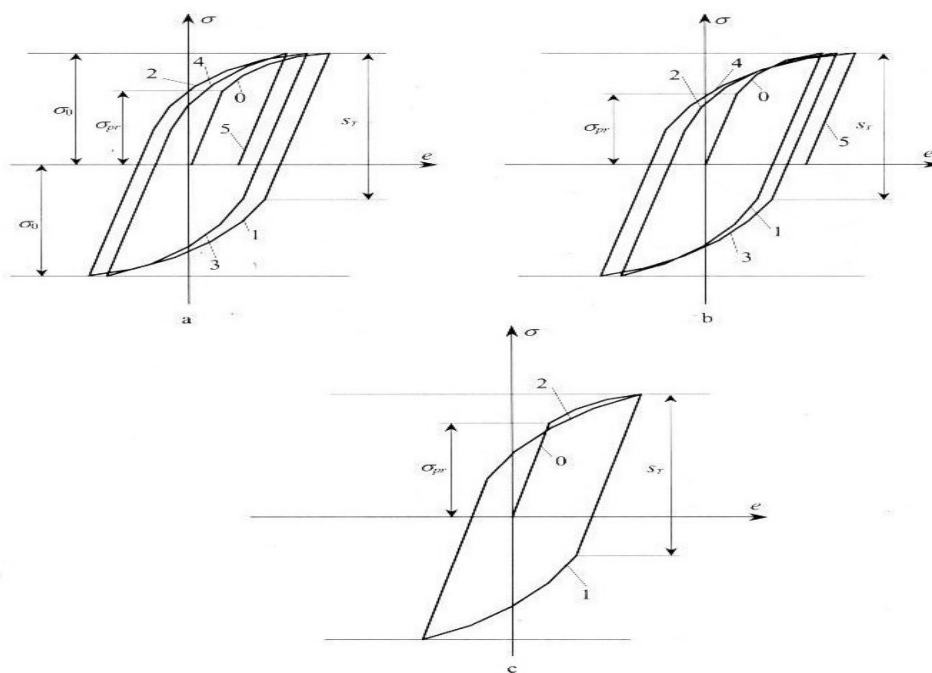
Buvo nustatyta, kad esant mažacikliam deformavimui medžiagos elgiasi trejopai: stiprėja, silpnėja ir būna stabilios (žr. 2.2 pav.). Nepriklausomai nuo apkrovimo tipo ar įtempimų lygio, cikliškai stabilioms medžiagoms įtempimų ir deformacijų kreivė, mažaciklio deformavimo metu, nekinta. Cikliškai stiprėjančioms medžiagoms, esant minkštam apkrovimui, kilpos plotis  $\delta$ , didėjant

apkrovimo pusciklių skaičiui  $k$ , mažėja (žr. 2.2 pav., a), o silpnėjančioms medžiagoms atvirkščiai  $\delta$  didėjant pusciklių skaičiui  $k$  - didėja (žr. 2.2 pav., b). Cikliškai stabilioms medžiagoms  $\delta$  nepriklausomai nuo pusciklių skaičiaus, t. y. išlieka pastovus (žr. 2.2 pav., c).

Esant standžiajam apkrovimui, deformacijos yra suvaržytos, todėl kinta įtempimai. Kaip ir esant minkštam apkrovimui, stabilių medžiagų deformavimo diagramos ir kilpos plotis išlieka pastovus visą deformavimo laikotarpį (žr. 2.3 pav., a). Stiprėjančioms medžiagoms didėjant pusciklių skaičiui  $k$ , cikliniai įtempimai  $s$  didėja (2.3 pav., b), silpnėjančioms medžiagoms - atvirkščiai  $\delta$  mažėja (2.3 pav., c).

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

Bandymo metu nustatyta, kad dažniausiai stiprėjančios medžiagos tai aliuminio lydiniai, minkšti plienai. Vidutinio stiprumo atkaitinti arba normalizuoti plienai yra stabilūs arba stiprėja. Grūdinti plienai beveik visada silpnėja.

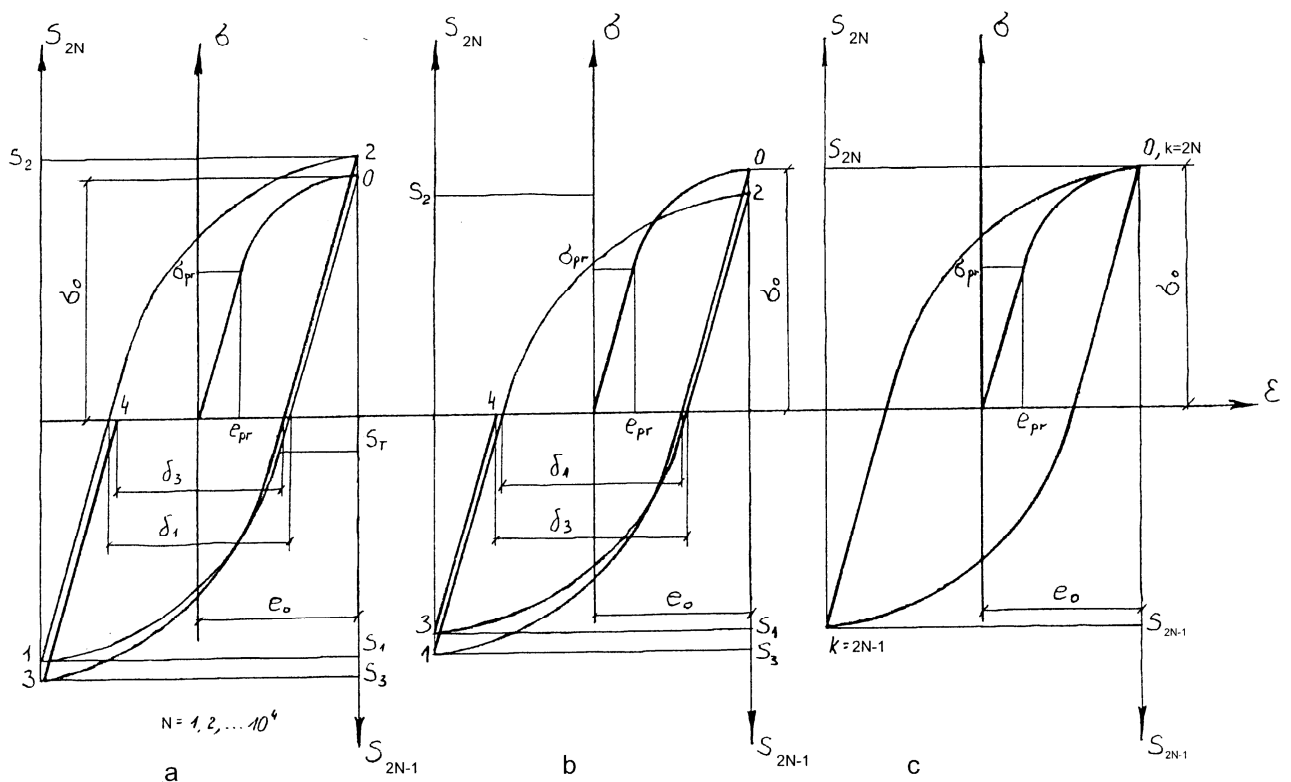


**2.2 pav.** Minkšto mažaciklio apkrovimo schemas

a - cikliškai stabili medžiaga; b - cikliškai stiprėjanti medžiaga; c - cikliškai silpnėjanti medžiaga

## 2.4. Ciklinių deformavimo charakteristikų nustatymas

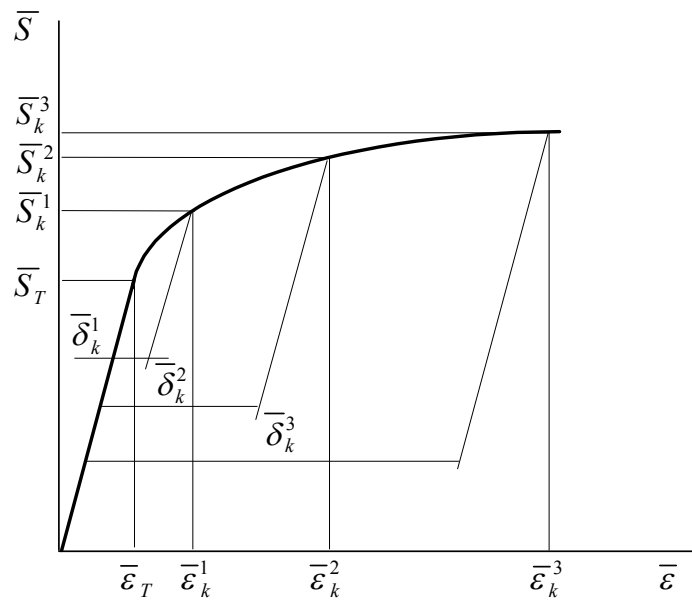
Eksperimentiškai nustatyta, kad konstrukcinės medžiagos priklausomai nuo jų cheminės sudėties ir struktūrinio mechaninio būvio pagal pasipriešinimą tampriai plastiniam cikliniam deformavimui skirstomos į cikliškai stiprėjančias, silpnėjančias ir cikliškai stabilias, taip pat į cikliškai izotropines ir anizotropines.



