

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

Agnė Stulpinaitė

**SUIRIMO KREIVĖS PARAMETRŲ NUSTATYMAS ĮVERTINUS TAMPRIĄJĄ  
IR PLASTINĘ DEFORMACIJĄ**

Magistro darbas

**Vadovas**

doc. dr. R.Šniuolis

Šiauliai, 2004

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**TVIRTINU**

Katedros vedėjas

d. Z. Ramonas

2004 06

**SUIRIMO KREIVĖS PARAMETRŲ NUSTATYMAS ĮVERTINUS TAMPRIĄJĄ  
IR PLASTINĘ DEFORMACIJĄ**

Magistro darbas

**Vadovas**

doc. dr. R.Šniuolis

2004 06

**Atliko**

MM 2 gr. stud.  
A. Stulpinaitė

**Recenzentas**

prof. habil.dr. A. Bražėnas

2004 06

2004 06

Šiauliai, 2004

## SUMMARY

Stulpinaitė A. Parameters of low cycle fatigue curves according to elastic and plastic strain: Master thesis of mechanical engineer / research advisor associate professor dr. R. Šniuolis; Šiauliai University, Technological Faculty, Mechanical Engineering Department. – Šiauliai, 2004. -60p.

Parameters of fracture (parameters of low cycle fatigue curves  $m$ ,  $C$ ) are determined at homogeneous stress state and symmetric or asymmetric low cycle straining. Low cycle loading in structures appear near stress concentrators, cracks in little volumes of material which is limited of elastic strained zones. The elastic plastic loading may be in the welded joints, too. In the condition of variable loading the elastic strained metal impedes the accumulation of strain in these areas. Therefore the conditions of straining in these areas are similar to low cycle straining.

At low cycle loading lifetime depends on reduction of area  $\psi$ . Coffin's equation for calculation of constant  $C$  is not suitable for most materials and more complex equations must be used. Parameter  $C$  markedly differs from the experimental, therefore high errors occur in evaluating lifetime of the material. It is noticed in many works that parameter  $m = 0,5$  proposed by Coffin is close to experimental. Parameter  $m = 0,5$ , proposed by Coffin, is determined according the low cycle fatigue curves in coordinates  $\lg \delta - \lg N$ . In some works the total strain  $\varepsilon$  is used instead of plastic strain  $\delta$ . The difference of values of parameter  $m$  in this case is explained due to determination of it in coordinates  $\lg \varepsilon - \lg N$ . For this reason the relationship between the parameters of low cycle straining fracture curves and mechanical characteristics of structural materials is investigated in this work.

Parameters of low cycle fatigue curves  $m_p$ ,  $C_p$  for alloyed structural steels and their weld metals according to Coffin were specified and parameters  $m_e$ ,  $C_e$  according to elastic strain at low cycle straining at elevated temperature were determined. Analytic dependences of low cycle fatigue curve parameters on modified plasticity  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  were proposed, lifetime for structural steels and their weld metals at elevated temperature, when stabilized width of hysteresis loop  $\delta$  and total cyclic strain  $\varepsilon$  were used, was calculated in this work.

Statistical analysis of results of low cycle fatigue fracture parameters and modified plasticity for these materials confirmed that parameters of low cycle fatigue curves  $m_e$ ,  $C_e$ ,  $m_p$ ,  $C_p$  and modified plasticity  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  at elevated temperature are independent values, conformed according to normal distribution. The statistical evaluation has shown that linear dependencies (the results of straight – line regression adequacy was examined by Fisher's criterion) at elevated temperature exist between the main mechanical characteristics  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$ ,  $\psi$  and parameters  $m$ ,  $C$  which can be used for preliminary evaluation of lifetime for structural steels and their weld metals at low cycle straining.

Computed results were compared with experimental.

## TURINYS

SUMMARY .....	3
ĮŽANGA .....	5
1. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS ESANT MAŽACIKLIAM APKROVIMUI.....	7
1.1. Apkrovimo tipo parinkimas .....	7
1.2. Apkrovimo būdo parinkimas.....	7
1.3. Tyrimo eiga ir eksperimento rezultatų apdorojimas .....	9
1.4. Tyrimams panaudotos medžiagos .....	9
2. ATSPARUMO MAŽACIKLIAM SUIRIMUI TYRIMO REZULTATAI.....	10
2.1. Pagrindinių mechaninių charakteristikų nustatymas .....	10
2.2. Suirimo kreivių parametru nustatymas.....	10
3. CIKLINIŲ SUIRIMO KREIVIŲ PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖ NUO MECHANINIŲ SAVYBIŲ .....	20
3.1. Ryšys tarp suirimo kreivių parametru ir statinių charakteristikų .....	20
3.2. Atsparumo mažacikliam suirimui tyrimo rezultatų statistinė analizė.....	20
3.2.1. Išsiskiriančių suirimo kreivių parametru atmetimas.....	20
3.2.2. Preliminarus suirimo kreivių parametru ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybės nustatymas .....	25
3.2.3. Suirimo kreivių parametru ir modifikuoto plastiškumo atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas .....	25
3.2.4. Tyrimo rezultatų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimas .....	28
3.2.5. Suirimo kreivių parametru ir modifikuoto plastiškumo pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį tikrinimas .....	34
3.2.6. Tyrimo rezultatų koreliacinė analizė .....	39
3.2.7. Koreliacijos reikšmingumo įvertinimas tarp suirimo kreivių parametru ir modifikuoto plastiškumo. Pasikliautinis intervalas teoriniam koreliacijos koeficientui.....	42
3.2.8. Suirimo kreivių parametru ir modifikuoto plastiškumo tyrimo rezultatų regresinė analizė .....	45
3.2.9. Tiesinė regresinė analizė suirimo kreivių parametru ir modifikuoto plastiškumo atveju .....	47
3.3. Prognozuojamo ir eksperimentinio ilgaamžiškumu palyginimas .....	55
IŠVADOS .....	57
LITERATŪRA .....	58

## IŽANGA

**Darbo aktualumas.** Mašinų patikimumo, ilgaamžiškumo padidinimas ir mašinų kokybės pagerinimas negalimas detaliai neištyrus jų darbo sąlygų ir medžiagos savybių. Šiuolaikinės mašinos ir įrengimai dirba ekstremaliomis ciklinio apkrovimo sąlygomis, todėl eksploatacijos metu dažnai deformacijos ir įtempimai mašinų detalėse, konstrukciniuose elementuose bei jų suvirintuosiuose sujungimuose dažnai gerokai viršija proporcingumo ribą ir atsiranda tampriai plastinės deformacijos.

