

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

Irmantas Liaudanskis

**MAŽACIKLIO STANDAUS APKROVIMO NUOVARGIO  
KREIVIŲ PARAMETRŲ TYRIMAS**

Magistro darbas

Vadovas: doc. dr. Raimondas Šniuolis

ŠIAULIAI, 2013

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU

Katedros vedėjas

doc. dr. A. Sabaliauskas

2013 06 12

**MAŽACIKLIO STANDAUS APKROVIMO NUOVARGIO  
KREIVIŲ PARAMETRŲ TYRIMAS**

Mechanikos inžinerijos magistro darbas

**Vadovas**

doc. dr. R. Šniuolis

2013 06 12

**Recenzentas**

dr. A. Stulpinaitė

2013 06 12

**Atliko**

MM 11 gr. Stud.

I. Liaudanskis

2013 06 12

ŠIAULIAI, 2013

# ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS

## TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS

### MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA

**Irmantas Liaudanskis.** MAŽACIKLIO STANDAUS APKROVIMO NUOVARGIO KREIVIŲ PARAMETRŲ TYRIMAS. / vadovas doc.dr. R. Šniuolis.

#### SANTRAUKA

Nustatant struktūrinių elementų ciklų skaičių  $N_c$  turi būti žinoma santykinio skerspjūvio sumažėjimas. Ciklinės plastinės deformacijos priklausomybė  $\delta$  nuo ciklų skaičiaus  $N_c$  gali būti išreikšta Kofino priklausomybe  $\delta = CN^{-m}$ , bet nustatyti tikslias ciklines konstantas  $C$  ir  $m$ , nestabilioms medžiagoms yra sudėtinga, nes šiuo atveju ciklinė plastinė deformacija  $\delta$  priklauso nuo ciklų skaičiaus  $N$ . Todėl M.Daunys pasiūlė lygtį  $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$ , kuri gali būti naudojama, siekiant nustatyti ciklų skaičių intervale  $(3 \dots 3,5)e_{pl} \leq \varepsilon \leq 0,026 \dots 0,038$ .

Šiame darbe naudojamas analizės metodas, skaičiavimai, naudojant eksperimentinių tyrimų rezultatus. Didžiausia deformacijos kreivės riba yra  $\varepsilon_2$ , kuri atitinka ciklų skaičių  $N = N_2$  ir buvo nustatyta šiame darbe. Taip pat siūloma kreivę pakeisti trimis tiesėmis ciklų intervale  $1 \leq N \leq 10^7$ . Išraiška supaprastinta, nustatant aukščiausią šios kreivės galiojimo intervalą  $\varepsilon_2$  su pakankamu tikslumu.

Ciklų skaičiaus diapazonuose  $1 \leq N \leq N_2$ ,  $N_2 \leq N \leq N_1$  parametrai  $C_{12}$ ,  $m_{12}$ ,  $C_\varepsilon$ ,  $m_\varepsilon$  turi būti nustatomi iš eksperimentinių tyrimų rezultatų.

Gauta nuovargio kreivės  $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$  skaičiavimo metodika leidžia tiksliau nustatyti struktūrinių elementų ilgaamžiškumą taikant standų apkrovimą.

**Reikšminiai žodžiai:** standus apkrovimas, nuovargio kreivė

**ŠIAULIAI UNIVERSITY**  
**FACULTY OF TECHNOLOGY**  
**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**Irmantas Liaudanskis.** Title. APPROXIMATION OF LOW CYCLE FATIGUE CURVES: MASTER THESIS OF MECHANICAL ENGINEER/ research advisor assoc. prof. dr. R. Šniuolis.

**SUMMARY**

For determination of lifetime of structural elements number cycles  $N_c$  before fatigue crack appearance must be known. Dependence of cyclic plastic strains  $\delta$  on the number of cycles  $N_c$  can be expressed by Coffin's law.  $\delta = CN^{-m}$ , but determining of material cyclic constants  $C$  and  $m$  for cyclic non – stable materials is complicated because in this case the cyclic plastic strain  $\delta$  depends on number of cycle  $N$ . Therefore an equation  $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$  proposed by M. Daunys, which approximately may be used for determination lifetime on the interval of cyclic strains  $(3 \dots 3,5)\varepsilon_{epl} \leq \varepsilon \leq 0,026 \dots 0,038$ .

In this work is used the analytical method of calculations by using results of experimental investigations. The highest value of this curves validity is  $\varepsilon_2$ , which corresponds number of cycles  $N = N_2$  and was determined in this work. As well is proposed to change this curve in interval of cycles  $1 \leq N \leq 10^7$  by broken line, which consists from three linear elements and were determined constants of these zones. Expression for simplified determining of the highest interval validity of this curve  $\varepsilon_2$  with the sufficient accuracy is proposed.

The cyclic constants of cyclic curves  $C_{12}$ ,  $m_{12}$ ,  $C_\varepsilon$ ,  $m_\varepsilon$  which corresponds intervals of loading  $1 \leq N \leq N_2$ ,  $N_2 \leq N \leq N_1$ .

The obtained method of calculations enables more exactly to determine of structural elements lifetime subjected to strain controlled loading and extend interval validity of fatigue curve  $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$ .

**Keywords:** strain loading, fatigue curve

# TURINYS

TURINYS.....	5
ĮVADAS.....	6
1. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS ESANT MAŽACIKLIAM APKROVIMUI .....	8
1.1. Apkrovimo tipo parinkimas.....	8
1.2. Apkrovimo būdo parinkimas.....	8
1.3. Kitos eksperimento sąlygos .....	10
1.4. Tyrimo eiga ir eksperimento rezultatų apdorojimas.....	10
1.5. Tyrimams panaudotos medžiagos .....	11
2. ESANT STANDŽIAM APKROVIMUI MAŽACIKLIO DEFORMAVIMO KREIVĖS PARAMETRAI.....	12
2.1. Mažaciklio deformavimo kreivės esant standžiam apkrovimui .....	12
2.2. Lygties $\epsilon = C\epsilon N - m\epsilon$ galiojimo ribų nustatymas.....	13
2.3. Lygties $\epsilon = C12N - m12$ konstantų nustatymas, kai $\epsilon1 > \epsilon2$ .....	15
2.4. Lygties $\epsilon = C10N - m10$ konstantų nustatymas, kai $N > N1$ ( $\epsilon < \epsilon1$ ).....	16
2.5. Atsparumo mažacikliam suirimui tyrimo rezultatai .....	17
2.6. Eksperimentinių rezultatų apdorojimas .....	23
3. PROGNOZUOJAMO IR EKSPERIMENTINIO ILGAAMŽIŠKUMŲ PALYGINIMAS.	27
IŠVADOS: .....	30
LITERATŪRA.....	31

## IVADAS

**Darbo aktualumas.** Tik ištyrus medžiagų savybes, galima pagerinti mašinų kokybę, padidinti jų ilgaamžiškumą ir patikimumą. Šiuolaikiniai įrenginiai ir mašinos dirba ekstremaliomis ciklinio apkrovimo sąlygomis. Tokiomis sąlygomis dirbančiuose įrengimuose, eksploatacijos metu dažnai yra viršijamos deformacijos ir įtempimai, dėl ko atsiranda tampriai plastinės deformacijos.

Jos atsiranda įtempių koncentracijos vietose, netinkamai parinkus užapvalinimo spindulius, parinkus netinkamą detalės formą ir kt.

Parenkant medžiagas konstrukcijai dirbančiai mažaciklio apkrovimo sąlygomis svarbiausia yra žinoti medžiagos tipą, (stiprėjanti, silpnėjanti, cikliškai stabili) nes eksploatacijos metu deformacijos ir įtempiai kinta priklausomai nuo medžiagos tipo. Spręsti apie medžiagos pritaikymo galimybes eksploatacijos sąlygoms galima tik tada kai yra žinomas medžiagos tipas.

Konstrukcijų realios darbo sąlygos artimos apkrovimui su apribotomis deformacijomis, t.y. dažniausiai mašinų detalėse aptinkamas standus apkrovimas, nes ciklinis tampriai plastinis deformavimas labiausiai išryškėja plyšio zonose ir įtempimų koncentracijose, kurias supa tampriai deformuojama medžiaga.

Esant standžiai tampriam plastiniam apkrovimui, ilgaamžiškumas labai priklauso nuo santykinio skerspjuvio sumažėjimo koeficiento  $\psi$ . Iš Kofino (L. F. Coffin) priklausomybės  $\delta N^m = C$ , nuo konstantos  $C$  priklauso ciklų skaičius  $N$  iki plyšio susidarymo arba suirimo:  $C = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\psi}$ . Tačiau daugumai medžiagų ši lygybė netinka ir tenka naudoti daug sudėtingesnes formules. Kofino (L. F. Coffin) pasiūlyta konstanta  $m=0,5$  artima eksperimentinei. Kadangi konstanta  $C$  labai skiriasi nuo eksperimentinės tai keičia medžiagos ilgaamžiškumo skaičiavimo rezultatus. Ilgaamžiškumą mažaciklio nuovargio srityje tiksliausiai aprašo Kofino lygtis  $\delta = CN^{-m}$ , kurioje panaudotos eksperimentinės konstantos  $C$  ir  $m$ . Kofino lygtis galioja visame ilgaamžiškumo diapazone  $1 \leq N \leq 10^7$ .

Daugelio labai atsakingų konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas priklauso nuo medžiagos suirimo kreivės parametru, o šiems parametrms nustatyti reikia atlikti brangius ir sudėtingus bandymus.