**2.3 pav.** Mažaciklio standaus deformavimo diagramos esant simetriniam ciklui  
 a – stiprėjančių medžiagų; b – silpnėjančių medžiagų; c – stabilių medžiagų

Medžiagos kitimo pobūdžiui, esant cikliniam deformavimui, turi įtakos jos struktūrinis mechaninis būvis, keičiamas terminiu apdirbimu arba plastine deformacija. Iš literatūros šaltinių žinoma, kad grūdinti, sukietinti (nestabilus būvis) plienai ciklinio deformavimo metu beveik visi linkę silpnėti, o atkaitinti, normalizuoti (stabilus būvis) minkšti plienai ( $HB=180\dots220$ ) yra stabilūs arba stiprėja. Matyt, tai lemia plienų kristalinės sandaros ypatumai.

Pasipriešinimas deformavimui kiekviename pusciklyje apibūdinamas apibendrinta ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagrama. Diagrama sudaroma santykinėse koordinatėse  $\bar{S} - \bar{\varepsilon}$ , kurių pradžia kiekvieną kartą sutapdinama su to paties pusciklio deformavimo diagramos nukrovimo pradžios tašku (2.4 pav.). Šie  $k$ -ojo apkrovimo pusciklio deformavimo diagramos nukrovimo pradžios taškai nepriklausomai nuo pradinės deformacijos  $\bar{\varepsilon}_0$  sudaro bendrą kreivę, kuri vadinama apibendrinta ciklinio tampriai plastinio deformavimo diagrama.



**2.4 pav.** Apibendrintos  $k$ -ojo pusciklio ciklinio deformavimo diagramos sudarymo schema

Analitiškai priklausomybė tarp įtempimų ir deformacijų apibendrintai ciklinio deformavimo diagramai, kai  $\bar{S}_k > \bar{S}_{Tk}$  išreiškiama lygtimi

$$\bar{\varepsilon}_k = \bar{S}_k + \bar{\delta}_k, \quad (2.1)$$

čia  $\bar{\delta}_k$  -  $k$ -ojo pusciklio histerezės kilpos plotis (deformacijos plastinė deformacija);  $\bar{S}_{Tk}$  - ciklinė proporcingumo riba koordinatėse  $\bar{S} - \bar{\varepsilon}$ ;  $k$  - pusciklio numeris,  $\bar{S}_k$  -  $k$ -tojo pusciklio cikliniai įtempimai.

Mažaciklio deformavimo  $k$ -tojo pusciklio diagrama aprašoma lygybe

$$\bar{S}_k = \bar{\varepsilon} - A_1 \left( \bar{\varepsilon}_0 - \frac{\bar{S}_{Tk}}{2} \right) k^a \quad (2.2)$$

Čia  $\varepsilon$  - standaus apkrovimo ciklinė deformacija ( esant simetriniam ciklui  $\bar{\varepsilon} = 2\bar{e}_0$ );  $\bar{e}_0$  - pradinio (nulinio) pusciklio deformacija;  $\alpha$  - medžiagos stiprėjimo (silpnėjimo) intensyvumą įvertinantis parametras;  $A_1$  - plastinę deformaciją apibūdinantis parametras.

Siekiant supaprastinti skaičiavimo rezultatus, visam deformavimo diapazonui panaudota parametro  $A_1$  reikšmė, kuri yra tiesės krypties kosinusas (2.2 pav.).

Ciklinė proporcingumo riba  $\bar{s}_{Tk}$  priklauso nuo medžiagos tipo ir histerezės kilpos pokyčio pusciklyje:  $\bar{s}_{Tk}$  didėja cikliškai stiprėjančioms medžiagoms, mažėja cikliškai silpnėjančioms ir nesikeičia cikliškai stabilioms medžiagoms. Analitiškai aprašant ciklinio deformavimo diagramą, skaičiavimams supaprastinti ciklinė proporcingumo riba  $\bar{S}_{Tk} = \bar{S}_1 = \bar{S}_T$ , kadangi  $\bar{s}_{Tk}$  pokytis nuo  $k$  nedidelis.

2.1 lentelė

### Ciklinio deformavimo charakteristikų nustatymo metodai

Metodai	$\bar{\delta}_1$ iš grafiko $\lg \bar{\delta}_k - \lg k$	$\alpha = (\lg \bar{\delta}_k - \lg \bar{\delta}_1) / \lg k$	$\bar{S}_T, A_1$
1.	atmetus $k = 1-9$		$\bar{S}_T$ iš grafiko $\bar{\delta}_1 - \bar{e}_0$ $A_1$ iš grafiko $\bar{\delta}_1 - \bar{e}_0$
2.	atmetus $k = 1-9$		$\bar{S}_T = 2 - 0,8(\sigma_u / \sigma_y)\psi$ $A_1 = \bar{\delta}_1 / (\bar{e}_u - \bar{S}_T / 2)$
3.	atmetus $k = 1-9$		$\bar{S}_T$ iš diagramos $\bar{S} - \bar{\varepsilon}$ $A_1 = \bar{\delta}_1 / (\bar{e}_u - \bar{S}_T / 2)$

Esant standžiam apkrovimui, medžiagos elgsena nusakoma įtempimų amplitudės  $\bar{S}_k$  ir tampriai plastinės histerezės kilpos pločio  $\bar{\delta}_k$  priklausomybe nuo pusciklių skaičiaus  $k$ . Nustatyta, kad tampriai plastinės histerezės kilpos pločio  $\bar{\delta}_k$  priklausomybė nuo pusciklių skaičiaus  $k$  dvigubose logaritminėse koordinatėse sudaro tiesę. Parametras  $\alpha$  buvo apskaičiuotas atmetus histerezės kilpos pločio  $\bar{\delta}_k$  reikšmes puscikliuose  $k = 1-9$ .



## 2.5 Plienų ir suvirintųjų siūlių medžiagų ciklinių savybių priklausomybė nuo mechaninių charakteristikų

Parenkant medžiagą konstrukcijoms, dirbančioms mažaciklio apkrovimo sąlygomis, būtina žinoti jos ciklines savybes (stiprėjanti, silpnėjanti ar cikliškai stabili), kadangi deformacijų ir įtempimų kitimas eksploatacijos metu priklauso nuo šių medžiagos savybių. Ir tik žinant medžiagos savybes, galima pasakyti apie jos pritaikymo galimybę duotose darbo sąlygose.

Didelę praktinę reikšmę turi medžiagų ciklinių savybių nustatymas neatliekant mažaciklio nuovargio bandymų pagal medžiagos kietumą, jos mikro arba makrostruktūrą, arba mechanines charakteristikas.

R. Landgrafo darbe pažymima, kad medžiagos cikliškai stiprėja esant  $\sigma_u / \sigma_y > 1,4$ , cikliškai silpnėja esant  $\sigma_u / \sigma_y < 1,2$  ir yra cikliškai stabilios, kai  $1,2 < \sigma_u / \sigma_y < 1,4$ :

2.2 lentelė

<b>R. Landgraf</b>	$\sigma_u / \sigma_y > 1,4$	medžiagos cikliškai stiprėja
	$\sigma_u / \sigma_y < 1,2$	silpnėja
	$1,2 < \sigma_u / \sigma_y < 1,4$	stabilios
Patikrinus 35 medžiagas (plienus, aliuminio ir titano lydinius), šios išvados pasitvirtino 26 medžiagoms		

A. Gusenkovo ir A. Romanovo darbe buvo patikrintos 48 medžiagos ir buvo nustatyta, kad santykis  $\sigma_u / \sigma_y$  nėra pagrindinis faktorius, nusakantis medžiagų ciklines savybes. Čia parodyta, kad ciklines savybes tiksliau nustato tolydinės tempimo deformacijos  $e_u$  su statinio suirimo deformacija  $e_y$ , t.y.