Tampriai plastinės deformacijos dažniausiai susidaro įtempimų koncentracijos vietose netinkamai parinkus detalės formą, suapvalinimo spindulius, esant dideliems presavimo įtempimams ir kt. Suvirintuosiuose sujungimuose dažni įvairūs technologiniai defektai: šlako ir oro intarpai, nesuvirinamumas, terminiai plyšiai, kurie yra įtempimų koncentracijos zonos. Mažaciklio apkrovimo atveju, netinkamai parinkus suvirinamo sujungimo medžiagas, atsiranda mechaninis nevienalytiškumas. Suvirintųjų sujungimų koncentracijų zonose metalas gali tampriai plastiškai deformuotis, tada šioje zonoje pradeda kauptis plastinės deformacijos ir atsiranda reiškiny, panašus į įtempimų koncentraciją. Be to, eksploatacijos metu dėl perkrovimų gali atsirasti nuovargio plyšiai. Išvardinti konstrukciniai, technologiniai ir eksploataciniai faktoriai turi didelę reikšmę mašinų bei konstrukcinių elementų patvarumui ir gali net keletą kartų sumažinti jų ilgaamžiškumą esant mažacikliam apkrovimui.

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

Esant mažacikliam apkrovimui, ilgaamžiškumas labai priklauso nuo santykinio skerspjūvio sumažėjimo koeficiento  $\psi$ . Iš Kofino (L. F. Coffin) lygties  $\delta N^m = C$  konstanta  $C$  (nuo jos priklauso ciklų skaičius  $N$  iki plyšio susidarymo arba suirimo) apskaičiuojama pagal lygybę  $C = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\psi}$ .

Tačiau ši lygybė daugumai medžiagų netinka ir tenka naudoti sudėtingesnes formules. Darbuose [2-19] pažymima, kad Kofino pasiūlyta konstanta  $m = 0,5$  artima eksperimentinėms. Parametras  $C$  žymiai skiriasi nuo eksperimentinio ir tai turi įtakos medžiagos ilgaamžiškumo skaičiavimo rezultatams.

Nuo medžiagų suirimo kreivių parametrų priklauso daugelio labai atsakingų konstrukcijų stiprumas ir ilgaamžiškumas, o šiems parametrams nustatyti reikia atlikti sudėtingus ir brangius bandymus. Šiame darbe pasiūlyti patikslinti legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų suirimo kreivių parametrai  $m_p$ ,  $C_p$  pagal Kofiną ir nustatyti parametrai  $m_e$ ,  $C_e$  pagal tampriąją

deformaciją aukštesnėje temperatūroje. Taip pat pasiūlytos suirimo kreivių parametrų ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybės.

**Tyrimo tikslas.** Pagal mechanines charakteristikas apskaičiuoti (prognozuoti) konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų mažaciklio suirimo kreivių parametrus aukštesnėje temperatūroje, kurie gali būti panaudoti preliminariai ilgaaamžiškumui apskaičiuoti.

**Darbo uždaviniai.** Remiantis KTU mažaciklio nuovargio laboratorijoje sukauptais mokslinio tiriamojo darbo rezultatais:

- nustatyti plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų suirimo kreivių parametrus  $m_p, C_p, m_e, C_e$  aukštesnėje temperatūroje;
- patikrinti parinktojo regresinio modelio adekvatumą;
- pasiūlyti analitines priklausomybes suirimo kreivių parametrams nustatyti pagal mechanines savybes.

**Tyrimo metodai.** Magistrinio darbo tyrimai paremti eksperimentiniais, analitiniais ir statistiniais metodais. Šiame darbe apdoroti KTU mažaciklio nuovargio laboratorijoje 1968 – 1990 metais gauti energetikoje naudojamų plienų bei jų suvirinimo siūlių medžiagų tyrimo rezultatai.

Legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų suirimo kreivių parametrams  $m_p, C_p, m_e, C_e$  aukštesnėje temperatūroje nustatyti ir patikslinti buvo sudarytos programos LabTalk programavimo kalba, panaudojus „Microcal“ kompanijos programinį paketą „Origin 4.1“.

**Tiriamojo darbo naujumas.** Išanalizavus 76 energetikoje naudojamų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų mechanines bei suirimo kreivių parametrus aukštesnėje temperatūroje, pasiūlytos priklausomybės suirimo parametrams įvertinti pagal modifikuotą plastiškumą  $(\sigma_u/\sigma_y)^\psi$ .

**Rezultatų publikavimas.** Magistrinio darbo tema buvo skaitytas pranešimas mokslinėje tarptautinėje konferencijoje „Mechanika–04“, Kaunas 2004 ir paskelbti 2 straipsniai:

1. **Šniuolis, R., Stulpinaitė, A.** Determination of Parameters of Low Cycle Fatigue Curves of Steels and their Weld Metals at Elevated Temperature. Proceeding of the International Conference „Mechanika-2004“.-Kaunas: Technologija, 2004, p.68-73.
2. **Šniuolis, R., Stulpinaitė, A., Daunys, M.** Determination of Fatigue Curves Parameters and Lifetime at Low Cycle Straining for Welded Joint Materials.-Mechanika, 2004, Nr.3 (parengta spaudai).

**Praktinis pritaikymas.** Šio darbo rezultatai gali būti panaudoti skaičiuojant energetikos, naftos ir chemijos pramonės įrengimų, taip pat kitų sunkiai apkrautų įrengimų ir konstrukcijų ilgaaamžiškumą ir patikimumą.