Patogesnė naudojimui yra M. Daunio pasiūlyta priklausomybė  $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$ . Yra įrodyta, kad Kofino lygtis yra teisinga, įvertinus, kad  $\varepsilon = \delta + \frac{S_k}{E}$ , iš matematikos seka, kad M. Daunio lygtis negali galioti tiksliai visame diapazone.

### **Tyrimo tikslas.**

1. Nustatyti mažaciklio nuovargio sritį kurioje galioja M. Daunio ( $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$ ) priklausomybė.
2. Išplėsti priklausomybės ( $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$ ) taikymo ribas pakeičiant kreivę  $lg\varepsilon - lgN$  trimis tiesėmis, apskaičiuojant jų konstantas  $C_\varepsilon$  ir  $m_\varepsilon$ .

### **Darbo uždaviniai.**

3. Rasti priklausomybes, nusakančias kreivės  $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$  atskirų zonų galiojimo ribas.
4. Iš eksperimentinių duomenų rezultatų, apskaičiuoti šių zonų nuovargio kreivės  $lg\varepsilon - lgN$  konstantas  $C_{12}$  ir  $m_{12}$ .

### **Tyrimo metodai.**

Magistro darbo tyrimai paremti eksperimentiniais, analitiniais ir statistiniais metodais. Šiame darbe apdoroti KTU mažaciklio nuovargio laboratorijoje 1971-1988 metais gauti energetikoje naudojamų korozijai ir karščiui atsparių plienų atsparumo suirimui tyrimo rezultatai.

Korozijai ir karščiui atsparių plienų suirimo kreivių parametrus  $m_\varepsilon$ ,  $C_\delta$ ,  $m_\delta$ ,  $C_\varepsilon$  kambario ir aukštesnėje temperatūroje nustatyti ir patikslinti buvo panaudotas „Microcal“ kompanijos programinis paketas „Origin 9.2.1“.

# 1. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS ESANT MAŽACIKLIAM APKROVIMUI

## 1.1. Apkrovimo tipo parinkimas

Esant cikliniam apkrovimui tamprumo ribose, apkrovimas pagal užduotas deformacijas tapatus apkrovimui pagal užduotus įtempius. Tačiau viršijus proporcingumo ribą, šie du apkrovimo tipai skiriasi. Apribojus jėgą ar įtempimą, turėsime minkštą apkrovimą. Standus apkrovimas tai apkrovimas su apribotomis ciklinėmis deformacijomis  $\epsilon$ .

Naudojant standų apkrovimą cikliškaip stiprėjančioms ir silpnėjančioms medžiagoms, pastebimas įtempimų, tampriųjų ir plastinių deformacijų kitimas 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 pastovūs (1.1 pav.).

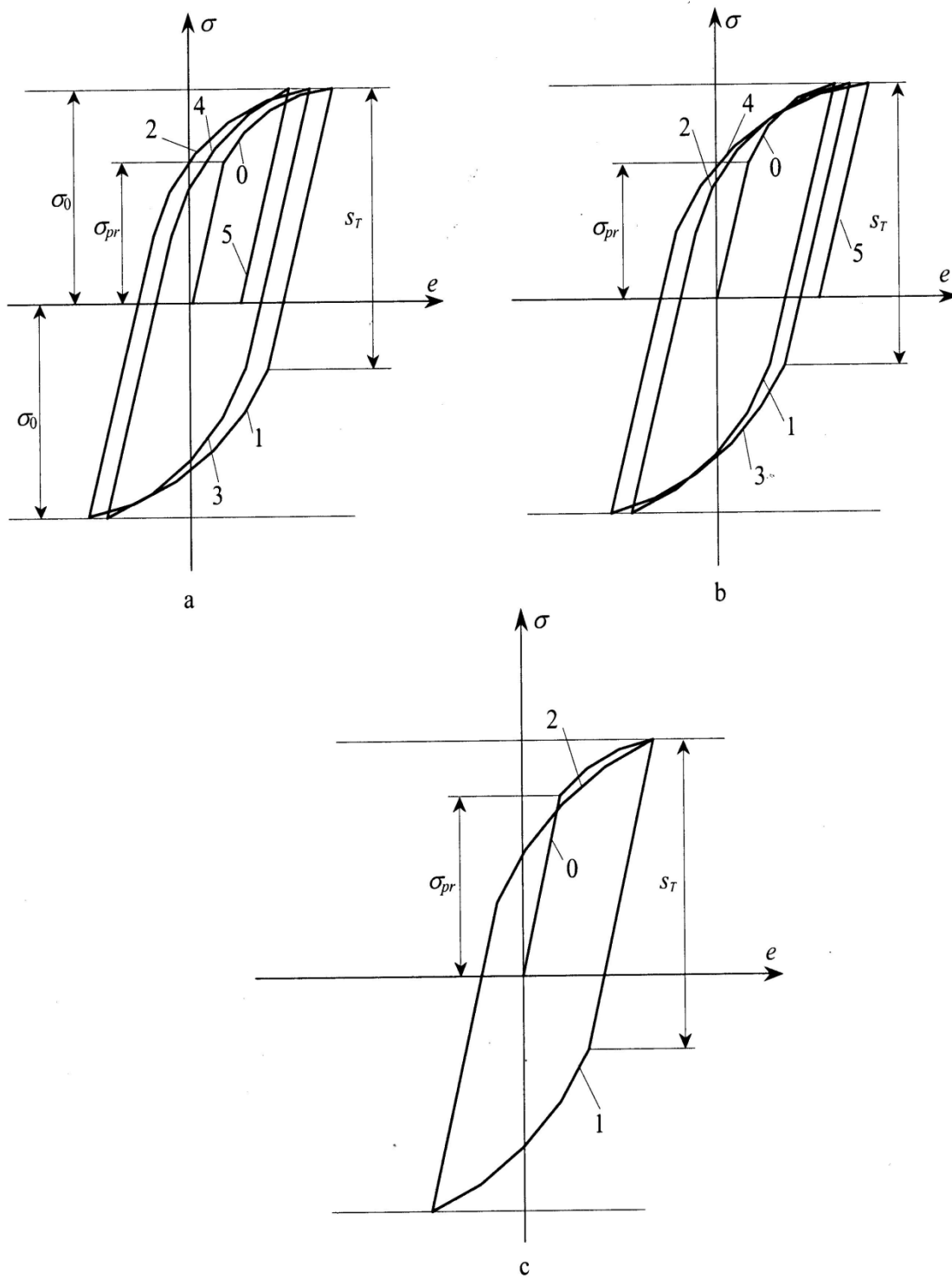
Mašinių detalėse, konstrukcijose dažniausiai sutinkamas standus apkrovimas (ypač įtempimų koncentracija, plyšių zonose), nes mažaciklės plastinės deformacijos zonos yra ribojamos tampriai deformuojamos medžiagos. Todėl pasirinktas apkrovimas, kaip artimiausias realioms konstrukcijų ir sujungimų darbo sąlygoms, esant mažacikliam deformavimui.

## 1.2. Apkrovimo būdo parinkimas

Esant cikliniam deformavimui, bandiniai dažniausiai apkraunami tempimu gniuždymu, sukimu bei lenkimu. Šie trys apkrovimo būdai naudojami atliekant ir mažaciklius bandymus, tačiau tempimas, gniuždydas skiriasi nuo kitų apkrovimo būdų. Tempimo gniuždymo metu deformacijos pasižymi vienalytiškumu visame geometriškai vienalyčio kūno (bandinio ar detalės) darbiniam skerspjuvyje. 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.

Darbe panaudoti tyrimo rezultatai gauti tempimu gniuždymu, užtikrinant vienalytį deformavimą  $N_f = 10^2 - 2 \cdot 10^4$  ciklų intervale.





1.1 pav. Mažaciklio apkrovimo schema: a – stiprėjančių medžiagų; b – silpnėjančių medžiagų; c – stabilių medžiagų

### 1.3. Kitos eksperimento sąlygos

Mažaciklio deformavimo metu atsiranda plastinės deformacijos, todėl priklausomai nuo apkrovimo lygio bandinys apkraunamas 3 – 10 ciklų per minutę dažniu, nes esant didesniems dažniams, sunku užrašyti deformavimo diagramas.

Vykstant ciklinėms apkrovoms, pažeidimo kaupimo procesas skirstomas į dvi stadijas: stadiją po nuovargio plyšio susidarymo ir stadiją iki nuovargio plyšio atsiradimo. Pirmoje stadijoje pažeidimo kaupimas lokalizuojasi netoli plyšio ir yra apribotas nedideleje detalės tūrio dalyje. Antroje stadijoje pažeidimo kaupimas vyksta deformuojamos detalės makro tūryje. Plyšio atsiradimas sąlygoja deformavimo sąlygų pasikeitimą, kadangi išauga deformacijos reikšmės ir pasiskirstymo gradientai priklausantys ne tik nuo apkrovimo būdo, bet ir nuo plyšio ilgio, jo vystimosi greičio, atsivėrimo dydžio ir formos. Todėl negali būti naudojami metodai, nagrinėti medžiagų pažeidimo kaupimą iki plyšio susidarymo.

### 1.4. Tyrimo eiga ir eksperimento rezultatų apdorojimas

**Jėgų ir deformacijų matavimas.** Jėgos jau minėtuose bandymo įrengimuose buvo matuojamos dinamometru. Apvalaus skerspjūvio bandinių vienkartinio tempimo ir ciklinių deformacijų matavimui kambario temperatūroje buvo panaudotas skersinis deformometras, nenutrūkstamai fiksuojantis tiriamojo bandinio skersmens pokyčius. Detalus aprašymas jėgoms ir deformacijoms matuoti duotas [6] literatūroje.