$e_u / e_y$ . Tačiau A. Gusenkovo ir A. Romanovo pasiūlytoje priklausomybėje norint nustatyti tolydinę deformaciją  $e_u$ , reikia atlikti sudėtingus tempimo bandymus, kurie yra prieinami tik aukšto mokslinio ir techninio lygio laboratorijoms. Dėl šios priežasties žymiai perspektyvesnis ciklinių charakteristikų nustatymas naudojant mechanines charakteristikas  $\delta_{pr}, \delta_y, \delta_u, S_k, \psi$ , gautas standartiniu tempimo bandymu:

2.3 lentelė

<b>A. Gusenkov</b> <b>A. Romanov</b>	$\sigma_u / \sigma_y$	nėra pagrindinis faktorius, nusakantis medžiagų ciklines savybes
	$e_u / e_y > 0,6$	stiprėja
	$e_u / e_y < 0,45$	silpnėja
	$0,45 < e_u / e_y < 0,6$	stabilios
	$e_u$ – tolydinė tempimo deformacija; $e_f$ – statinio suirimo deformacija	
Patikrinus 48 medžiagas (44 plienai ir 4 aliuminio lydiniai), šios išvados pasitvirtino 25 medžiagoms		

M. Daunio ir kt. darbuose buvo išskirtos keturios ciklinių savybių išdėstymo sritys ištyrus 106 medžiagas (plienus ir jų suvirinimo siūlių medžiagas) (2.5 pav.):

1) kai  $\sigma_u / \sigma_y > 1,8$ , plienai, nepriklausomai nuo  $\psi$ , stiprėja;

2) kai  $\sigma_u / \sigma_y < 1,4$  ir  $\psi < 0,72$ , plienai silpnėja;

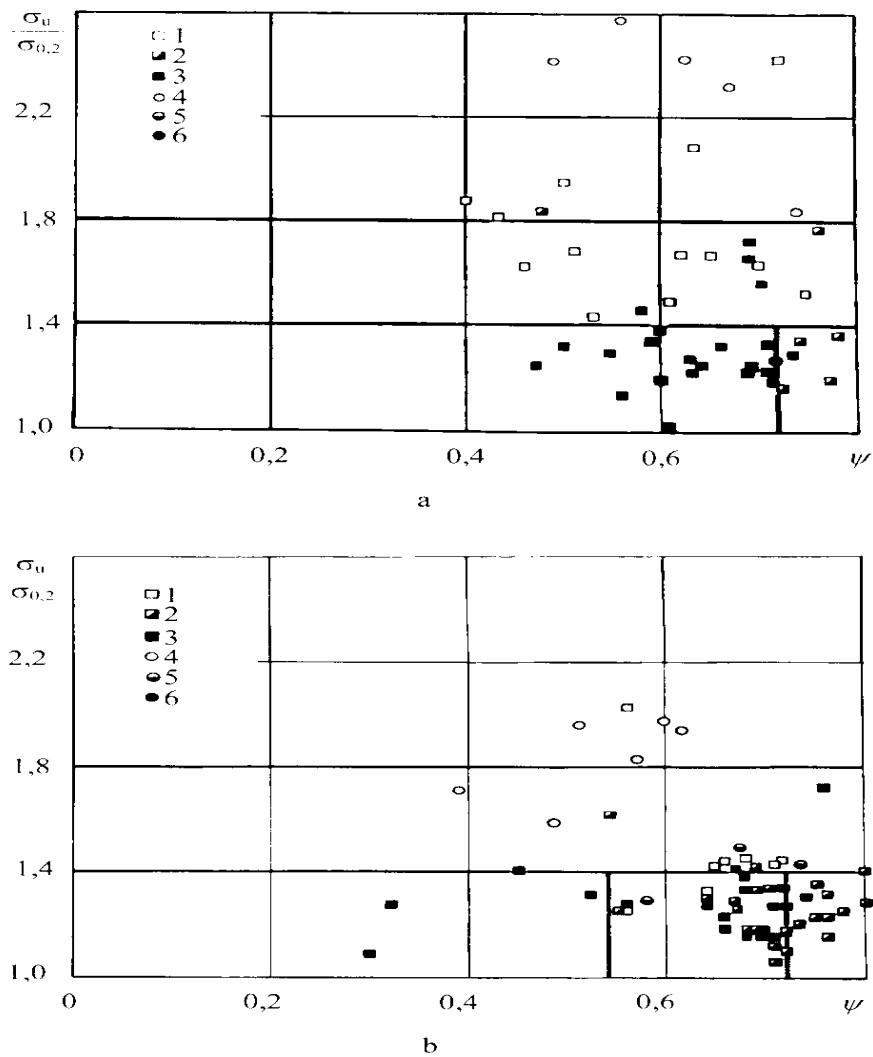
3) kai  $\sigma_u / \sigma_y < 1,4$  ir  $\psi > 0,72$ , visos medžiagos yra stabilios;

4) kai  $1,4 < \sigma_u / \sigma_y < 1,8$ , nepriklausomai nuo  $\psi$ , turime pereinamąją sritį, kuriai charakteringas nedidelis stiprėjimas, nedidelis silpnėjimas arba stabilizacija.

Suvirinimo siūlių medžiagoms buvo išskirta papildoma pereinamoji sritis tarp stabilizacijos ir silpnėjimo, kai  $\sigma_u / \sigma_y < 1,4$  ir  $0,56 < \psi < 0,72$ .

2.4 lentelė

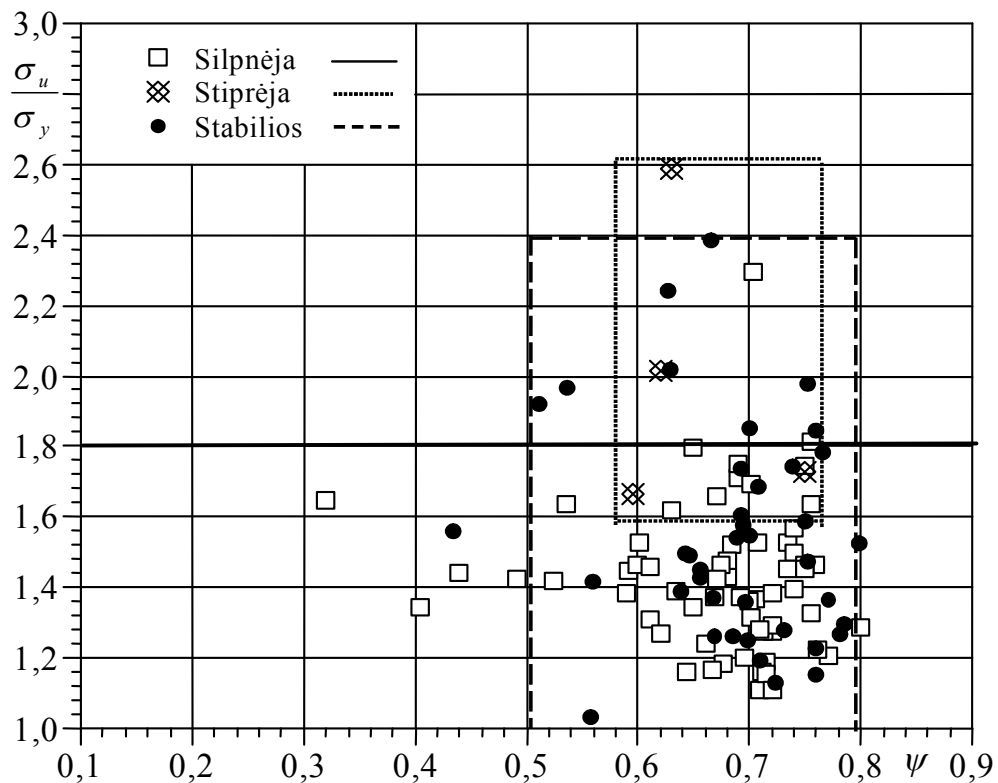
<b>M. Daunys</b> <b>A. Bražėnas</b> <b>ir kt.</b>	$\sigma_u / \sigma_y > 1,8$	∉ nuo $\psi$	stiprėja
	$\sigma_u / \sigma_y < 1,4$	$\psi < 0,72$	silpnėja
	$\sigma_u / \sigma_y < 1,4$	$\psi > 0,72$	stabilios
	$1,4 < \sigma_u / \sigma_y < 1,8$	∉ nuo $\psi$	tarpinės
	$\sigma_u / \sigma_y < 1,4$	$0,56 < \psi < 0,72$	siūlės
Patikrinti 106 plienai ir jų suvirinimo siūlių medžiagos			



**2.5 pav.** Plienų ir suvirintųjų siūlių medžiagų ciklinių savybių priklausomybė nuo mechaninių charakteristikų aukštesnėje temperatūroje

Šiame darbe, išanalizavus 26 (iš 31) medžiagų tyrimų rezultatus pagal KTU laboratorijoje atliktų bandymų parametrus, buvo bandyta patikslinti ciklinių savybių sritis, suskirstant legiruotojo konstrukcinio plieno suvirinimo siūlių medžiagas kambario temperatūroje į 3 grupes koordinatėse  $\delta_u / \delta_y - \psi$  (2.6 pav.):