# 1. EKSPERIMENTINIS TYRIMAS ESANT MAŽACIKLIAM APKROVIMUI

## 1.1. Apkrovimo tipo parinkimas

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

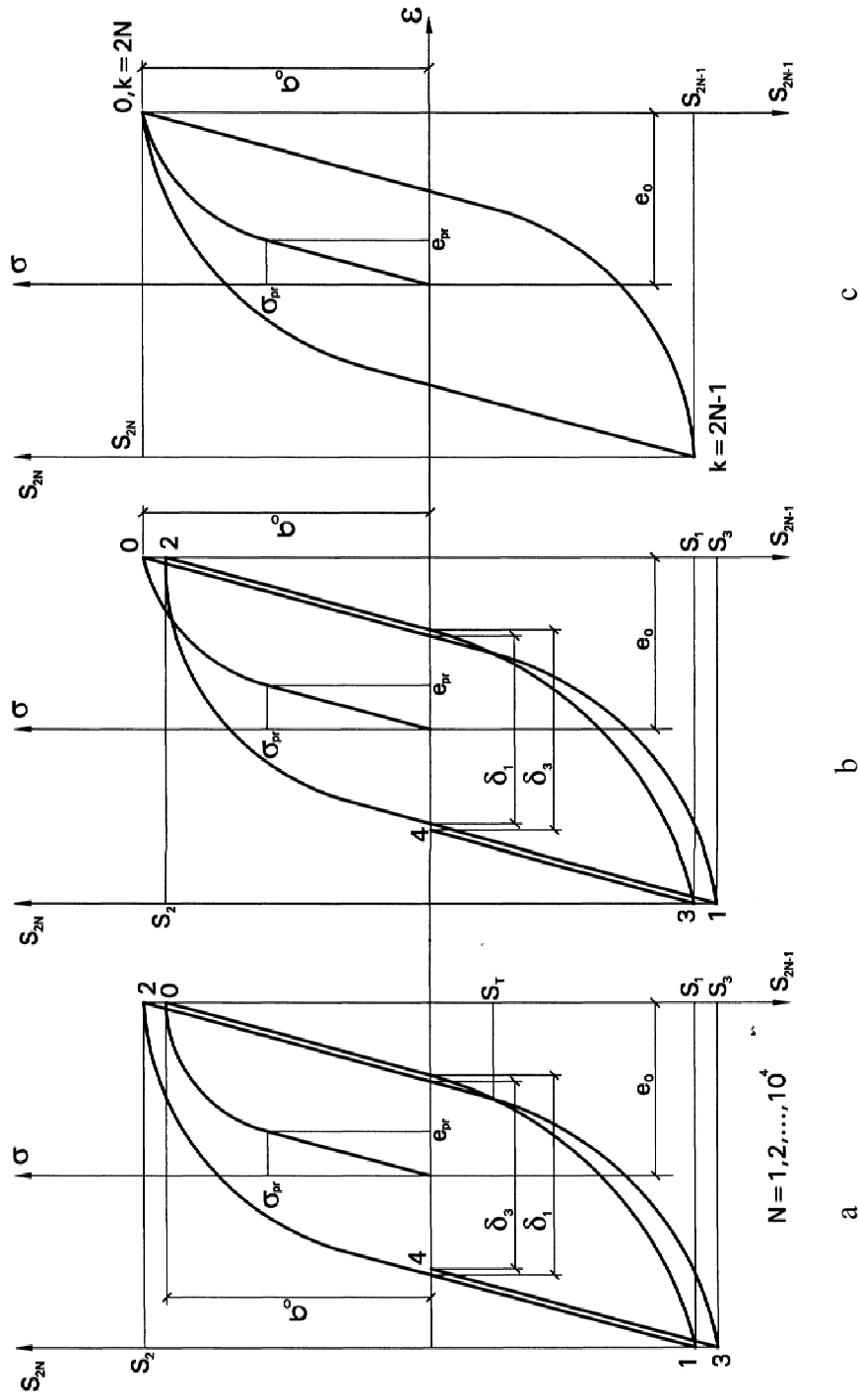
Naudojant standų apkrovimą cikliškaip stiprėjančioms ir silpnėjančioms medžiagoms, pastebimas įtempimų, tampriųjų ir plastinių deformacijų kitimas kiekviename apkrovimo cikle, t.y. stiprėjančioms medžiagoms įtempimai didėja ir histerezės kilpos plotis siaurėja; silpnėjančioms medžiagoms įtempimai mažėja ir histerezės kilpa platinėja. Stabilioms medžiagoms įtempimai ir deformacijos yra pastovūs (1.1 pav.).

Mašinų detalėse, konstrukcijose dažniausiai sutinkamas standus apkrovimas (ypač įtempimų koncentracijos, plyšių zonose), nes mažaciklės plastinės deformacijos zonos yra ribojamos tampriai deformuojamos medžiagos. Todėl pasirinktas standus 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 gniuždymas 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 standaus deformavimo diagramos esant simetriniam ciklui: *a* – stiprėjančių medžiagų; *b* – silpnėjančių medžiagų; *c* – stabilių medžiagų



### 1.3. Tyrimo eiga ir eksperimento rezultatų apdorojimas

**Bandymų atlikimas.** Esant standžiam apkrovimui įvyko nuovargis suirimas, t.y., esant atitinkamam ciklų skaičiui  $N_c$ , atsirasdavo nuovargio plyšys, o toliau deformuojant iki ciklų skaičiaus  $N_f$ , įvykdavo galutinis suirimas. Ciklų skaičius  $N_c$  atliktuose bandymuose atitinka 1 mm plyšio ilgį ant bandinio paviršiaus.

**Eksperimento rezultatų apdorojimas.** Eksperimentų metų buvo užrašytos standaus mažaciklio deformavimo diagramos ir nustatytas ciklų skaičius iki plyšio susidarymo bei bandinio suirimo. Pagal ciklų skaičių iki bandinio suirimo  $N_f$ , tampriąją deformaciją  $\varepsilon_e$  ir plastinės deformacijos amplitudę  $\delta$  buvo sudarytos mažaciklio nuovargio kreivės koordinatėse  $\lg \varepsilon_e - \lg N_f$  ir  $\lg \delta - \lg N_f$ .

### 1.4. Tyrimams panaudotos medžiagos

2.2 - 2.3 lentelėse pateiktos medžiagos, kurių tyrimo rezultatai, esant mažacikliam standžiam deformavimui aukštesnėje temperatūroje, panaudoti šiame darbe. Panaudotų medžiagų cheminė sudėtis, terminio apdirbimo režimai ir bandinių ruošinių išpjovimo schemas, atliekant bandymus aukštesnėje temperatūroje, pateikti darbuose [3–16].

KTU mažaciklio nuovargio laboratorijoje bandiniai buvo kaitinami 200-350°C temperatūrų intervale, praleidžiant elektros srovę. Detalus bandymo aprašymas aukštesnėje temperatūroje pateiktas darbe [2], o kaitinimo įrenginio, bandinio temperatūros matavimo ir reguliavimo sistemos aprašymai pateikti darbe [3].

Mažaciklio nuovargio kreivėms sudaryti  $\lg \varepsilon - \lg N_c$  ir  $\lg \delta - \lg N_f$  koordinatėse, o kartu ir suirimo charakteristikoms nustatyti Kauno technologijos universiteto mažaciklio nuovargio laboratorijoje buvo panaudota 10 – 15 bandinių.

## 2. ATSPARUMO MAŽACIKLIAM SUIRIMUI TYRIMO REZULTATAI

### 2.1. Pagrindinių mechaninių charakteristikų nustatymas

Pagrindinės mechaninės charakteristikos  $e_{pr}$ ,  $\sigma_{pr}$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$ ,  $S_k$  ir  $\psi$  buvo nustatytos atlikus tempimo bandymus aukštesnėje temperatūroje. Charakteristikos  $e_{pr}$ ,  $\sigma_{pr}$ ,  $\sigma_y$  taip pat buvo 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 sumažėjimo koeficientas  $\psi$  ir tikrieji suirimo įtempimai  $S_k$  buvo nustatyti apskaičiuavus kakliuko skerspjūvio plotą suirimo momentu.