**Bandymai.** Mažaciklio deformavimo diagramas iki 10-ojo pusciklio buvo rašomos nenutrūkstamai, o toliau periodiškai, norint išvengti užrašo susiliejimo. Esant atitinkamam ciklų skaičiui  $N_2$  atsirasdavo nuovargio plyšys, o toliau, deformuojant iki ciklų skaičiaus  $N_f$ , įvykdavo galutinis suirimas. Ciklų skaičius  $N_1$  atliktuose bandymuose atitinka 1mm plyšio ilgį ant bandinio paviršiaus. Pradinės deformacijos  $\bar{\epsilon}_0$  buvo parinktos taip, kad eksperimentiniai nuovargio kreivės taškai išsidėstytų maždaug vienodai ciklų skaičiaus  $N_f = 10^2 - 2 \cdot 10^4$  ribose.

**Tyrimo rezultatų apdorojimas.** Mažaciklio nuovargio kreivėms sudaryti ir suirimo parametrams nustatyti Kauno technologijos universiteto mažaciklio nuovargio laboratorijoje buvo panaudota 10-15 bandinių. Eksperimento metu buvo užrašytos standaus mažaciklio deformavimo diagramos ir nustatytas ciklų skaičius iki plyšio susidarymo bei bandinio

suirimo. Pagal ciklų skaičių iki plyšio susidarymo  $N_c$  bei ciklų skaičių iki bandinio suirimo  $N_f$  buvo sudarytos mažaciklio nuovargio kreivės santykinės koordinatėse  $lg\bar{\epsilon}_e - lgN_f$ .

### **1.5. Tyrimams panaudotos medžiagos**

2.1-2.2 lentelėse pateiktos korozijai ir karščiui atsparaus plieno, kambario ir aukštesnėje temperatūroje, kurių tyrimų rezultatai esant mažacikliam standžiam deformavimui panaudoti šiame darbe, terminis apdirbimas, mechaninės charakteristikos ir nuovargio kreivės parametrai.

## 2. ESANT STANDŽIAM APKROVIMUI MAŽACIKLIO DEFORMAVIMO KREIVĖS PARAMETRAI

### 2.1. Mažaciklio deformavimo kreivės esant standžiam apkrovimui

Konstrucijų ilgaamžiškumas esant mažacikliam apkrovimui, apskaičiuojamas naudojant Kofino (L. F. Coffin, 1954) pasiūlyta priklausomybė:

$$\delta = C_f \cdot N_f^{-m}. \quad (2.1)$$

čia  $\delta$  – plastinės deformacijos amplitudė arba histerezės kilpos plotis;

$C_f$  ir  $m$  – konstantos pagal galutinį suirimą, kur Kofino pasiūlyta  $m = 0,5$ ; konstantos  $C_f$  reikšmė nustatoma naudojant plastiškumo charakteristiką  $\psi$  ir  $C_f = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\psi}$ .

Kofino lygtis naudojama tamptariai plastinėje srityje ir aprašo suirimo sąlygas esant standžiam apkrovimui ir mažam ciklų skaičiui, kai suirimas įvyksta sukauptai ciklinei plastinei deformacijai pasiekus kritinę reikšmę.

Eksperimento metu ir skaičiavimuose yra matuojamos suminės ciklinės deformacijos tuomet yra gaunama, kad:

$$\varepsilon = \frac{\delta_K + S_K}{E} = const. \quad (2.2)$$

Mensonas (S. S. Manson, 1965) apdorojęs 29 cikliškai nestabilias medžiagas, ilgaamžiškumui apskaičiuoti pasiūlė lygtį:

$$\varepsilon = C_f N_f^{-m} + \frac{2\delta_{-1}}{E} \cdot \left(\frac{N_0}{N_f}\right)^{m_s}. \quad (2.3)$$

čia  $\varepsilon$  – ciklinė tamptariai plastinė deformacija;  $\delta_{-1}$  – simetrinio ciklo patvarumo riba;  $E$  – tamprumo modulis;  $N_0 = 10^7$  - bazinis ciklų skaičius atitinkantis patvarumo ribą  $\delta_{-1}$ ;

$$m_s = \frac{\lg \frac{S_K}{\delta_{-1}}}{\lg N_0}. \quad (2.4)$$

$S_K$  - bandinio trūkimo įtempimai.

Neturint eksperimentinių duomenų galima naudoti:  $S_K = \sigma_u(1 + 1,4\psi)$  [12].

Simetrinio ciklo patvarumo riba:

$$\sigma_{-1} = k_{-1} \cdot \sigma_u. \quad (2.5)$$

čia  $k_{-1} = 0,4$ , kai  $\sigma_u \leq 700MPa$  ir  $k_{-1} = 0,4 - 0,002(\sigma_u - 700)$ , kai  $\sigma_u > 700$ .

Kadangi pilnutinė deformacija  $\varepsilon$  (tamptrioji + plastinė) išlieka pastovi, daug patogiau  $\delta$  naudoti  $\varepsilon$ .

Nustatyti  $\delta$  iš stipriai grūdinamų arba minkštinamų medžiagų yra nepatogu. Todėl konstrukcinių medžiagų ilgaamžiškumas priklauso nuo ciklu ribotumo ( $N \leq (1 - 2) \cdot 10^4$ ) ir turi būti apskaičiuojamas iš priklausomybės, tai pasiūlė (M. Daunys, 1989):

$$\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}. \quad (2.6)$$

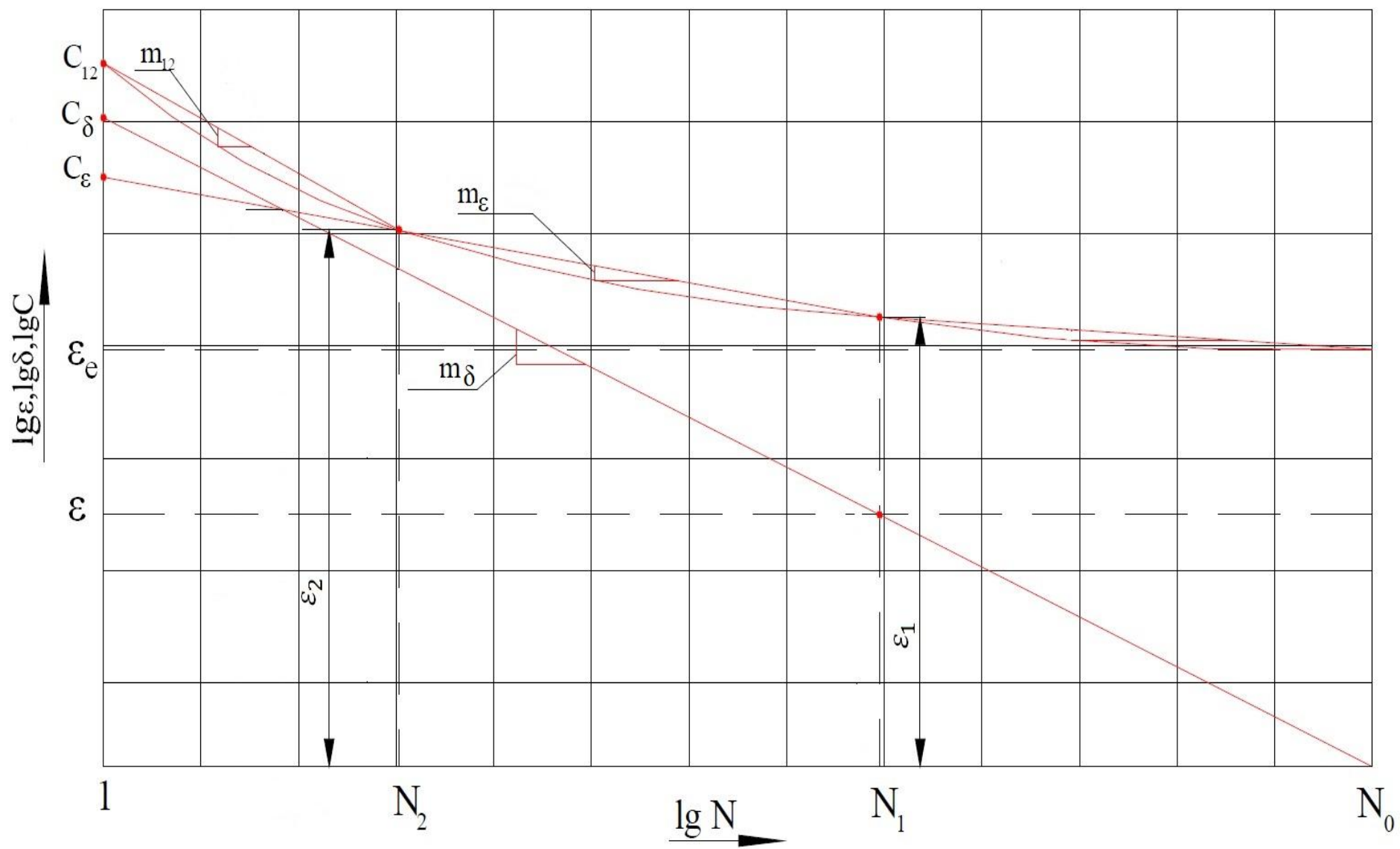
čia  $\varepsilon$  – stacionari pilnutinė ciklinė tampriai plastinė deformacija;  $C_\varepsilon$  ir  $m_\varepsilon$  – medžiagos konstantos, nustatytos iš eksperimentinių tyrimo duomenų. Neturint eksperimentinių duomenų konstantas  $C_\varepsilon$  ir  $m_\varepsilon$  galima nustatyti [1].