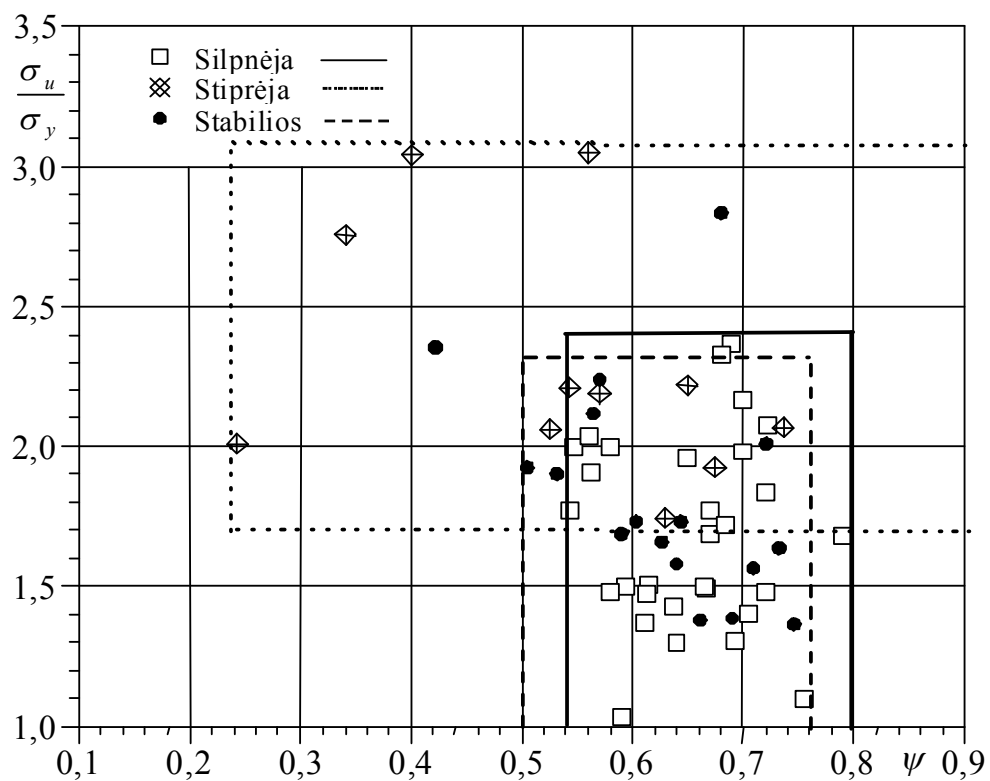
- 1) kai  $\delta_u / \delta_y > 1,8$ , nepriklausomai nuo  $\psi$ , suvirinimo siūlių medžiagos kambario temperatūroje silpnėja;
- 2) kai  $\sigma_u / \sigma_y > 1,6$  ir  $0,58 < \psi < 0,76$  konstrukcinių plienų ir suvirinimo siūlių konstrukcinės medžiagos kambario temperatūroje stiprėja
- 3) kai  $\delta_u / \delta_y < 2,8$  ir  $0,5 < \psi < 0,8$ , suvirinimo siūlių medžiagos cikliškai stabilios.



**2.6 pav.** Legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų ciklinių savybių ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybė kambario temperatūroje

Darbe išanalizavus 26 medžiagų tyrimų rezultatus pagal KTU laboratorijoje nustatytus parametrus, buvo bandyta patikslinti ciklinių savybių sritis, suskirstant legiruotojo konstrukcinio plieno suvirinimo siūlių medžiagas aukštesnėje temperatūroje į tris grupes koordinatėse  $\delta_u / \delta_y - \psi$  (pav.):

- 1) kai,  $\sigma_u / \sigma_y < 2,4$  ir,  $0,54 < \psi < 0,8$  tai suvirinimo siūlių medžiagos silpnėja.
- 2) kai,  $\sigma_u / \sigma_y > 1,5$  ir  $\notin$  nuo  $\psi$ , tai suvirinimo siūlių medžiagos stiprėja.
- 3) kai,  $\sigma_u / \sigma_y < 2,4$  ir  $0,5 < \psi < 0,76$ , tai suvirinimo siūlių medžiagos išlieka stabilios.



**2.7 pav.** Legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų ciklinių savybių ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybė aukštesnėje temperatūroje

Iš 2.6 pav. ir 2.7 pav. matyti, kad medžiagų skirstymas pagal ciklines savybes į cikliškai silpnėjančias, stiprėjančias ar stabilias koordinatėse  $\delta_u / \delta_y - \psi$  nepavyko, nes cikliškai stabilios medžiagos yra tuose pačiuose intervaluose, kaip ir cikliškai nestabilios medžiagos.

### III. ATSPARUMO MAŽACIKLIAM DEFORMAVIMUI TYRIMO REZULTATAI

#### 3.1. Histerezės kilpos pločio priklausomybės tyrimas nuo pusciklių skaičiaus

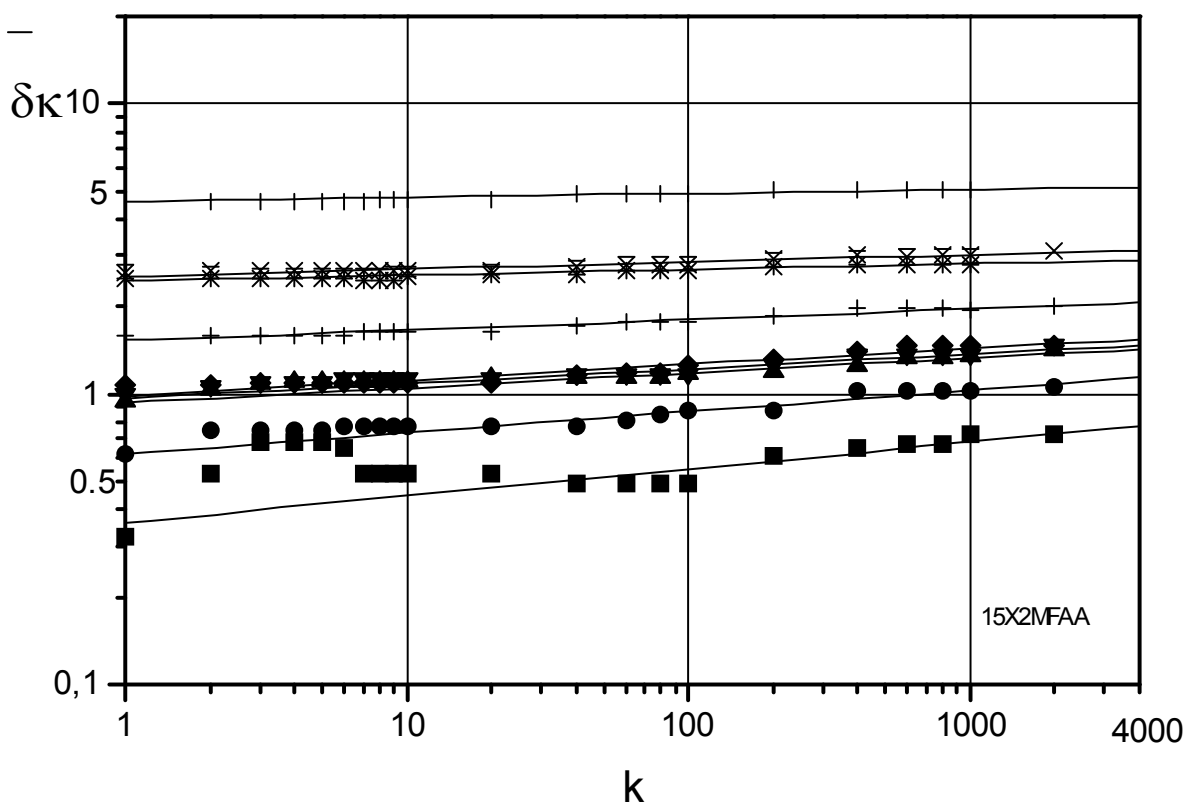
Konstrucinių medžiagų skirstymas pagal ciklines savybes į cikliškai silpnėjančias, stiprėjančias ar stabilias koordinatėse  $\delta_u / \delta_y - \psi$  nepavyko, todėl tolimesnę analizę atliekame koordinatėse  $\bar{\delta}_k - k$ . Įvertiname parametro  $\alpha$  priklausomybę stabilioms ir nestabilioms konstrukcinėms medžiagoms.

Grafiškai interpretavus tiesinę regresiją  $y = a+bx$ , histerezės kilpos plotis cikliškai silpnėjančioms medžiagoms.