2.2-2.3 lentelėse pateiktos mechaninės charakteristikos  $\sigma_u$ ,  $S_k$  ir  $\psi$  aukštesnėje temperatūroje, kurios dažniausiai buvo trijų tempimo bandymų vidurkiai.

### 2.2. Suirimo kreivių parametrų nustatymas

Suirimo charakteristikų (suirimo kreivių parametrų  $m_p, C_p, m_e, C_e$ ) nustatymui, esant vienalyčiam įtempimų būviui, naudojamas standus apkrovimo būdas su simetriniu arba asimetriniu ciklu. Standaus apkrovimo atveju, dėl bandinio bendros deformacijos apribojimo, eksperimento sąlygomis įvyksta cikliškai stiprėjančių, silpnėjančių ar stabilių medžiagų nuovarginis suirimas.

Suirimo charakteristikomis, esant cikliniam standžiam apkrovimui, suprantamas ilgaamžiškumas arba mažaciklio nuovargio kreivės, kurios sudaromos koordinatėse  $\lg \varepsilon - \lg N$  arba  $\lg \delta - \lg N$  pagal ciklų skaičių iki plyšio susidarymo  $N_c$  arba suirimo  $N_f$ .

Medžiagos ilgaamžiškumas, esant mažacikliam standžiam apkrovimui tampriai plastinėje srityje, apskaičiuojamas panaudojus Kofino (L.F. Coffin) lygtį [23]

$$\delta N^m = C, \quad (2.1)$$

čia  $\delta$  - plastinės deformacijos amplitudė arba histerezės kilpos plotis;  $N$  - ciklų skaičius iki plyšio susidarymo arba suirimo;  $m$  ir  $C$  - konstantos pagal galutinį suirimą, kur Kofino pasiūlyta konstanta  $m = 0,5$ ; konstantos  $C$  reikšmė nustatoma panaudojus santykinio skerspjūvio sumažėjimo koeficientą

$$\psi, \text{ tuomet } C = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\psi}.$$

Mensonas (S. S. Manson) [19], apdorojęs 29 cikliškai nestabilias medžiagas, pasiūlė priklausomybę tarp pilnutinės deformacijos (tamprioji ir plastinė) ir ciklų skaičiaus iki suirimo

$$\varepsilon = \delta_k + \varepsilon_{ek} = \left( \ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,6} N_f^{-0,6} + 3,5 \frac{\sigma_u}{E} N_f^{-0,12} . \quad (2.2)$$

Landžero (B.F. Langer) [24] darbuose siūloma analogiška priklausomybė

$$\varepsilon = \delta_k + \varepsilon_{ek} = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\psi} N_f^{-0,5} + \frac{2\sigma_{-1}}{E} . \quad (2.3)$$

kuri dažnai naudojama skaičiuojant atominių įrengimus[26].

Šiame darbe panaudota darbe [37] duota mažaciklio nuovargio kreivės lygtis

$$\varepsilon = C_e N^{-m_e} + C_p N^{-m_p} . \quad (2.4)$$

(2.1) – (2.4) lygybėse:  $\varepsilon$  - ciklinė tampriai plastinė deformacija;  $\varepsilon_{ek}$  - ciklinė tamprioji deformacija;  $\sigma_{-1}$  - simetrinio ciklo patvarumo riba;  $E$  – tamprumo modulis;  $\sigma_u$  - stiprumo riba,  $m_p, C_p, m_e, C_e$  - suirimo kreivių parametrai įvertinus tampriąją ir plastinę deformaciją.

$C = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-\psi}$  pagal Kofiną ir Landžerą;  $C = \left( \ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,6}$  pagal Mensoną.

A. Gusenkovas (A. P. Gusenkov) ir A. Romanovas (A. N. Romanov) pasiūlė konstantos C priklausomybės nustatymą plastiškiems metalams :  $C = \ln \frac{1}{1-\psi_u}$  , čia  $\psi_u$  - santykinis tolydinis

skerspjuvio susiaurėjimas tempiant. Konstanta  $m = 0,5$  neblogai tenkina bandymo rezultatus [2].

Standaus apkrovimo atveju pastebimas cikliškai stiprėjančių ir silpnėjančių medžiagų įtempimų bei tampriųjų ir plastinių deformacijų kitimas bandymo metu. Kadangi ciklinė plastinė deformacija priklauso nuo ciklų skaičiaus (išskyrus cikliškai stabilias medžiagas, kurių plastinė deformacija yra pastovi), daugelyje darbų siūloma (2.1) lygybėje priimti stabilizuotą histerezės kilpos plotį esant pusei ilgaamžiškumo iki nuovargio plyšio susidarymo tame apkrovimo lygyje. Kofino lygtyje yra nustatoma

ekvivalentinė plastinė deformacija, naudojant išraišką  $\frac{1}{k} \sum_0^k \delta_k$  . Tai sunkina skaičiavimą.

Kadangi plastinė deformacija, keičiantis ciklų skaičiui standaus apkrovimo procese, keičiasi, o pilnutinė deformacija  $\varepsilon$  (tamprioji ir plastinė) išlieka pastovi, daug patogiau vietoje  $\delta$  naudoti  $\varepsilon$ . Tada daugumos medžiagų ilgaamžiškumas tampriai plastinėje srityje (kai  $\varepsilon \geq 3e_{pr}$ ) patenkinamai aprašomas lygybe

$$\varepsilon N_f^{m_f} = C_f, \quad (2.5)$$

čia  $\varepsilon$  - stacionari pilnutinė ciklinė tampriai plastinė deformacija.