Dėl nuovargio trukmės nustatymo cikliniam standžiam apkrovimui eksperimentinė priklausomybė:

$$\varepsilon = C_e N_2^{-m_e} + C_\delta N_2^{-m_\delta}. \quad (2.7)$$

## 2.2. Lygties $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$ galiojimo ribų nustatymas

Lygtis (2.7) paprastai naudojama ilgaamžiškumo nustatymui esant mažacikliam standžiam apkrovimui tampriai plastinėje srityje. Lygtis (2.1) koordinatėse  $\lg\delta$ - $\lg N$  yra pavaizduota tiesia linija. Parametrų  $C_\varepsilon$  ir  $m_\varepsilon$  nustatymas iš lygties (2.5) esant mažacikliam standžiam apkrovimui pateikti darbe (Daunys, 1989). Nuovargio kreivių analizė (2.1) ir (2.5) parametrai  $C_\varepsilon$  ir  $C_\delta$  parodė, kad  $C_\varepsilon < C_\delta$  ir lygtyje (2.2) didelėse ir mažose ciklų deformacijose nėra vertinama. (2.1 pav.) Dėl šio prieštaravimo, panaikinimo diapazono taikymas iš lygties (2.5) turi būti sudarytos iki  $\varepsilon_2 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1$ .



2.1 pav. Skaičiuojamoji schema iš nuovargio kreivių parametrų.

Vėlesni tyrimai (Bražėnas, 2002) parodė, kad (2.6) lygtis gali būti naudojama apytiksliam patvarumo nustatymui ciklinių apkrovų diapazone  $(3 - 3,5)e_{pl} < \varepsilon \leq 0,026 - 0,038$ .

Iš lygties (2.2) ir (2.1 pav.) matyti, kad esant pasirinktam ciklų skaičiui  $N$  negali būti, kad  $\varepsilon$  būtų mažesnė už  $\delta$ . Kai ilgaamžiškumas aprašomas  $M$ . Daunio (2.5) lygtimi, esant ciklų skaičiui  $N_{rib}$  suminė ciklinė deformacija  $\varepsilon = \delta$  ir priklausomybė (2.2) nebegalioja (2.1 pav).

Viršutinė vertė iš lygties (2.5) galiojimo zonoje  $\varepsilon_2 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1$  ( $N_2 \leq N \leq N_1$ ) gali būti išreikšta lygtimi:

$$\varepsilon_N = \delta_N + \varepsilon_{eN}. \quad (2.7)$$

Nuovargio kreivės  $lg\varepsilon - lgN$  aproksimacija, parodyta (2.1 pav.). Tamprioji deformacijos dedamoji  $\varepsilon_{e2} = \varepsilon_N - \delta_N = C_\varepsilon N_2^{-m_\varepsilon} - C_\delta N_2^{-m_\delta}$  su sumažintu ciklų skaičiumi  $N$  ( $N_1 > N > 1$ ), padidėja pradiniam etape, pasiekia maksimalia vėtę, kai  $N = N_2$  ir kai  $N > N_2$  mažėja.

$$\frac{d \cdot \varepsilon_{eN}}{dN} = \frac{d(C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon} - C_\delta N^{-m_\delta})}{dN} = 0. \quad (2.8)$$

Kuri leidžia apskaičiuoti:

$$N_2 = \left( \frac{C_\delta \cdot m_\delta}{C_\varepsilon \cdot m_\varepsilon} \right)^{\frac{1}{m_\delta - m_\varepsilon}}. \quad (2.9)$$

Čia  $C_\varepsilon$  ir  $m_\varepsilon$  - medžiagos konstantos, nustatytos iš eksperimentinių tyrimo duomenų. Neturint eksperimentinių duomenų konstantas galima nustatyti [1]. Neturint  $C_\delta$  ir  $m_\delta$  konstantų, jas galima nustatyti [4].

### 2.3. Lygties $\varepsilon = C_{12}N^{-m_{12}}$ konstantų nustatymas, kai $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$

Vertė  $\varepsilon_2$  kuri atitinka ciklų skaičių  $N_2$  gali būti apskaičiuojama iš priklausomybės:

$$\varepsilon_2 = C_\varepsilon N_2^{-m_\varepsilon}. \quad (2.10)$$

Supaprastintas ciklinio tvarumo kreivės zonoje  $1 \leq N \leq N_1$  aprašytas lygtyje (2.5)

$$C_{12} = C_\delta + \varepsilon_{e2} \quad (2.11)$$

$$m_{12} = lg \frac{C_\varepsilon}{\varepsilon_2}$$

Lygtis (2.11) apskaičiuojamos iš (2.2) ir (2.3) priklausomybių.

Žemutinė lygties (2.6) taikymo riba nustatoma iš sąlygos:

$$\begin{cases} N_1 \leq \left(\frac{C_\varepsilon}{3e_e}\right)^{\frac{1}{m_\varepsilon}} \\ N_1 = 20000 \end{cases} \quad (2.12)$$

Ciklų skaičiaus diapazone  $N_2 \leq N \leq N_1$  parametrai  $C_\varepsilon$  ir  $m_\varepsilon$  iš lygties (2.5) turi būti nustatomi iš eksperimentinių tyrimų rezultatų.

#### 2.4. Lygties $\varepsilon = C_{10}N^{-m_{10}}$ konstantų nustatymas, kai $N > N_1$ ( $\varepsilon < \varepsilon_1$ )

Parametrai iš lygties (2.5) gali būti nustatomi iš priklausomybės, kai  $N_1 < N \leq N_0$ , įrašius į (2.5) lygtį konstantas:

$$m_{10} = \frac{\lg \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon}}{\lg \frac{N_0}{N_1}}. \quad (2.13)$$

$$C_{10} = \varepsilon_1 N_1^{m_{10}}. \quad (2.14)$$



## 2.5. Atsparumo mažacikliam suirimui tyrimo rezultatai

2.1 lentelė

Korozijai ir karščiui atsparaus plieno terminis apdorojimas, pagrindinės mechaninės, ciklinės deformavimo bei suirimo charakteristikos kambario temperatūroje

Eil. Nr.	Korozijai ir karščiui atsparus plienas	Terminis apdorojimas	Mechaninės charakteristikos				Suirimo kreivės parametrai				Ciklinio stiprumo parametrai		
			$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$C_\delta$ , %	$m_\delta$ , %	$C_\varepsilon$ , %	$m_\varepsilon$ , %	$N_1$	$N_2$	$\sigma_{-1}$ , MPa
1	0X18H10T	Atkv	526	151	72.5	0.105	-	-	-	-	-	-	-
2	0X18H10T (п.п.)	Atkv	449	228	65.0	0.135	-	-	-	-	-	-	-
3	X18H22B2T2	Atkv-Atl	777	309	40.0	0.186	188	0.692	68.8	0.475	25235	582	191
4	00H14X5M3TЮ	S 480°C	839	609	71.6	0.270	362.7	1.12	23.2	0.450	1729	236	102
5	00H14X5M3TЮ	S 560°C	1216	788	61.5	0.309	289.8	0.975	9.6	0.288	3349	841	768
6	1X17H2	Gr-Atl	913	441	55.3	0.194	181.4	0.788	18.2	0.360	14230	1343	391
7	1X17H2	Gr-Atlþ	1216	546	53.5	0.222	-	-	-	-	-	-	-
8	0X16H4Б1	Gr-Atl	918	528	64.0	0.240	377.9	0.996	23.0	0.427	3118	607	33
9	0X16H4Б1	Gr-Atlþ	1067	667	59.6	0.260	215.7	0.916	7.8	0.280	3728	1192	356
10	0X13H4МЛ	Atkh- Gr-Atl	829	360	60.9	0.176	84.46	0.746	15.1	0.360	10899	581	118
11	04-3 (0X17H)	Gr-Atl	675	402	56.7	0.146	254.1	0.797	40.2	0.482	11806	1720	270
12	08X18H10T-III	Atkv	532	110	55.2	0.189	-	-	-	-	-	-	212
13	519 (08X18H10Г3Т)	Atkv	544	104	38.6	0.135	80.24	34.7	0.646	0.442	23606	391	218
14	522 (08X18H10Г3Т)	Atkv	544	101	38.6	0.150	8.11	7.8	0.719	0.345	3899	8	218
15	156 (išilgai dendritų)	-	736	624	64.5	0.227	20.08	7.8	0.504	0.292	4232	1136	239
16	156 (skersai dendritų)	-	736	626	64.5	0.212	69.29	0.814	10.8	0.336	4577	311	239
17	157 (skersai dendritų)	-	778	628	-	0.258	38.74	0.593	11.4	0.326	3831	918	190