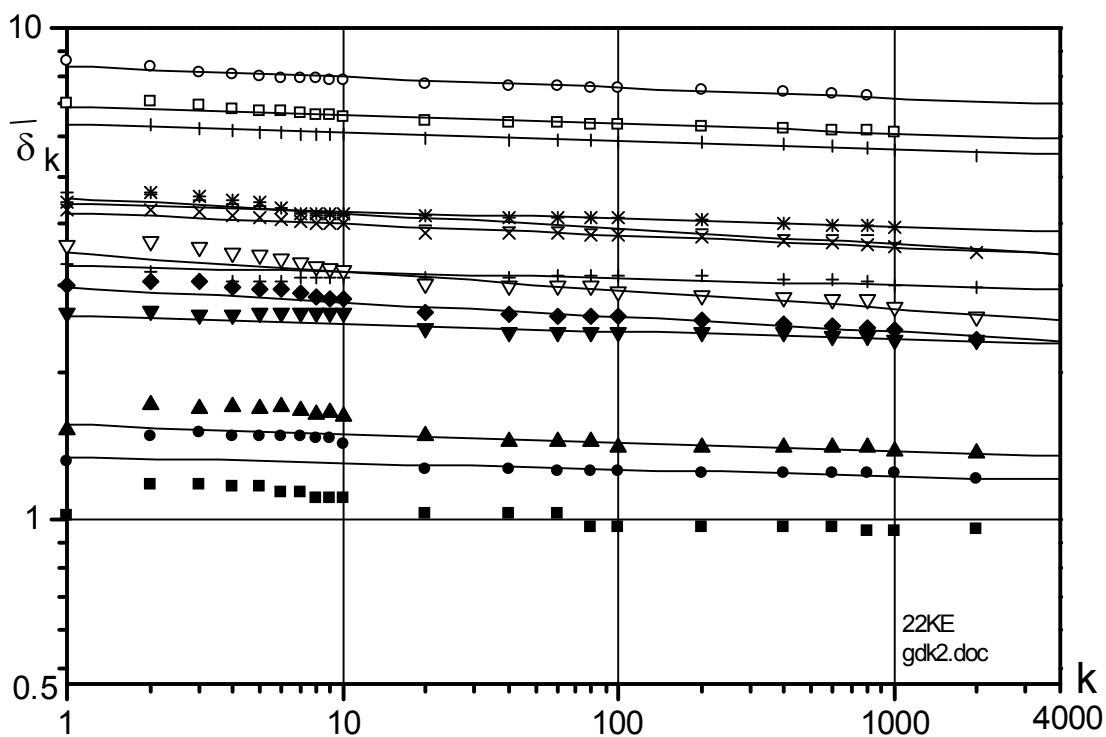
$$\lg \bar{\delta}_k = \lg \bar{\delta}_1 + \alpha \lg k, \quad (3.1)$$

Arba k-tojo pusciklio tampriai plastinės histerezės kilpos plotis

$$\bar{\delta}_k = \bar{\delta}_1 k^a, \quad (3.2)$$



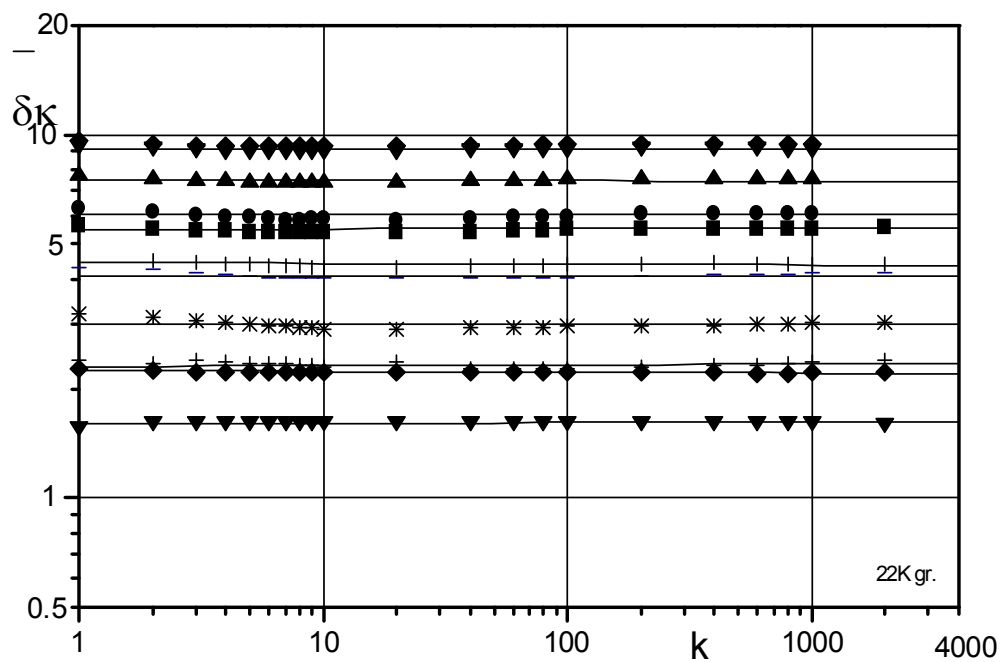
3.1 pav. Histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo pusciklių skaičiaus silpnėjančiai medžiagai (plienas 15X2MFAA)



3.2 pav. Histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo pusciklių skaičiaus stiprėjančiai medžiagai (plienas 22KE)

Histerezės kilpos plotis cikliškai stiprėjančioms medžiagoms

$$\bar{\delta}_k = \bar{\delta}_1 k^{-\alpha}. \quad (3.3)$$



3.3 pav. Histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo pusciklių skaičiaus stabiliai medžiagai (plienas 22K po grūdinimo)

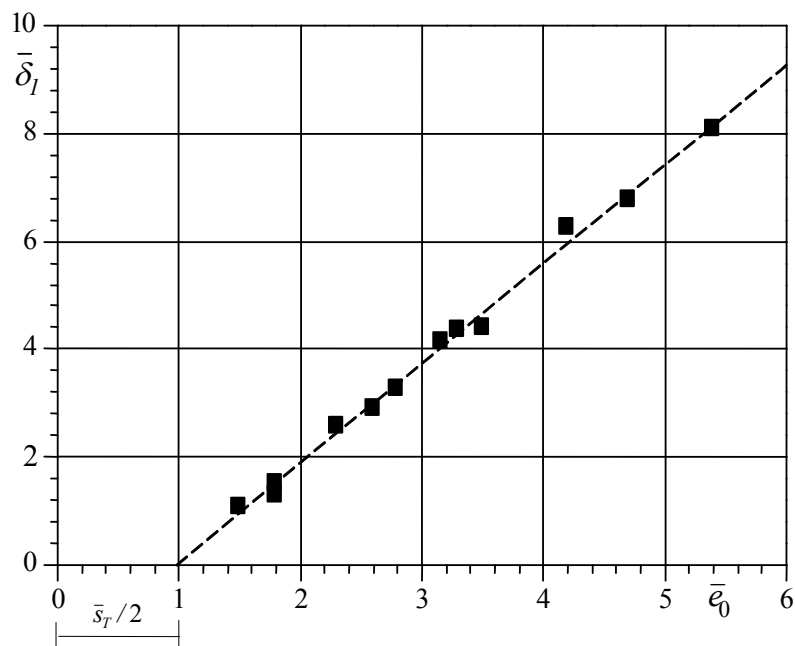
Cikliškai stabilioms medžiagoms (3.3 pav.) parametras  $\alpha = 0$  ir histerezės kilpos plotis

$$\bar{\delta}_k = \bar{\delta}_1. \quad (3.4)$$

Daugumai nagrinėtų medžiagų buvo būdingas ciklinių savybių pradinis nestabilumas intervale  $k > 10-20$ . Siekiant objektyviau įvertinti medžiagos ciklinio deformavimo diagramos parametras  $\alpha$  bei  $\bar{S}_T, A_1$ , visi histerezės kilpos taškai iki  $k = 10$  buvo atmesti kaip nereikalingi palyginti su likusiu ilgaamžiškumu  $N_f < 10^4$  ciklų srityje.

### 3.1.1. Pirmojo pusciklio histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo pradinės deformacijos

Nors daugelio bandymų analizė parodė, kad parametras  $\alpha$  nežymiai priklauso nuo pradinės deformacijos  $\bar{e}_0$ , šiame darbe parametras  $\alpha$  yra atitinkamos medžiagos bandinių aritmetinis vidurkis.



**3.4 pav.** Pirmojo pusciklio histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo pradinės deformacijos plienui C45

Šiuo atveju 3.4 paveiksle parodyta tiesiai plastinės histerezės kilpos pločio pirmajame pusciklyje  $\bar{\delta}_1$ , priklausomybė nuo pradinio pusciklio deformacijos  $\bar{e}_0$ . Taigi tiesinės regresijos



$y = a + bx$  koeficientai  $\alpha = 0$ ,  $b = A_1$  ir nepriklausomai nuo medžiagos ciklinių savybių tampriai plastinės histerezės kilpos plotis pirmajame pusciklyje

$$\bar{\delta}_1 = A_1 \left( \bar{e}_0 - \frac{\bar{s}_{Tk}}{2} \right). \quad (3.5)$$

Iš (3.5) lygybės matyti, kad esant  $\bar{s}_T/2$  reikšmei histerezės kilpa nesusidaro ( $\bar{\delta}_1 = 0$ ). Kadangi daugumos nagrinėtų medžiagų ciklinė proporcingumo riba  $\bar{s}_{Tk}$  nežinoma, tai kiekvienos medžiagos  $\bar{s}_{Tk}$  buvo nustatyta iš grafinio vaizdo koordinatėse  $\bar{\delta}_1 - \bar{e}_0$  (3.6 pav.). Ciklinė proporcingumo riba  $\bar{s}_{Tk}$  priklauso nuo medžiagos tipo ir histerezės kilpos pokyčio pusciklyje:  $\bar{s}_{Tk}$  didėja cikliškai stiprėjančioms medžiagoms, mažėja cikliškai silpnėjančioms ir nesikeičia cikliškai stabilioms medžiagoms. Analitiškai aprašant apibendrintą diagramą, ciklinė proporcingumo riba priimama  $\bar{s}_{T(i)} = \bar{s}_T$  [1].