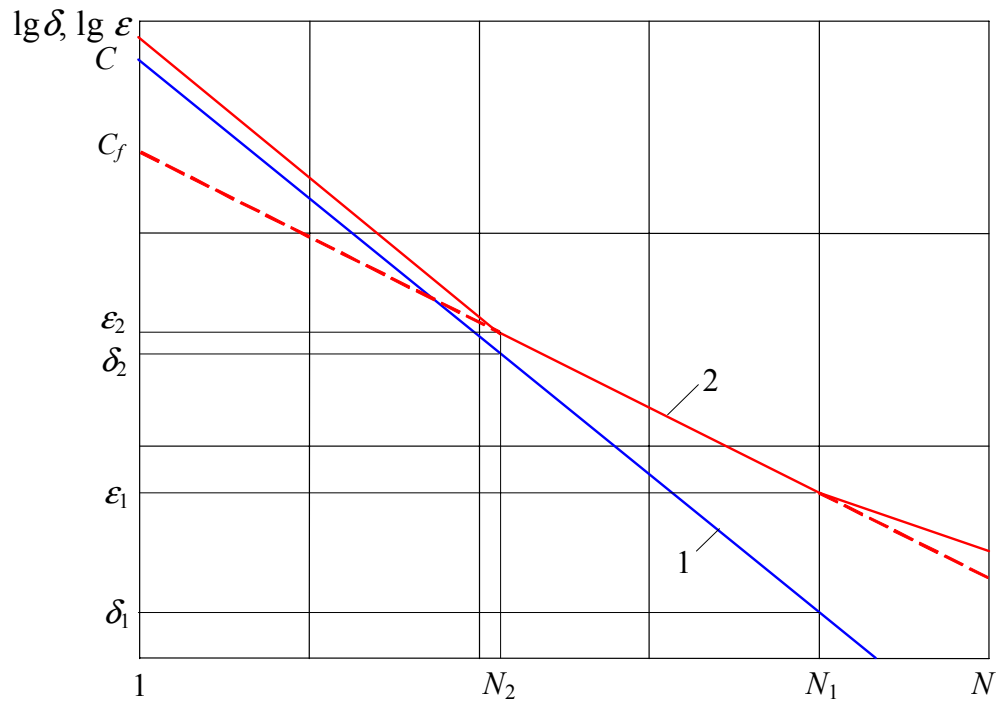
Tarp (2.1) Kofino lygties konstantų ir (2.5) lygties konstantų yra skirtumas, t.y.  $m > m_f$ ,  $C > C_f$ .

Jeigu (2.1) priklausomybė teisinga, tai nuovargio kreivę galima aproksimuoti (2.5) lygtimi tik tam tikrame ciklų skaičiaus intervale  $N_2 < N < N_1$  (2.1 pav.). Daugumai medžiagų lygtis galioja iki ciklų skaičiaus  $N_1$ , atitinkančio  $\varepsilon_1 = (3-3,5)e_{pr}$ . Žemutinei priklausomybei galiojimo riba priimtas ciklų skaičius, kuris atitinka  $\varepsilon_2 = (3-4)\%$  [38]. Kai  $N > N_1$ , histerezės kilpos plotis sumažėja, o tamprioji deformacija padidėja, todėl staigiai pradeda didėti ilgaamžiškumas ir atsiranda atsilenkimas nuo tiesinės priklausomybės koordinatėse  $lg \varepsilon - lg N$ .

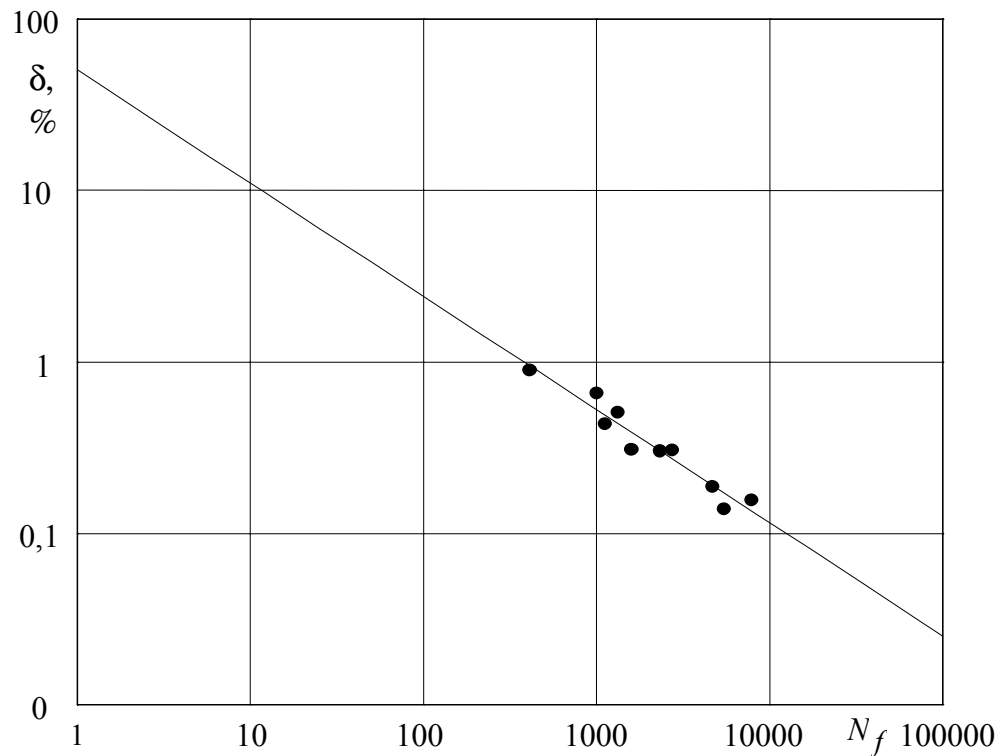
Kofino, Mensono darbuose parodyta, kad mažaciklio nuovargio kreivės, esant standžiam mažacikliam apkrovimui prie amplitudinių deformacijų du ir daugiau kartų viršijančių deformacijos proporcingumo ribą, logaritminėse koordinatėse  $lg \varepsilon - lg N_c$  arba  $lg \delta - lg N_f$  laikomos tiesėmis. Ši savybė leidžia sumažinti taškų skaičių šių tiesių sudarymui.

2.2 pav. parodyta mažaciklio nuovargio kreivės koordinatėse  $lg \delta - lg N_f$ . Konstantos  $C$  eksperimentinė reikšmė nustatoma tęsiant mažaciklio nuovargio kreivę iki  $N_f = 1$  ciklo. Parametrai  $m_p, C_p, m_e, C_e$  yra nustatyti pagal eksperimento rezultatus esant didėliam medžiagų skaičiui.

Išnagrinėtų legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų vidutinės suirimo kreivių parametrai  $m_p$  ir  $m_e$  reikšmės yra pateiktos 2.1 lentelėje. Palyginus parametro  $m_p$  reikšmę su teorine  $m = 0,5$  pagal Kofeiną, matyti, kad ji yra didesnė už 0,5 ir kinta intervale nuo 0,55 iki 0,95.



2.1 pav. Parametro  $C$  nustatymo schema: 1 – kreivė, apskaičiuota pagal (2.1) lygybę; 2 - kreivė, apskaičiuota pagal (2.5) lygybę



2.2 pav. Plieno  $1\Gamma$  suvirinimo siūlės histerezės kilpos pločio priklausomybė nuo ciklų skaičiaus iki suirimo (mažaciklio nuovargio kreivė) esant standžiam apkrovimui

Remiantis (2.5) lygtimi, darbe [25] buvo pasiūlyta lygybė mažaciklio nuovargio kreivei aprašyti esant standžiam asimetriniam apkrovimui

$$\varepsilon N_f^m = e'_f - e_m, \quad (2.6)$$

čia  $e'_f$  atitinka konstantą  $C_f$ , kai  $r_e = \frac{e_{\min}}{e_{\max}} = -1$ ;  $e_m$  - vidutinė ciklo deformacija.