Eil. Nr.	Korozijai ir karščiui atsparus plienas	Terminis apdorojimas	Mechaninės charakteristikos				Suirimo kreivės parametrai				Ciklinio stiprumo parametrai		
			$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$C_\delta$ , %	$m_\delta$ , %	$C_\varepsilon$ , %	$m_\varepsilon$ , %	$N_1$	$N_2$	$\sigma_{-1}$ , MPa
18	46 (20X13II)	-	819	642	59.7	0.239	-	-	-	-	-	-	-
19	01X16H (49)	Gr	386	230	76.0	0.154	134.9	0.708	30.6	0.430	17182	1249	154
20	02X16HM	Gr-Atl	525	310	60.0	0.178	46.89	0.586	25.1	0.400	15182	224	210
21	80П (XH32ФТЮ)	Atkv-S	505	89	56.5	0.089	-	-	-	-	-	-	-
22	81П - " -	Atkv-S	505	89	56.5	0.115	222.4	0.785	37.0	0.427	56885	821	202
23	06X18H5Г9АБ (ЛЧ)	Gr	614	230	66.4	0.078	-	-	-	-	-	-	-
24	06X18H5Г9АБ (ЛЧС)	Gr-S	625	308	72.4	0.175	-	-	-	-	-	-	-
25	08X18H10Г3Т	Gr	600	170	-	0.102	-	-	-	-	-	-	-
26	XH36ТЮМ3	Atkv-S	1280	588	27.8	0.399	15.54	0.151	18.5	0.366	1774	138	972
27	XH55МВЦ	Atkv	720	140	75.0	0.074	-	-	-	-	-	-	-
28	Бр (07X16H4Б-ЭШВ)	Gr-Atl	965	520	48.4	0.269	161.2	0.673	18.5	0.364	5459	8063	125
29	Ж - " -	Gr-Atl	965	520	48.4	0.327	-	-	-	-	-	-	-
30	33 (XH55МВЦ)	Atkv	720	189	77.0	0.128	18	0.441	17.4	0.339	76842	18	259

*Atkv* - visiškas atkaitinimas; *Atkh* - homogenizacinis atkaitinimas; *Gr* - grūdinimas; *Atl<sub>p</sub>* - žemasis atleidimas; *Atl* - aukštasis atleidimas; *S* - sendinimas

Korozijai ir karščiui atsparaus plieno terminis apdorojimas, pagrindinės mechaninės, ciklinės deformavimo bei suirimo charakteristikos aukštesnėje temperatūroje

Eil. Nr.	Korozijai ir karščiui atsparus plienas	T, °C	Terminis apdorojimas	Mechaninės charakteristikos				Suirimo kreivės parametrai				Ciklinio stiprumo parametrai		
				$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$C_\delta$ , %	$m_\delta$ , %	$C_\varepsilon$ , %	$m_\varepsilon$ , %	$N_1$	$N_2$	$\sigma_{-1}$ , MPa
1	X18H22B2T2	350	Atkv-Atl	657	220	49.0	0.193	-	-	-	-	-	-	-
2	0X18H10T	350	Atkv	394	95	69.3	0.071	-	-	-	-	-	-	-
3	07X16H4B (Э)	350	G-Atl	760	435	60.0	0.270	20.1	0.450	9.7	0.338	1717	8610	212
4	08X18H10T-III	350	Atkv	355	136	52.2	0.132	9.8	0.64	4.0	0.254	8260	112	142
5	519	350	Atkv	336	119	45.0	0.106	213.1	0.916	16.5	0.415	13265	802	134
6	522	350	Atkv	336	116	45.0	0.109	-	-	-	-	-	-	-
7	05X12H2M	350	N	417	232	71.6	0.140	248.3	0.849	63.6	0.603	3926	1020	167
8	06X18H5Г9АБ (33)	350	S	556	115	61.9	0.092	-	-	-	-	-	-	-
9	- " - (400°C)	350	S	700	158	65.1	0.109	48.31	0.603	11.8	0.319	67256	1346	280
10	- " - (ЧС1000)	350	S	488	153	63.2	0.085	9.71	0.457	7.4	0.321	34225	99	195
11	- " - (ЛЧС)	350	S	535	157	61.2	0.084	207	0.838	13.7	0.388	21792	2310	214
12	08X18H10ГГ3Т	350	G	508	138	69.3	0.177	35.72	0.569	17.9	0.357	228	235	203
13	XH55МВЦ (20)	350	Atkv	545	175	68.9	0.112	-	-	-	-	-	-	-
14	- " - (59)	350	Atkv	550	254	71.3	0.142	-	-	-	-	-	-	-
15	- " - (5)	350	Atkv	565	145	65.0	0.094	-	-	-	-	-	-	-

Korozijai ir karščiui atsparaus plieno terminis apdorojimas, pagrindinės mechaninės, ciklinės deformavimo bei suirimo charakteristikos kambario temperatūroje

Eil. Nr.	Korozijai ir karščiui atsparus plienas	Terminis apdorojimas	Mechaninės charakteristikos				Suirimo kreivių parametrai		Deformacija		
			$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$C_{12}$ , %	$m_{12}$ , %	$\varepsilon_{e_2}$ , %	$\varepsilon_1$ , %	$\varepsilon_2$ , %
1	0X18H10T	Atkv	526	151	72.5	0.105	-	-	-	-	-
2	0X18H10T (п.п.)	Atkv	449	228	65.0	0.135	7.554	0.999	0.566	0.405	1.16
3	X18H22B2T2	Atkv-Atl	777	309	40.0	0.186	189.049	1.313	1.049	0.558	3.34
4	00H14X5M3TЮ	S 480°C	839	609	71.6	0.270	363.887	1.068	1.187	0.81	1.98
5	00H14X5M3TЮ	S 560°C	1216	788	61.5	0.309	290.772	0.842	0.972	0.927	1.38
6	1X17H2	Gr-Atl	913	441	55.3	0.194	182.139	1.126	0.739	0.582	1.36
7	1X17H2	Gr-Atlþ	1216	546	53.5	0.222	-	-	-	-	-
8	0X16H4B1	Gr-Atl	918	528	64.0	0.240	378.752	1.188	0.852	0.720	1.49
9	0X16H4B1	Gr-Atlþ	1067	667	59.6	0.260	216.445	0.861	0.745	0.78	1.07
10	0X13H4MJI	Atkh- Gr-Atl	829	360	60.9	0.176	85.245	0.995	0.785	0.528	1.51
11	04-3 (0X17H)	Gr-Atl	675	402	56.7	0.146	254.538	1.560	0.438	0.438	1.1
12	08X18H10T-III	Atkv	532	110	55.2	0.189	95.240	2.661	0.010	0.567	0.04
13	519 (08X18H10Г3Т)	Atkv	544	104	38.6	0.135	81.023	1.146	0.783	0.405	2.48
14	522 (08X18H10Г3Т)	Atkv	544	101	38.6	0.150	10.098	0.310	1.988	0.450	3.9
15	156 (išilgai dendritų)	-	736	624	64.5	0.227	20.501	0.892	0.421	0.681	1.01
16	156 (skersai dendritų)	-	736	626	64.5	0.212	70.212	0.838	0.922	0.636	1.56
17	157 (skersai dendritų)	-	778	628	-	0.258	39.295	0.966	0.555	0.774	1.24
18	46 (20X13III)	-	819	642	59.7	0.239	-	-	-	-	-

Eil. Nr.	Korozijai ir karščiui atsparus plienas	Terminis apdorojimas	Mechaninės charakteristikos				Suirimo kreivių parametrai		Deformacija		
			$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$C_{12}$ , %	$m_{12}$ , %	$\varepsilon_{e_2}$ , %	$\varepsilon_1$ , %	$\varepsilon_2$ , %
19	01X16H (49)	Gr	386	230	76.0	0.154	135.460	1.332	0.560	0.462	1.42
20	02X16HM	Gr-Atl	525	310	60.0	0.178	47.804	0.940	0.914	0.712	2.88
21	80П (XH32ФТЮ)	Atkv-S	505	89	56.5	0.089	-	-	-	-	-
22	81П - " -	Atkv-S	505	89	56.5	0.115	223.361	1.244	0.961	0.345	2.1
23	06X18H5Г9АБ (ЛЧ)	Gr	614	230	66.4	0.078	-	-	-	-	-
24	06X18H5Г9АБ (ЛЧС)	Gr-S	625	308	72.4	0.175	-	-	-	-	-
25	08X18H10Г3Т	Gr	600	170	-	0.102	-	-	-	-	-
26	XH36ТЮМ3	Atkv-S	1280	588	27.8	0.399	11.203	0.783	4.337	1,2	3.04
27	XH55МВЦ	Atkv	720	140	75.0	0.074	-	-	-	-	-
28	Бр (07X16H4Б-ЭШВ)	Gr-Atl	965	520	48.4	0.269	161.521	1.422	0.321	0.807	0.72
29	Ж - " -	Gr-Atl	965	520	48.4	0.327	-	-	-	-	-
30	33 (XH55МВЦ)	Atkv	720	189	77.0	0.128	19.500	0.429	1.500	0.384	6.4

*Atkv* - visiškas atkaitinimas; *Atkh* - homogenizacinis atkaitinimas; *Gr* - grūdinimas; *Atl<sub>p</sub>* - žemasis atleidimas; *Atl* - aukštasis atleidimas; *S* – sendinimas

Korozijai ir karščiui atsparaus plieno terminis apdorojimas, pagrindinēs mechaninēs, ciklinēs deformavimo bei suirimo charakteristikos aukštesnėje temperatūroje