Būtina pažymėti, kad ciklinės proporcingumo ribos reikšmės koordinatėse  $\bar{\delta}_1 - \bar{e}_0$ , ir kinta nuo 1.32 iki 2.3 ir yra mažesnės už eksperimentines reikšmes. Todėl šiame darbe nustatytas  $\bar{s}_T$  reikšmės reikia traktuoti kaip sąlygines, t.y. skaičiuojamasias.

Karščiui bei korozijai atsparių plienų vidutinės  $\bar{s}_T$  reikšmės kambario ir aukštesnėje temperatūroje pateiktos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė

**Vidutinės skaičiuojamosios ciklinės proporcingumo ribos reikšmės**

Metodai			
$\bar{s}_T$	1	2	3
Variavimo amplitudė	1,29-2,76	1,31-2,73	1,33-2,68
Vidutinė reikšmė	2,12	2,12	2,09

Kambario temperatūroje parametro  $\alpha$  variavimo amplitudė stabilioms medžiagoms  $-0,003 - 0,002$ , silpnėjančioms  $>0,002$ , stiprėjančioms  $<-0,003$ .

Iš sudarytų priklausomybių koordinatėse  $\lg \bar{\delta}_k - \lg k$  (3.3-3.4 pav.) nustatius pirmojo ir  $k$ -ojo pusciklių  $\bar{\delta}_1$  ir  $\bar{\delta}_k$  reikšmes kiekvienam bandiniui, medžiagos stiprėjimo (silpnėjimo) intensyvumą įvertinantis parametras

$$\alpha = \frac{\lg \bar{\delta}_k - \lg \bar{\delta}_1}{\lg k} \quad (3.6)$$

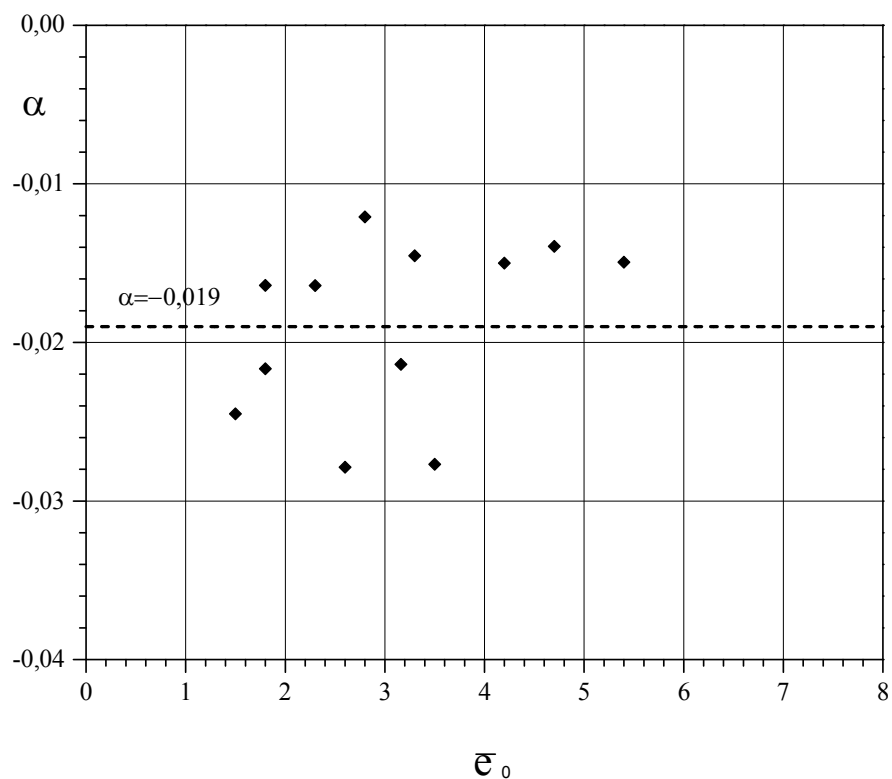
arba, panaudojus (3.2) lygybę, ciklinio deformavimo diagramos parametras

$$\alpha = \frac{1}{\lg k} \cdot \lg \frac{\bar{\varepsilon} - \bar{S}_k}{A_1 \left( \bar{\varepsilon}_0 - \frac{\bar{S}_T}{2} \right)}. \quad (3.7)$$

(3.8) ir (3.9) lygybėse parametras  $\alpha$  įvertina medžiagos ciklinių savybių kitimą esant cikliniam tampriai plastiniam deformavimui. Jeigu  $\alpha$  yra teigiamas, medžiaga silpnėja, jeigu  $\alpha$  yra neigiamas - stiprėja, o jeigu  $\alpha = 0$  - medžiaga yra stabili.

### 3.1.2. Ciklinį stabilumą įvertinančio parametro priklausomybė nuo pradinės deformacijos

3.7 paveiksle parodyta parametro  $\alpha$  priklausomybė nuo pradinės deformacijos  $\bar{\varepsilon}_0$ . Daugelio bandymų analizė rodo, kad parametras  $\alpha$  nuo pradinės deformacijos  $\bar{\varepsilon}_0$  nepriklauso.



3.5 pav. Parametro  $\alpha$  priklausomybė nuo pradinės deformacijos plienui 22K9

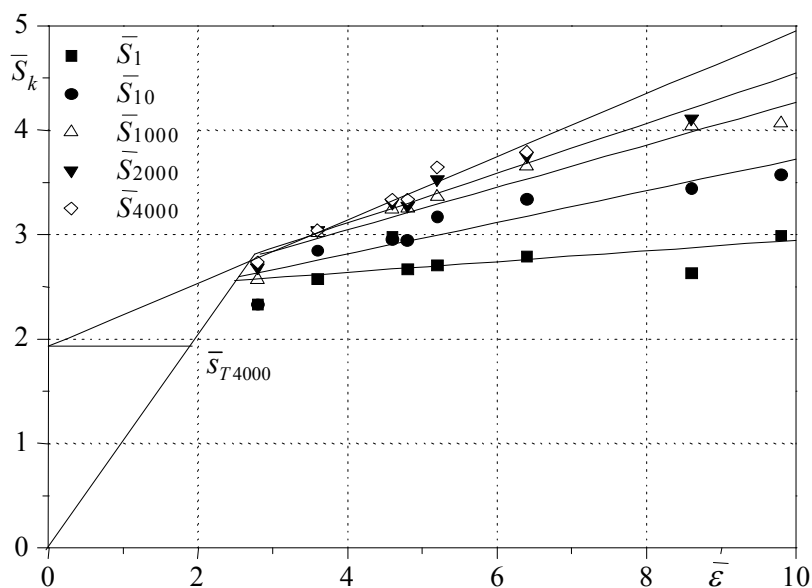
Nustatant ciklines deformavimo charakteristikas pasinaudojus 2 metodu (2.1 lentelė), parametras  $\bar{s}_T$  apskaičiuotas darbe pagal [1] pasiūlytą lygybę.

$$\bar{s}_T = 2 - 0.8 \frac{\delta_{0.2}}{\delta_u} \psi \quad (3.8)$$

Plastinę deformaciją apibūdinantis parametras A apskaičiuotas pagal (3.5) lygybę ir yra atitinkamos medžiagos bandinių aritmetinis vidurkis.

### 3.1.3. ciklinio proporcingumo ribos nustatymas

Šiame darbe ciklinė proporcingumo riba  $\bar{s}_{Tk}$  buvo nustatyta iš sudarytų ciklinio deformavimo diagramų (3.6 pav.). Apytiksliai parametro  $\bar{s}_T$  reikšmė gauta pagal  $\bar{s}_k$  ir  $\bar{\epsilon}$  tarpusavio priklausomybę, apksimuojančiai tiesei kertant  $\bar{s}_k$  koordinatę žemiausioje padėtyje.



**3.6 pav.** Parametro  $\bar{s}_{Tk}$  nustatymas iš ciklinio deformavimo diagramos plienui 15\_8K kambario temperatūroje

Ciklinė proporcingumo riba  $\bar{s}_{Tk}$  priklauso nuo medžiagos charakteristikų. Cikliškaai stiprėjančių medžiagų  $\bar{s}_{Tk}$ , lyginant su pirmojo ciklo cikline proporcingumo riba, dažniausiai didėja, o cikliškaai silpnėjančių - mažėja. Šiame darbe ciklinė proporcingumo riba  $\bar{s}_{Tk}$  buvo nustatyta iš sudarytų ciklinio

deformavimo diagramų (3.6 pav.), kai  $k=1; 10; 1000; 2000$  ir  $4000$ . Apytiksliai parametro  $\bar{s}_T$  reikšmė gauta pagal  $\bar{S}_k$  ir  $\bar{\varepsilon}$  tarpusavio priklausomybę, aproksimuojančiai tiesei kertant  $\bar{S}_k$  koordinatę žemiausioje padėtyje.