2.1 lentelė

Legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų suirimo kreivių parametrų  $m_e$ ,  $m_p$  reikšmės aukštesnėje temperatūroje

Parametrai	LEGIRUOTIEJI PLIENAI		SUVIRINIMO SIŪLIŲ MEDŽIAGA	
	$m_e$	$m_p$	$m_e$	$m_p$
Variavimo amplitudė	0,05 – 0,35	0,57 – 0,95	0,06 – 0,29	0,55 – 0,93
Vidutinė reikšmė	0,19	0,77	0,14	0,73

Ekperimentinis (2.6) lygybės tikrinimas darbe [25], panaudojus dvi plienų markes ir du aliuminio lydinius, kai ciklo asimetrijos koeficientai  $r_e = -1; 0,5; 0,75$ , parodė, kad, esant ilgaamžiškumui  $N_f < 100$ , net prie  $r_e = 0,5; 0,75$  eksperimentinių taškų sklaida nuo simetrinio ciklo ( $e_m = 0$ ) mažaciklio nuovargio kreivės yra nedidelis. Kai  $N_f > 100$ , nuo šios tiesės mažai skiriasi ir teorinės kreivės, gautos pagal (2.6) lygybę. Ši išvada patvirtinta ir darbe [22], kai ciklo asimetrijos koeficientai  $r_e = -1; -0,75; -0,5$ .

Darbe [6] parodyta, kad, esant standžiam simetriniam ir asimetriniam apkrovimams ( $r_e = -1; -0,75; -0,5$ ), įtempimų ciklas deformavimo procese tampa artimas simetriniam (įtempimų asimetrijos koeficientas  $r_\sigma = -1,05$ ) ir po tam tikro ciklų skaičiaus bandinio apkrovimo sąlygos, kintant įtempimams, suvienodėja nepriklausomai nuo deformacijos ciklo asimetrijos. Vadinas, deformacijos ciklo asimetrija žymios įtakos ilgaamžiškumui neturi (standaus apkrovimo nuovargio kreivė mažai priklauso nuo ciklo asimetrijos) ir pagrindinis suirimo kriterijus, esant standžiam asimetrijos apkrovimui, yra deformacijos amplitudė  $e_a$ .

2.2 - 2.3 lentelėse pateiktos plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų suirimo charakteristikos  $m_p, C_p, m_e, C_e$  pagal plastinę ir tamprią deformacijas aukštesnėje temperatūroje.

Legiruotųjų konstrukcinių plienų terminis apdirbimas, pagrindinės mechaninės ir suirimo charakteristikos aukštesnėje temperatūroje

Eil. Nr.	Legiruotieji konstrukciniai plienai	T, °C	Terminis apdirbimas	Mechaninės charakteristikos						Suirimo kreivių parametrai			
				$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$S_k$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$C_p$ , %	$m_p$ , %	$C_e$ , %	$m_e$ , %	
1	15X2MФ	350°C	G-AtI	574	387	1265	72	0,233	-	-	-	-	-
2	22K	350°C	G-AtI	474	230	1265	73,7	0,173	-	-	-	-	-
3	22KШ (3)	350°C	N-AtI	463	130	-	-	0,101	-	-	-	-	-
4	BK-1A	350°C	N-AtI	598	188	-	66,3	0,156	32,95	0,736	5,46	0,325	
5	BK-2M	350°C	G-AtI	672	447	-	66,7	0,228	58,29	0,63	0,93	0,081	
6	Г (10Г2НМФА)	350°C	-	665	381	-	-	0,205	-	-	-	-	-
7	10XH1M (A)	200°C	G-AtI	595	335	-	54,3	0,183	202,12	0,716	0,93	0,091	
8	20Ш	350°C	N	382	86	-	-	0,067	-	-	-	-	-
9	20X2H4BФ	300°C	G-AtI	825	543	-	61,5	0,257	40,26	0,597	1,84	0,18	
10	22K-BД (ШШ)	350°C	N-AtI	477	149	-	-	0,0825	-	-	-	-	-
11	25ЛС	350°C	N-AtI	448	140	-	-	0,0714	-	-	-	-	-
12	BK-2Ш (9)	350°C	Atkh-N-G-AtI	576	360	-	-	0,184	-	-	-	-	-
13	BK-2M (ПВ)	350°C	G-3AtI	687	490	-	-	0,253	-	-	-	-	-
14	BK-2Ш (H)	200°C	2Atkh-2N-AtI	637	459	-	68,9	0,246	196,42	0,834	1,96	0,202	
15	BK-2Ш (П)	350°C	Atkh-N-G-AtI	697	348	-	54,8	0,217	130,83	0,782	4,41	0,253	
16	BK-2Ш (Л)	350°C	Atkh-N-G-AtI	600	397	-	59,4	0,189	179,03	0,813	1,42	0,152	
17	Л (25Л)	350°C	N-AtI	545	180	-	40,1	0,092	-	-	-	-	-
18	15X2MΦAA (ТСП)	350°C	G-2AtI	412	223	-	72	0,157	-	-	-	-	-
19	BK-2M (3E)	350°C	G-2AtI-S	680	240	-	68	0,127	23,59	0,57	4,6	0,296	
20	BK-2M(Л)	350°C	N-2AtI	502	480	-	59	0,243	228,09	0,889	0,94	0,102	
21	BK-2M (E)	350°C	G-AtI	875	501	-	63	0,261	142,56	0,845	2,76	0,196	

Legiruotųjų konstrukcinių plienų terminis apdirbimas, pagrindinės mechaninės ir suirimo charakteristikos aukštesnėje temperatūroje

Eil. Nr.	Legiruotieji konstrukciniai plienai	T, °C	Terminis apdirbimas	Mechaninės charakteristikos							Suirimo kreivių parametrai			
				$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$S_k$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$C_p$ , %	$m_p$ , %	$C_e$ , %	$m_e$ , %		
22	БК-2М (Г)	350°C	G-2AtI	603	254	-	59	0,144	106,17	0,828	4,85	0,304		
23	БК-2М (О)	350°C	G-3AtI	619	367	-	59	0,108	75,39	0,702	4,82	0,349		
24	БК-2Ш (Н)	350°C	G-3AtI	550	236	-	68	0,128	35,49	0,606	1,89	0,236		
25	БК-2М (ГО)	350°C	G-2AtI	660	390	-	67	0,195	160,04	0,733	4,52	0,296		
26	15Х2НМФАА	350°C	G-AtI	580	440	-	69,2	0,223	228,87	0,816	1,63	0,151		
27	15Х3НМФАА	350°C	G-3AtI	550	275	-	58	0,159	182,05	0,773	0,58	0,066		
28	15Х2МФААВУ (7-12)	350°C	G-3AtI	530	480	-	75,5	0,239	456,85	0,918	1,49	0,181		
29	19МН5 (К)	275°C	-	548	245	-	57	0,133	231,67	0,837	1,28	0,129		
30	19МН5 (К)	285°C	-	559	255	-	57	0,152	1119,7	1,075	9,52	0,404		
31	19МН5 (К)	350°C	-	480	277	-	64,4	0,147	107,8	0,791	1,36	0,173		
32	10ГН2МФА (ГЭ)	350°C	-	550	403	-	74,5	0,199	315,31	0,952	0,64	0,051		