Eil. Nr.	Korozijai ir karščiui atsparus plienas	T, °C	Terminis apdorojimas	Mechaninės charakteristikos				Suirimo kreivių parametrai		Deformacija		
				$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$C_{12}$ , %	$m_{12}$ , %	$\varepsilon_{e_2}$ , %	$\varepsilon_1$ , %	$\varepsilon_2$ , %
1	X18H22B2T2	350	Atkv-Atl	657	220	49.0	0.193	-	-	-	-	-
2	0X18H10T	350	Atkv	394	95	69.3	0.071	-	-	-	-	-
3	07X16H4Б (Э)	350	G-Atl	760	435	60.0	0.270	20.213	1.33	0.113	0.81	0,454
4	08X18H10T-III	350	Atkv	355	136	52.2	0.132	10.528	0.52	0.728	0.396	1,207
5	519	350	Atkv	336	119	45.0	0.106	213.66	1.2	0.563	0.318	1,029
6	522	350	Atkv	336	116	45.0	0.109	-	-	-	-	-
7	05X12H2M	350	N	417	232	71.6	0.140	248.58	1.81	0.283	0.420	0,976
8	06X18H5Г9АБ (33)	350	S	556	115	61.9	0.092	-	-	-	-	-
9	- " - (400ЧС)	350	S	700	158	65.1	0.109	48.868	0,99	0.558	0.327	1,185
10	- " - (ЧС1000)	350	S	488	153	63.2	0.085	10.214	0.641	0.504	0.255	1,693
11	- " - (ЛЧС)	350	S	535	157	61.2	0.084	207.36	1.3	0.364	0.252	0,679
12	08X18H10ТГ3Т	350	G	508	138	69.3	0.177	36.670	0.85	0.950	0.531	2,551
13	XH55МВЦ (20)	350	Atkv	545	175	68.9	0.112	-	-	-	-	-
14	- " - (59)	350	Atkv	550	254	71.3	0.142	-	-	-	-	-
15	- " - (5)	350	Atkv	565	145	65.0	0.094	-	-	-	-	-

*Atkv* - visiškas atkaitinimas; *N* - normalizavimas; *G* - grūdinimas; *Atl* - aukštasis atleidimas; *S* - sendinimas

## 2.6. Ekspermentinių rezultatų apdorojimas

Nuovargio kreivės  $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$  galiojimo ribos nustatymas pagal (2.9) ir (2.10) priklausomybes reikalauja daug laiko. Todėl bandyta viršutinį šios kreivės galiojimo ribos tašką  $\varepsilon_2$  nustatyti iš empirinių priklausomybių:  $\varepsilon_2 = f\left(\frac{C_\delta}{C_\varepsilon}\right)$ ,  $\varepsilon_2 = f\left(\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right)\psi\right)$ . Jos gautos apdorojant rezultatus mažiausių kvadratų metodu ir aprašomos priklausomybėmis:

2.5 lentelė

Kambario temperatūroje	Aukštesnėje temperatūroje
$\varepsilon_2 = 1,012 + 0,0046 \cdot \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right)\psi$	$\varepsilon_2 = -0,277 + 0,0034 \cdot \left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right)\psi$
$\varepsilon_2 = 2,484 - 0,0645 \cdot \left(\frac{C_\delta}{C_\varepsilon}\right)$	$\varepsilon_2 = 0,6147 - 0,0395 \cdot \left(\frac{C_\delta}{C_\varepsilon}\right)$

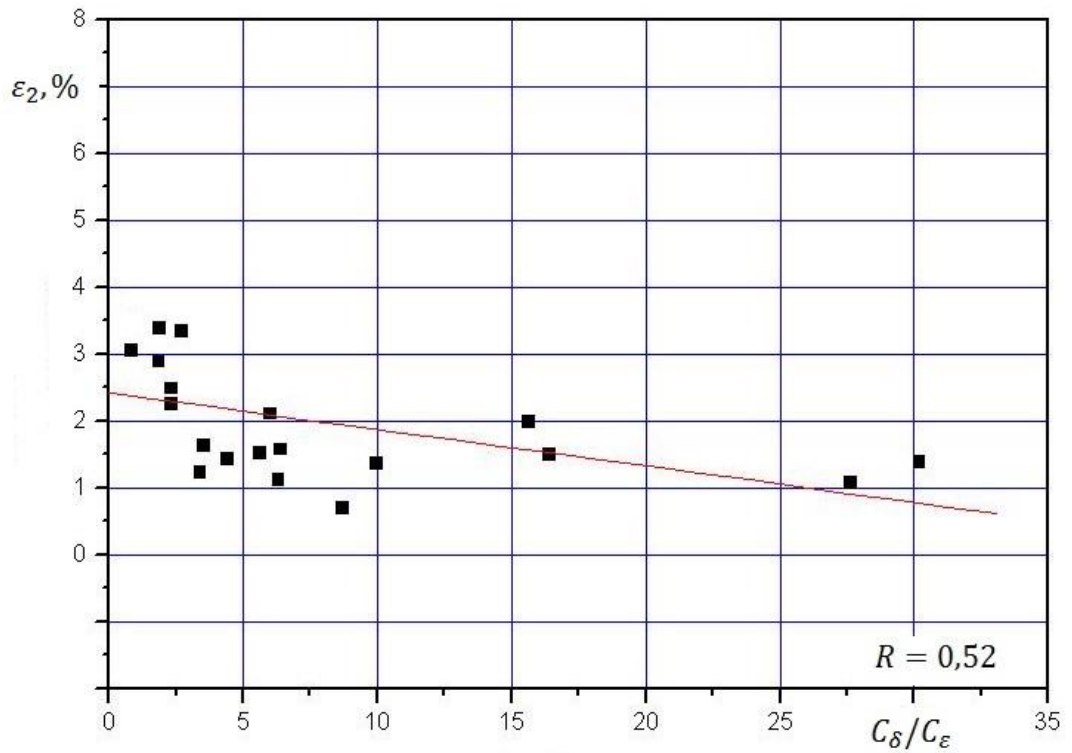
2.6 lentelė

Korozijai ir karščiui atsparių plienų, pagrindinės suirimo charakteristikos aukštesnėje ir kambario temperatūroje

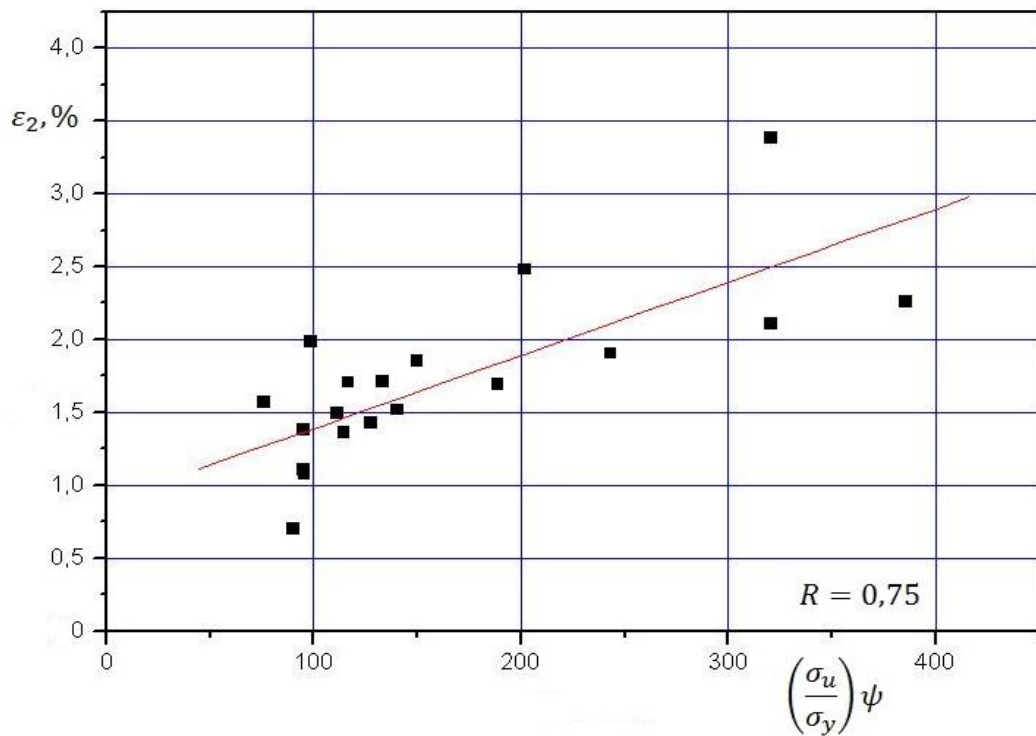
Kambario temperatūroje				
Eil. Nr.	Korozijai ir karščiui atsparus plienai	$C_\delta/C_\varepsilon$	$\varepsilon_2, \%$	$\frac{\sigma_u}{\sigma_y} \cdot \psi$
1.	X18H22B2T2	2,73	3,344	101
2.	00H14X5M3TIO	15,6	1,984	99
3.	00H14X5M3TIO	30,2	1,380	95
4.	1X17H2	9,96	1,361	114
5.	0X16H4B1	16,4	1,491	111
6.	0X16H4B1	27,6	1,073	95
7.	0X13H4MJL	5,63	1,517	140
8.	04-3 (0X17H)	6,32	1,108	95
9.	519 (08X18H10Г3Т)	2,31	2,480	202