Nagrinėtų medžiagų ciklinių savybių analizė parodė, kad medžiagų skirstymas į cikliškai stiprėjančias, silpnėjančias ir cikliškai stabilias tam tikra prasme yra sąlyginis, kadangi ta pati medžiaga, priklausomai nuo apkrovimo ciklų skaičiaus ir apkrovimo lygio, gali stiprėti ir silpnėti arba būti stabili. Dažnai, didinant apkrovimo pusciklų skaičių, cikliškai stiprėjanti medžiaga tampa cikliškai stabilia arba silpnėjančia, arba ciklinis silpnėjimas tampa cikliniu stiprėjimu, didinant apkrovimo lygį.

(3.7) lygybė sudaryta simetriniam mažaciklio apkrovimo ciklui. Realiose konstrukcijose, pvz., įtempimų koncentracijos vietose, plyšių susidarymo zonose, dažnai pasireiškia asimetrinis deformavimas. Tačiau, panaudojus priklausomybes, žinomas iš M. Daunio, H. Medekšo darbų, nesunku standaus simetrinio apkrovimo rezultatus pritaikyti ir asimetriniam apkrovimui.

## IŠVADOS

Išanalizavus KTU laboratorijoje ištirtus 47 legiruotus konstrukcinius plienus kambario ir aukštesnėje temperatūroje pagal jų parametrus, galima padaryti tokias **išvadas**:

1. Legiruotų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų skirstymas pagal savybes į cikliškai silpnėjančias, stiprėjančias ir stabilias koordinatėse  $\sigma_u / \sigma_y - \psi$  nepavyko, kadangi cikliškai stabilios konstrukcinės medžiagos yra tose pačiose ribose kaip ir cikliškai nestabilios medžiagos.
2. . Konstrukcinių medžiagų stabilumą arba nestabilumą įvertina parametras  $\alpha$  . Jei  $\alpha$  su minuso ženklu, visos analizuotos medžiagos laikomos stiprėjančiomis, kai  $\alpha$  teigiamas visos medžiagos silpnėja, išliekant pastoviam  $\alpha$  , konstrukcinės medžiagos laikomos stabiliomis.
3. Ciklinio proporcingumo riba  $\bar{S}_T$  artima eksperimentinei, kai ji nustatyta iš ciklinio deformavimo diagramos (3 metodas).

## LITERATŪRA

1. Даунис М. Прочность и долговечность при малоцикловом нестационарном нагружении.-Вильнюс: Мокслас, 1989. - 255с.
2. Šniuolis R. Konstrukcinių medžiagų mažaciklio nuovargio charakteristikų priklausomybė nuo mechaninių charakteristikų. Daktaro disertacija.- Kaunas, 1999. - 117p.
4. Šniuolis R. Statistinių metodų taikymas, apdorojant konstrukcinių medžiagų statinių ir ciklinių charakteristikų tyrimo rezultatus.-Tarptautinės konferencijos pranešimų medžiaga "Mechanika-2000".- Kaunas, 2000.- p. 31 - 36.
5. Гусеньков А.П., Романов А.Н. Характеристики сопротивления малоцикловому деформированию и разрушению в связи с выбором материалов при конструировании: Доклад на Всесоюзном рабочем симпозиуме по вопросам малоциклового усталости. - Каунас: КПИ, 1971. - 45 с.
6. Daunys M., Česnavičius R.. Mažaciklio deformavimo ir suirimo kreivės esant tempimui-gniuždymui ir sukimui (straipsnis anglų kalba).
7. Daunys M., Rimovskis S. Grynojo mažaciklio lenkimo charakteristikų tyrimas (straipsnis anglų kalba).
8. Daunys M. Ciklinis konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas. Kaunas: technologija, 2005.
9. Bražėnas A. Mechaniškai nevienalyčių suvirintų sujungimų stiprumas ir ilgaamžiškumas. Habilitacinis darbas. - Kaunas, 1994.
10. Žiliukas A. Deformuojamų kūnų mechanika. Tamprumo ir plastiškumo teorija. Irimo mechanika. – Kaunas: Technologija, 1994.
11. Šniuolis R., Stulpinaitė A., Daunys M. Suvirintųjų sujungimų medžiagų standaus apkrovimo nuovargio kreivių parametrų ir ilgaamžiškumo nustatymas (straipsnis anglų kalba).
12. Landgraf, R. W. The Resistance of Metals to Cyclic Deformation.-Achievement of High Fatigue Resistance in Metals and Alloys.-Philadelphia, Pa, 1970, p. 3-36.

# **PRIEDAI**

# 1 PRIEDAS

## Legiruotojo konstrukcinio plieno terminis apdorojimas, pagrindinės mechaninės, ciklinės deformavimo charakteristikos kambario temperatūroje

Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	Terminis apdorojimas	*Mechaninės charakteristikos					*Ciklinės charakteristikos			Suirimo charakteristikos			
			$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$S_k$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$\bar{s}_T$	$\alpha$	$A_1$	$C_c$ , %	$C_f$ , %	$m_c$	$m_f$
1	22K	G-Atl	557	321	1167	69.2	0.209	2.14	0.005	1.88	80.3	82.3	0.459	0.450
2	22K	N	541	316	1030	69.1	0.223	1.83	0.013	1.58	83.0	68.5	0.470	0.425
3	48TC	G-Atl	841	616	1482	70.6	0.357	2.19	0.023	1.92	69.3	86.4	0.464	0.475
4	Φ (12X1MΦ)	-	489	273	1103	76.5	0.214	2.07	-0.004	1.92	69.8	107.0	0.434	0.477
5	15X2MΦ	Atk	594	230	1099	63.0	0.135	2.79	-0.034	1.90	62.1	52.7	0.560	0.540
6	15X2MΦ	N	722	414	1511	73.8	0.210	2.61	0.006	1.87	27.7	32.8	0.410	0.430
7	10XH1M	G-Atl	569	472	1393	77.0	0.245	1.92	0.012	1.87	29.4	30.4	0.405	0.415
8	15X2MΦ	G-Atl	841	617	-	70.0	0.261	2.38	0.011	1.91	-	-	-	-
9	12X3H1MΦC	G-Atl	844	584	1301	59.2	0.255	2.41	0.028	1.90	21.4	31.1	0.440	0.465
10	12X3H1MΦЭ	N-G-Atl	814	587	1197	63.4	0.260	2.22	0.033	1.70	12.5	15.1	0.360	0.382
11	12X3H1MΦΠ	G-Atl	827	542	1099	60.2	0.220	2.52	0.029	1.93	18.5	22.4	0.410	0.430
12	22KЭ	N	505	251	942	62.1	0.168	1.95	-0.017	1.85	16.8	18.8	0.340	0.352
13	12X2MJ	Atkh-G-Atl	688	470	1306	63.3	0.242	-	-	-	34.8	49.4	0.492	0.582
14	45	Atk	549	285	-	51.0	0.155	1.75	-0.003	1.76	29.8	29.8	0.404	0.404
15	8K	N	753	476	1942	75.0	0.215	2.12	-0.010	1.83	7.7	8.3	0.405	0.390
16	TC I	G-Atl	598	503	1570	71.5	0.212	2.38	0.024	1.91	30.3	31.0	0.440	0.436
17	TCII	G-Atl	652	427	1746	73.5	0.205	2.37	0.021	1.87	19.4	20.9	0.376	0.382
18	BK-4	N	694	499	-	63.8	0.261	1.89	-0.007	1.76	14.8	17.3	0.361	0.375
19	22KIII (2)	N	599	309	-	-	0.115	1.99	-0.004	1.88	16.8	24.4	0.364	0.398
20	22KIII (3)	N	628	263	-	66.5	0.146	2.15	-0.004	1.95	15.0	15.3	0.337	0.337
21	1X (BK-2)	G-Atl	-	447	-	67.6	0.172	2.46	0.016	1.95	34.2	48.6	0.485	0.520
22	4X (BK-2)	G-Atl	-	477	-	67.6	0.196	2.37	0.022	1.95	34.2	48.6	0.485	0.520
23	20III (Д, П)	N	375	313	-	70.9	0.139	1.27	-0.006	1.74	25.1	23.8	0.418	0.408