Atkh – homogeninis atkaitinimas; N – normalizavimas; G – grūdinimas; AtI – aukštas atleidimas; S – sendinimas



2.3 lentelė

Legiruotųjų konstrukcinių plienų siūlių medžiagų terminis apdirbimas, pagrindinės mechaninės ir suirimo charakteristikos aukštesnėje temperatūroje

Eil. Nr.	Legiruotųjų konstrukcinių plienų medžiaga	T, °C	Terminis apdirbimas	Mechaninės charakteristikos							Suirimo kreivių parametrai			
				$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$S_k$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$C_p$ , %	$m_p$ , %	$C_e$ , %	$m_e$ , %		
1	22III	350°C	-	517	269	1226	67,5	0,159	-	-	-	-	-	-
2	22III	350°C	Atl	427	261	903	73,2	0,175	-	-	-	-	-	-
3	TCIII*	350°C	Atl	643	432	1216	58	0,245	-	-	-	-	-	-
4	ӘIII	350°C	N-Atl	427	192	1177	65	0,11	352,59	0,945	1,33	0,143	-	-
5	22AIII*	350°C	-	417	188	795	54,5	0,120	286,97	0,995	2,02	0,223	-	-
6	1B-8B	350°C	G-Atl	661	461	-	63,8	0,241	335,08	0,832	1,28	0,134	-	-
7	1P-7P	350°C	2Atl	593	400	-	61,3	0,221	100,12	0,764	2,13	0,216	-	-
8	8	350°C	-	566	273	-	-	0,214	-	-	-	-	-	-
9	E-B121	200°C	Atl	506	314	-	-	0,202	-	-	-	-	-	-
10	E-B121	250°C	Atl	477	257	-	-	0,134	-	-	-	-	-	-
11	E-B121	350°C	Atl	393	222	-	-	0,129	-	-	-	-	-	-
12	IIТ	300°C	-	593	380	-	-	0,174	-	-	-	-	-	-
13	1	350°C	Atl	554	289	-	56,2	0,144	258,63	0,856	2,16	0,224	-	-
14	2	350°C	Atl	552	268	-	52,6	0,143	180,77	0,778	1,07	0,112	-	-
15	BM	350°C	2Atl	511	390	-	63,9	0,179	133,43	0,792	1,24	0,182	-	-
16	E	325°C	2Atl	371	185	-	-	0,098	-	-	-	-	-	-
17	Ә	350°C	-	640	210	-	56,1	0,120	352,96	0,87	0,93	0,085	-	-
18	P	200°C	-	825	350	-	42,1	0,171	131,22	0,708	1,36	0,112	-	-
19	T11	350°C	2Atl	534	379	-	70,5	0,185	139,44	0,736	1,04	0,132	-	-
20	ИВ1	200°C	-	594	343	-	60,4	0,180	225,76	0,805	1,05	0,092	-	-
21	K	350°C	2Atl	680	332	-	56	0,156	40,18	0,633	1,04	0,128	-	-

2.3 lentelės tęsinys

Legiruotųjų konstrukcinių plienų siūlių medžiagų terminis apdirbimas, pagrindinės mechaninės ir suirimo charakteristikos aukštesnėje temperatūroje

Eil. Nr.	Legiruotųjų konstrukcinių plienų siūlių medžiaga	T, °C	Terminis apdirbimas	Mechaninės charakteristikos						Suirimo kreivių parametrai			
				$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$S_k$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$C_p$ , %	$m_p$ , %	$C_e$ , %	$m_e$ , %	
22	MH	200°C	2Atl	590	374	-	64	0,202	300,06	0,834	2,38	0,204	
23	1KII	350°C	Atl	569	320	-	67,1	0,114	16,77	0,55	1,8	0,269	
24	8MII	350°C	Atl	530	320	-	62,6	0,176	227,21	0,839	1,03	0,118	
25	A1	350°C	-	1000	363	-	34	0,208	51,58	0,914	2,14	0,162	
26	JI1T	350°C	Atl	508	253	-	24,3	0,129	289,89	1,148	2,89	0,288	
27	AIII	200°C	-	625	295	-	56,5	0,146	182,44	0,723	1,1	0,089	
28	CIII	350°C	G-2Atl	500	230	-	70	0,143	77,4	0,682	0,76	0,079	
29	H1	350°C	Atl	665	375	-	60	0,187	62,79	0,692	1,75	0,16	
30	H3	350°C	Atl	590	376	-	71	0,192	59,75	0,696	1,2	0,132	
31	MΓ	200°C	-	685	360	-	53,1	0,188	38074	0,592	1,05	0,08	
32	MH	200°C	-	750	425	-	39,4	0,218	139,43	0,927	2,47	0,173	
33	PIII	200°C	-	730	380	-	50,4	0,2	41,33	0,62	1,64	0,112	
34	IIP (17-25)	350°C	3G-2 Atl	-	325	-	70,4	0,172	-	-	-	-	
35	IIP (9-14)	350°C	G-2 Atl	625	300	-	72,3	0,123	44,77	0,606	1,16	0,146	
36	18	350°C	Atl	585	340	-	68,5	0,178	100,17	0,653	0,94	0,114	
37	1Γ	350°C	G-2 Atl	585	335	-	64,5	0,161	50,63	0,661	1,13	0,112	
38	30	350°C	Atl	600	397	-	66,5	0,253	55,53	0,711	2,47	0,208	
39	41	350°C	Atl	550	280	-	65	0,153	200,73	0,772	1,7	0,161	
40	A51, A52, A53	350°C	Atl	785	570	-	61	0,285	494,53	0,922	6,04	0,32	
41	C3	350°C	Atl-N-2 Atl	570	287	-	70	0,161	-	-	-	-	

2..3 lentelės tęsinys

Legiruotųjų konstrukcinių plienų siūlių medžiagų terminis apdirbimas, pagrindinės mechaninės ir suirimo charakteristikos aukštesnėje temperatūroje