Eil. Nr.	Korozijai ir karščiui atsparus plienai	$C_{\delta}/C_{\varepsilon}$	$\varepsilon_2, \%$	$\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right)\psi$
10.	522 (08X18H10Г3Т)	1,04	3,822	208
11.	156 (išilgai dendritų)	2,57	1	76
12.	156 (skersai dendritų)	6,41	1,57	76
13.	157 (skersai dendritų)	3,39	1,233	-
14.	01X16H (49)	4,4	1,426	128
15.	02X16HM	1,86	2,88	102
16.	81П (XH32ΦТЮ)	6,01	2,107	321
17.	XH36ТЮМ3	0,84	3,046	61
18.	Бр (07X16H4Б-ЭШВ)	8,71	0,7	90
Aukštesnėje temperatūroje				
Eil. Nr.	Korozijai ir karščiui atsparūs plienai	$C_{\delta}/C_{\varepsilon}$	$\varepsilon_2, \%$	$\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right)\psi$
1.	07X16H4Б(Э)	2,07	0,454	105
2.	08X18H10Т-Ш	2,45	1,207	136
3.	519	12,9	1,029	127
4.	522	14,4	0,061	130
5.	05X12H2M	3,9	0,976	129
6.	06X18H5Г9АБ(400ЧС)	4,09	1,185	288
7.	06X18H5Г9АБ(ЧС1000)	1,3	1,163	202
8.	06X18H5Г9АБ(ЛЧС)	15,1	0,679	209
9.	08X18H10ТГ3Т	1,99	2,551	255

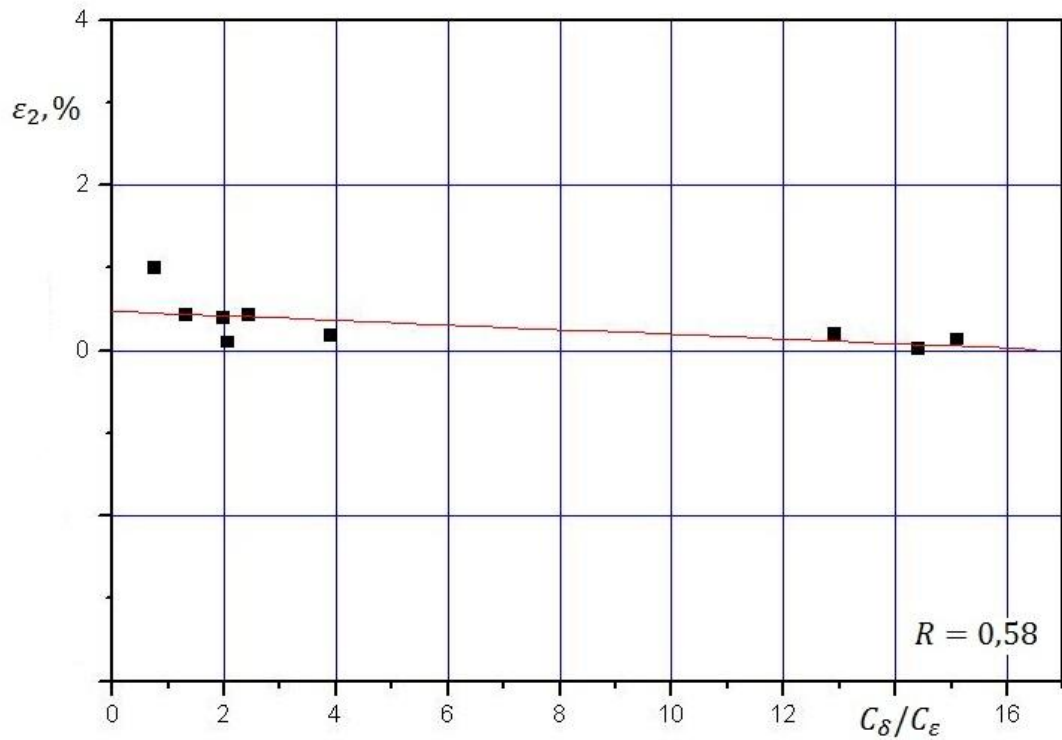




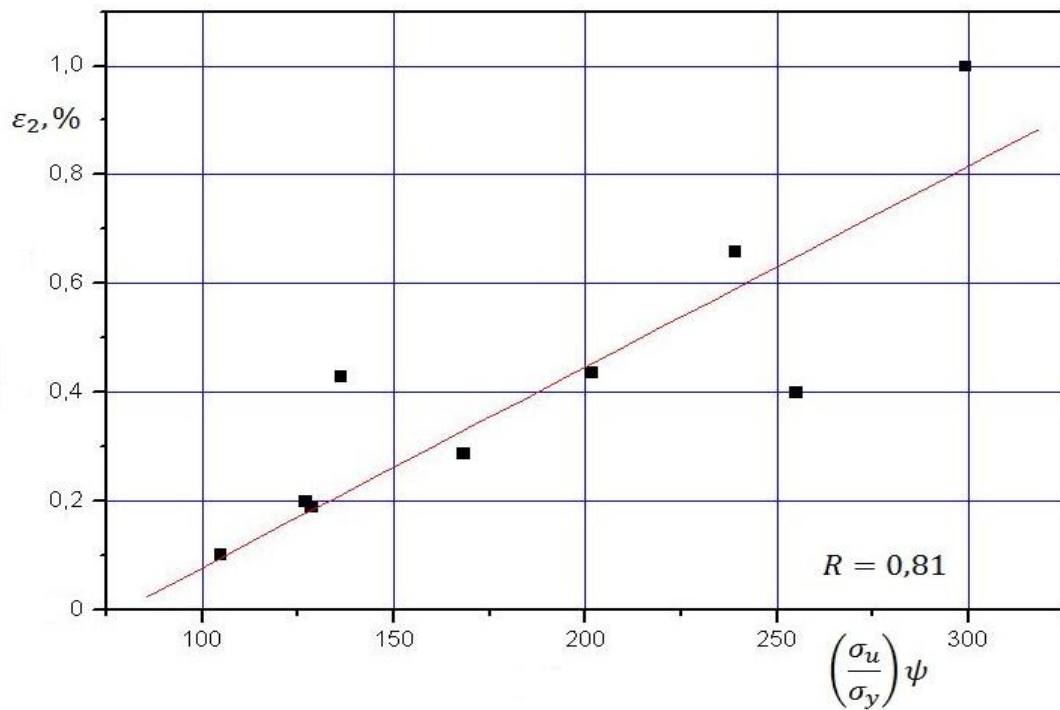
2.2 pav.  $\epsilon_2$  priklausomybė nuo konstantų ( $C_\delta/C_\epsilon$ ) santykio korozijai ir karščiui atspariems plienams kambario temperatūroje



2.3 pav.  $\epsilon_2$  priklausomybė nuo mechaninių charakteristikų  $\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right)\psi$  santykio korozijai ir karščiui atspariems plienams kambario temperatūroje



2.4 pav.  $\epsilon_2$  priklausomybė nuo konstantų ( $C_\delta/C_\epsilon$ ) santykio korozijai ir karščiui atspariems plienams aukštesnėje temperatūroje



2.5 pav.  $\epsilon_2$  priklausomybė nuo mechaninių charakteristikų  $\left(\frac{\sigma_u}{\sigma_y}\right)\psi$  santykio korozijai ir karščiui atspariems plienams aukštesnėje temperatūroje

### 3. PROGNOZUOJAMO IR EKSPERIMENTINIO ILGAAMŽIŠKUMŲ PALYGINIMAS

Romanovo, Daunio ir kitų darbuose pažymima, kad mažacikliuose bandymuose vienos medžiagos eksperimento rezultatų sklaida paprastai būna ne didesnė už dvigubą sklaidą logaritminėse koordinatėse, tačiau aukštesnėje temperatūroje ši sklaida yra didesnė. Tai paaiškinama tuo, kad eksperimentas aukštesnėje temperatūroje yra daug sudėtingesnis ir daugiau faktorių (temperatūros svyravimas ir kt.) turi įtakos eksperimento rezultatams.

Eksperimentinio ir pagal (2.9) lygybę apskaičiuoto korozijai ir karščiui atsparių plienų ilgaamžiškumų atitikimas pateiktas (3.1) lentelėje ir parodytas (3.1) paveiksluose. Šiuose paveiksluose vienas taškas atitinka viena medžiaga.

3.1 lentelė

Skaičiuoto (prognozuojamo)  $N_2^{cal}$  ir eksperimentinio  $N_2^{exp}$  ilgaamžiškumų palyginimas

Medžiagų skaičius	Bandinių skaičius, kai rezultatų sklaida tarp prognozuojamo ir eksperimentinio ilgaamžiškumų					
	4		9		16	
	vnt.	%	vnt.	%	vnt.	%
Korozijai ir karščiui atsparūs plienai normalioje temperatūroje						
21	11	52	13	61	17	81
Korozijai ir karščiui atsparūs plienai aukštesnėje temperatūroje						
9	2	60	3	66	5	88

Kai ilgaamžiškumų  $N_2^{cal}$  ir  $N_2^{exp}$  sklaida logaritminėse koordinatėse yra keturi kartai, į šią zoną patenka 52-66% korozijai ir karščiui atsparus plienai normalioje ir aukštesnėje temperatūroje, kai devyni kartai – 66-74% bandinių, o kai šešiolika kartų – 74-81% bandinių. Minėtuose intervaluose korozijai ir karščiui atsparių plienų normalioje ir aukštesnėje temperatūroje rezultatų sklaida gauta didesnė.