lentelės tęsinys

Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	Terminis apdorojimas	*Mechaninės charakteristikos					*Ciklinės charakteristikos			Suirimo charakteristikos			
			$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$S_k$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$\bar{s}_T$	$\alpha$	$A_1$	$C_c$ , %	$C_f$ , %	$m_c$	$m_f$
24	20X2H4MBΦ	G-Atl	-	627	-	66.5	0.204	2.73	0.026	1.92	68.3	51.4	0.578	0.529
25	2T(BK-2III)	Atkh-N-G-Atl	1079	655	-	32.0	0.202	2.10	0.028	1.77	22.7	28.3	0.452	0.460
26	4Д, 4Т (BK-4III)	-	785	547	-	-	0.194	2.24	0.007	1.90	29.1	43.8	-	-
27	15X2MΦAA (TCK)	G-2Atl	650	510	-	72.0	0.179	2.18	0.044	1.82	-	-	-	-
28	BK-2M (Γ)	G-2Atl	835	570	-	60.0	0.201	2.08	0.085	1.94	5.2	11.5	0.310	0.410
29	BK-2M (E)	G-Atl	900	775	-	64.4	0.195	2.48	0.036	1.94	6.4	8.8	0.380	0.405
30	15X2MΦAA	G-2Atl	722	365	-	75.2	0.112	1.42	0.006	1.61	45.0	43.1	0.573	0.557
31	BK-2M (IE)	G-2Atl	781	513	-	68.4	0.230	2.09	0.047	1.61	9.4	9.9	0.370	0.365
32	PO (BK-4)	G-Atl	750	480	-	43.3	0.292	1.83	0.003	1.74	10.7	15.8	0.310	0.345
33	15X2HMΦAA (IIT)	G-Atl	765	570	-	65.0	0.267	2.24	0.033	1.93	11.6	15.6	0.336	0.362
34	BK-2III (JIB)	Atkh-N-G-Atl	1050	520	-	62.8	0.171	2.58	0.007	1.85	8.8	7.3	0.343	0.316
34	15X3HMΦAA (BK)	G-3Atl	680	520	-	61.0	0.238	2.30	0.035	1.77	18.5	40.3	0.380	0.467
36	48TC-III	Atkh-N-G-2Atl	870	540	-	15.7	0.311	-	-	-	4.7	4.6	0.268	0.256
37	BK-2AA	-	720	500	-	43.9	0.184	2.82	0.039	2.25	31.1	37.2	0.448	0.459
38	BK-2III (JII)	Atkh-N-G-Atl	750	520	-	-	0.250	2.14	0.025	1.85	15.8	16.8	0.373	0.373
39	15X2HMΦAA (01-9)	G-Atl	790	570	-	59.0	0.275	2.62	0.062	1.67	8.8	10.5	0.330	0.346
40	BY(13-42)	G-3Atl	675	372	-	75.5	0.197	2.57	0.039	1.87	24.1	34.6	0.402	0.439
41	BY(55-68)	G-2Atl	645	394	-	75.5	0.200	2.58	0.032	1.83	23.1	23.7	0.428	0.420
42	PB	N-G-Atl	655	387	-	70.1	0.250	3.11	0.030	2.19	25.8	31.8	0.404	0.463
43	PII	N-G-Atl	655	499	-	70.1	0.274	2.56	0.072	1.74	20.8	25.1	0.408	0.397
44	TM	-	750	430	-	75.0	0.180	3.13	0.018	2.03	98.8	178.0	0.680	0.750
45	BY(1-6)	G-3Atl	605	457	-	75.5	0.240	2.34	0.036	1.88	58.5	73.3	0.475	0.495
46	10ГН2МΦА (ΓЭ)	N-G-Atl	600	463	-	78.5	0.205	1.97	0.009	1.94	26.6	36.0	0.422	0.460
47	19MN5	-	515	264	-	-	0.161	1.92	0.002	1.63	36.0	41.3	0.466	0.480

*Atkh* - homogenizacinis atkaitinimas; *N* - normalizavimas; *G* - grūdinimas; *Atl* - aukštasis atleidimas

## 2 PRIEDAS

### Legiruotojo konstrukcinio plieno terminis apdorojimas, pagrindinės mechaninės, ciklinės deformavimo bei suirimo charakteristikos aukštesnėje temperatūroje

Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	T, °C	Terminis apdorojimas	*Mechaninės charakteristikos					*Ciklinės charakteristikos			Suirimo charakteristikos			
				$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$S_k$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$\bar{s}_T$	$\alpha$	$A_1$	$C_c$ , %	$C_f$ , %	$m_c$	$m_f$
1	15X2MФ	350	G-Atl	574	387	1265	72.2	0.233	2.34	0.047	2.06	-	-	-	-
2	22K	350	G-Atl	474	230	1265	73.7	0.173	2.77	-0.013	1.78	-	-	-	-
3	22KШ (3)	350	N	463	130	-	-	0.101	2.54	-0.073	1.69	30.6	42.0	0.490	0.530
4	BK-1A	350	N	598	188	-	66.3	0.156	3.93	-0.008	2.05	39.8	59.4	0.575	0.670
5	BK-2M	350	G-Atl	672	447	-	66.7	0.228	3.07	0.031	2.41	36.0	49.3	0.468	0.500
6	Г (10Г2НМФА)	350	-	665	381	-	-	0.205	2.09	-0.032	1.77	22.3	31.0	0.465	0.500
7	10XH1M (A)	200	G-Atl	595	335	-	54.3	0.183	2.31	0.015	1.81	47.2	57.1	0.473	0.490
8	20Ш	350	N	382	86	-	-	0.067	2.74	-0.028	1.46	21.1	23.4	0.500	0.500
9	20X2H4BФ	300	G-Atl	825	543	-	61.5	0.257	1.87	0.026	1.72	20.3	22.5	0.420	0.426
10	22K-ВД (ШИ)	350	N	477	149	-	-	0.083	1.98	-0.058	1.73	18.0	27.5	0.402	0.452
11	25ЛС	350	N	448	140	-	-	0.071	3.15	-0.024	1.85	4.9	6.2	0.331	0.360
12	BK-2Ш (9)	350	Atkh-N-G-Atl	576	360	-	-	0.184	2.50	0.038	1.60	19.1	20.0	0.436	0.427
13	BK-2M (ПВ)	350	G-3Atl	687	490	-	-	0.253	2.20	0.022	2.02	50.4	60.4	0.600	0.600
14	BK-2Ш (H)	200	2Atkh-2N- Atl	637	459	-	68.9	0.246	1.48	0.008	1.61	29.0	33.7	0.479	0.489
15	BK-2Ш (П)	350	Atkh-N-G-Atl	697	348	-	54.8	0.217	3.44	0.095	2.14	28.0	51.6	0.447	0.514
16	BK-2Ш (Д)	350	Atkh-N-G-Atl	600	397	-	59.4	0.189	2.19	0.044	1.69	28.0	25.9	0.481	0.465
17	Л (25Л)	350	N	545	180	-	40.1	0.092	3.16	-0.055	2.13	5.1	4.0	0.250	0.211
18	15X2MΦAA (TCII)	350	G-2Atl	412	223	-	72.2	0.157	2.40	0.012	2.05	60.5	62.6	0.540	0.524
19	BK-2M (3E)	350	G-2Atl-S	680	240	-	68.2	0.127	2.99	0.002	1.92	54.2	90.4	0.580	0.645
20	BK-2M (Д)	350	N-G-2Atl	502	480	-	59.2	0.243	1.13	0.024	1.11	25.7	30.1	0.459	0.472
21	BK-2M (E)	350	G-Atl	875	501	-	63.2	0.261	1.85	-0.016	1.61	7.26	8.07	0.204	0.307
22	BK-2M (Г)	350	G-2Atl	603	254	-	69.2	0.144	2.27	0.023	0.92	46.9	65.6	0.560	0.600

lentelės tęsinys

Eil. Nr.	Legiruotasis konstrukcinis plienas	T, °C	Terminis apdorojimas	*Mechaninės charakteristikos					*Ciklinės charakteristikos			Suirimo charakteristikos			
				$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$S_k$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$\bar{s}_T$	$\alpha$	$A_1$	$C_c$ , %	$C_f$ , %	$m_c$	$m_f$
23	БК-2М (О)	350	G-3Atl	619	367	-	59.0	0.108	3.09	0.005	1.88	27.5	28.9	0.490	0.497
24	БК-2ИИ (Н)	350	G-3Atl	550	236	-	68.0	0.128	2.89	0.024	1.74	87.9	131.5	0.617	0.658
25	БК-2М (ГО)	350	G-2Atl	660	390	-	67.0	0.195	1.28	0.028	1.38	25.4	28.2	0.435	0.435
26	15Х2НМΦАА	350	G-Atl	580	440	-	69.2	0.223	2.38	0.040	1.82	11.6	15.6	0.336	0.367
27	15Х3НМΦАА	350	G-3Atl	550	275	-	58.0	0.159	2.68	0.062	1.67	145.3	233.8	0.729	0.650
28	15Х2МΦААВУ (7-12)	350	G-3Atl	530	480	-	75.5	0.239	2.02	0.043	1.82	284.0	52.0	0.780	0.552
29	19МN5 (К)	275	-	548	245	-	57.0	0.133	2.05	-0.002	1.65	46.0	46.4	0.514	0.519
30	19МN5 (К)	285	-	559	255	-	57.0	0.152	0.82	-0.012	1.27	87.4	89.3	0.627	0.624
31	19МN5 (К)	350	-	480	277	-	64.4	0.147	2.716	-0.005	2.20	17.2	20.9	0.428	0.449
32	10ГН2МΦА (ΓЭ)	350	-	550	403	-	74.5	0.199	2.65	0.008	2.37	54.2	52.0	0.594	0.578

*Atkh* - homogenizacinis atkaitinimas; *N* - normalizavimas; *G* - grūdinimas; *Atl* - aukštasis atleidimas; *S* - sendinimas