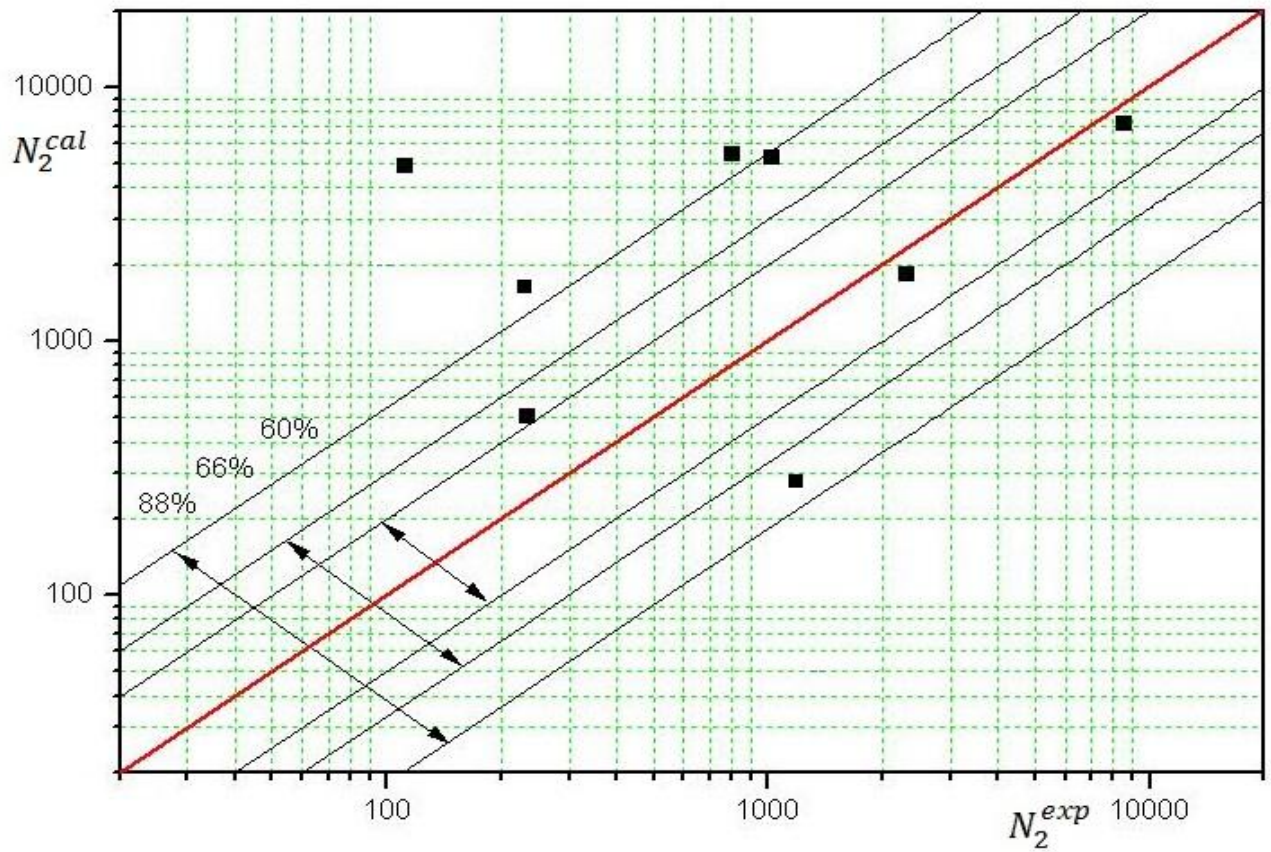
Prognozuojamo (apskaičiuoto) mažaciklio ilgaamžiškumo rezultatų sklaida 2-3 kartus didesnė už vienos medžiagos eksperimento rezultatų sklaidą mažacikliuose bandymuose, todėl pasiūlytos priklausomybės naudotinos preliminariai deformavimo diagramoms ir ilgaamžiškumui apskaičiuoti.

3.2 lentelėje pateiktos suirimo charakteristikų  $m_\varepsilon$ ,  $C_\varepsilon$  ir modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)^{\nu}$  tarpusavio priklausomybės, kurios nurodytos R. Šniuolio disertacijoje [1] bei R. Gedvilo magistro darbe [4] nurodytos suirimo charakteristikų  $m_\delta$ ,  $C_\delta$  ir modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)^{\nu}$  patikslintos tarpusavio priklausomybės.

3.2 lentelė

Suirimo charakteristikų  $m_\varepsilon$ ,  $C_\varepsilon$ ,  $m_\delta$ ,  $C_\delta$  analitinės priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)^{\nu}$  korozijai ir karščiui atspariems plienams normalioje ir aukštesnėje temperatūroje

KOROZIJAI IR KARŠČIUI ATSPARŪS PLIENAI	
Normali temperatūra	Aukštesnė temperatūra
$m_\varepsilon = 0.335 + 0.00031(\sigma_u / \sigma_y)^{\nu};$	$m_\varepsilon = 0.304 + 0.00022(\sigma_u / \sigma_y)^{\nu};$
$C_\varepsilon = 15.02 + 0.0483(\sigma_u / \sigma_y)^{\nu}.$	$C_\varepsilon = -0.6 + 0.055(\sigma_u / \sigma_y)^{\nu}.$
$C_\delta = 288.135 - 55.632(\sigma_u / \sigma_y)^{\nu}$	$C_\delta = 356.049 - 146.769(\sigma_u / \sigma_y)^{\nu}$
$m_\delta = 0.933 - 0.0938(\sigma_u / \sigma_y)^{\nu}$	$m_\delta = 1.0605 - 0.255(\sigma_u / \sigma_y)^{\nu}$



3.1 pav. Korozijai ir karščiui atsparaus plieno eksperimentinės  $N_2^{exp}$  ir skaičiuotos  $N_2^{cal}$  ciklų skaičius pagal (2.9) lygybę aukštesnėje temperatūroje.

## IŠVADOS:

1. Atlikus eksperimentinius tyrimus, gauti rezultatai parodė, kad mažaciklio nuovargio srityje ( $N_f \leq 20000 - 40000$ ) M. Daunio lygtis  $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$ , apytiksliai galioja, kai  $(3 \dots 3,5)\varepsilon_{e_{pl}} \leq \varepsilon \leq 0,026 \dots 0,038$ .
2. Lygtis  $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$  nustoja galiojusi, kai suminė ciklinė deformacija  $\varepsilon > \varepsilon_2 = \delta_k + S_k/E$ . Dėl to viršutinė ciklinės deformacijos riba, kuriai galioja anksčiau minėta lygtis, yra  $\varepsilon = \varepsilon_2$ . Žemiausia ciklinės deformacijos riba nustatoma iš sąlygos:  $\varepsilon \leq \varepsilon_1 = 3e_e$  ir  $N_1 \leq 20000$ .
3. Darbe pasiūlyta supaprastinta nuovargio kreivės  $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$  viršutinės galiojimo ribos (deformacijos  $\varepsilon_2$ ) skaičiavimo metodika, atlikus pradinių nuovargio kreivių eksperimentinių duomenų ir  $\varepsilon_2$  skaičiavimo priklausomybės analize, leidžiančia su praktikai tinkamu tikslumu nustatyti šį parametą.
4. Gauta aproksimavimo metodika lygčiai  $\varepsilon = C_\varepsilon N^{-m_\varepsilon}$ , leidžianti patikslinti nuovargio pažeidimų nustatymą visame ciklinio deformavimo intervale  $1 \leq N \leq 10^7$ .

## LITERATŪRA

1. Šniuolis R. Konstrukcinių medžiagų mažaciklio nuovargio charakteristikų priklausomybė nuo mechaninių savybių. Daktaro disertacija. Kaunas, 1999.
2. Daunys M. Ciklinis konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas: monografija/ Kauno technologijos universitetas. Kaunas: Technologija, 2005. 286 p. ISBN 9955-09-918-6.
3. Stulpinaitė A. Suirimo kreivės parametrų nustatymas įvertinant tampriąją ir plastinę deformaciją. Šiaulių universitetas. Magistro darbas. Lietuvos akademinė bibliotekų tinklas (LABT), 20040609. 2004.
4. Gedvilas R. Korozijai ir karščiui atsparaus plieno standaus apkrovimo siirimo kreivių parametrų ilgaamžiškumo nustymas. Šiaulių universitetas. Magistro darbas. Lietuvos akademinė bibliotekų tinklas (LABT), 20060607. 2006.
5. Bražėnas A. Eksperimentinės mechanikos pagrindai: vadovėlis/ Šiaulių universitetas, Kauno technologijos universitetas. Šiauliai, 2006. 166 p. ISBN 9986-38-663.
6. Даунис М. Прочность и долговечность при малоцикловом нестационарном нагружении. – Вильнюс: Мокслас, 1989. -256с
7. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Определение характеристик малоцикловой усталости материалов различных зон сварных соединений при заданных амплитудах деформаций и напряжений с учетом циклической ползучести и нестационарного нагружения. –Каунас: КПИ, 1972.-254с.
8. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Определение характеристик малоцикловой усталости металлов сварных соединений при комнатных и служебных температурах с учетом неоднородности технологических дефектов, нестационарности и деформационного старения. - Каунас: КПИ, 1976.-426с.
9. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Оценка характеристик сварных соединений при циклическом упругопластическом нагружении в условиях комнатных и повышенных температур. - Каунас: КПИ, 1978.-396с.
10. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Определение характеристик сопротивления деформированию и разрушению материалов и их сварных соединений при циклическом упруго-пластическом нагружении. Каунас: КПИ, 1980.-325с
11. Bražėnas A. Vaičiulis D. Determination of fatigue curve parameters at cyclic strain limited loading according to the mechanical characteristics of power energy structural materials. Kaunas university of technology, Panevėžys, Lithuania.

12. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – Москва, 1981. – 272с.