Eil. Nr.	Legiruotųjų konstrukcinių plienų siūlių medžiaga	T, °C	Terminis apdirbimas	Mechaninės charakteristikos					Suirimo kreivių parametrai				
				$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ , MPa	$S_k$ , MPa	$\psi$ , %	$e_{pr}$ , %	$C_p$ , %	$m_p$ , %	$C_e$ , %	$m_e$ , %	
42	K	200°C	Atl	510	254	-	72	0,122	52,42	0,555	0,6	0,063	
43	P3	200°C	-	540	320	-	79	0,158	49,51	0,6	2,01	0,162	
44	III (13-18)	350°C	N- Atl	477	345	-	66	0,131	4,22	0,377	0,48	0,074	

Atkh – homogeninis atkaitinimas; N – normalizavimas; G – grūdinimas; Atl – aukštas atleidimas; S – sendinimas

### 3. CIKLINIŲ SUIRIMO KREIVIŲ PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖ NUO MECHANINIŲ SAVYBIŲ

#### 3.1. Ryšys tarp suirimo kreivių parametrų ir statinių charakteristikų

Įvairių autorių pasiūlyta priklausomybių analizė, atlikta skaičiuojant konstrukcijas ir elementus tampriai plastinio deformavimo sąlygomis, rodo, kad ilgaamžiškumo parametrai susiję priklausomybėmis, kuriose naudojamos medžiagų mechaninės charakteristikos, pvz.: didelio kiekio konstrukcinių medžiagų eksperimentiniai tyrimai parodė, kad konstanta  $m_p$  priklauso nuo medžiagos mechaninių charakteristikų [1, 2]. Kai kuriuose darbuose [34-35] buvo bandoma nustatyti ryšius tarp mechaninių ir suirimo charakteristikų (kritinio įtempimų intensyvumo koeficiento  $K_{IC}$  ir kritinės  $J$  integralo reikšmės  $J_{IC}$ ).

Šiame darbe taip pat buvo surastas kiekybinis ryšys tarp eksperimentinių (2.4) lygties konstantų (suirimo charakteristikų) ir medžiagų modifikuoto plastiškumo.

Ieškant ryšio tarp suirimo ir mechaninių charakteristikų ir šių priklausomybių  $y = f(x)$  duomenis aproksimuojančios kreivės, buvo atlikta tyrimo rezultatų statistinė analizė.

#### 3.2. Atsparumo mažacikliam suirimui tyrimo rezultatų statistinė analizė

Norint tinkamai atlikti tyrimo rezultatų analizę ir gauti matematiškai patikimas analitines priklausomybes tarp suirimo kreivių parametrų ir mechaninių charakteristikų, turi būti tenkinamos tam tikros sąlygos. Pirmoji sąlyga yra tyrimo rezultatų stochastinis (statistinis) nepriklausomumas. Antroji sąlyga - tyrimo rezultatų pasiskirstymas pagal normalųjį dėsnį. Jei ši hipotezė nepriimama, būtina nustatyti, pagal kokį dėsnį yra pasiskirstę tyrimo rezultatai, ir, jei tai įmanoma, pertvarkyti gautą pasiskirstymą į normalųjį.

Šių sąlygų tenkinimas leidžia taikyti matematinės statistikos metodus uždaviniams spręsti ir garantuoja koreliacinės regresinės analizės metodų teorinį pagrįstumą.

##### 3.2.1. Išsiskiriančių suirimo kreivių parametrų atmetimas

Prieš taikant konkretų statistinį metodą praktiniam uždaviniui, reikia patikrinti, ar tarp tyrimo duomenų nėra ryškiai išsiskiriančių. Tokia duomenų sklaida gali atsirasti dėl konstrukcinių medžiagų mechaninio nevienalytiškumo, bandinių gamybos paklaidų ir kitų priežasčių.

Ryškiai išsiskiriantiems duomenims atmesti buvo panaudotas N. Smirnovo (N. Smirnov) kriterijus [28], kuris dažnai taikomas, kai žinomi ne teoriniai parametrai, o jų įverčiai. Tyrimo rezultatai išdėstomi variacine eilute

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_n. \quad (3.1)$$

Priklausomai nuo turimų duomenų skaičiaus, apskaičiuojama vidutinė reikšmė ir vidutinis kvadratinis nuokrypis.

Esant nedideliam duomenų skaičiui ( $n < 50$ ), empirinis vidurkis

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3.2)$$

dispersijos įvertis

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right], \quad (3.3)$$

čia  $x_i$  - dydžio  $X$  reikšmės;  $n$  - duomenų skaičius.

Esant didesniai duomenų skaičiui ( $n > 50$ ), vidutinę reikšmę ir dispersiją paprasčiau apskaičiuoti sistematizuojant turimus duomenis, t.y. išdėstant tyrimo rezultatus variacine eilute pagal (3.1) lygybę. Po to tyrimo rezultatai grupuojami, suskirstant nagrinėjamos charakteristikos variavimo amplitudę

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (3.4)$$

į 7-20 vienodus intervalus ( $n > 80$ ) ir apskaičiuojant dažnumą (stebėjimų skaičių) kiekviename intervale.

Šiuo atveju empirinis vidurkis

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^e x_j n_j}{n}, \quad (3.5)$$

dispersijos įvertis

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{j=1}^e x_j^2 n_j - \frac{1}{n} \left( \sum_{j=1}^e x_j n_j \right)^2 \right], \quad (3.6)$$

čia  $x_j$  - dydžio  $X$  reikšmės  $j$  intervalo vidurio taške;  $n_j$  - dažnumas arba stebėjimų skaičius  $j$  intervale;  $e$  - intervalų skaičius.

Apskaičiuotos dydžių  $\bar{x}$  ir  $s^2$  reikšmės pagal (3.5) ir (3.6) lygybes nėra tikslios dėl duomenų grupavimo, tačiau gaunamos paklaidos nepaisoma, kai  $e > 7$  [28].

Vidutinis kvadratinis nuokrypis

$$s = \sqrt{s^2} . \quad (3.7)$$

Apskaičiuojama statistika

$$u_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s} , \quad (3.8)$$

jei abejojama dėl pirmojo variacinės eilutės nario arba

$$u_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s} , \quad (3.9)$$

jei abejojama dėl didžiausią reikšmę turinčio variacinės eilutės nario, gauta reikšmė lyginama su kritine reikšme  $u_\alpha$  [28] skaičius  $n$ .

Kai teisingos nelygybės

$$u_1 \leq u_\alpha \text{ arba } u_n \leq u_\alpha , \quad (3.10)$$

tai nulinė hipotezė - didžiausia reikšmė  $x_n$  (arba mažiausia  $x_1$ ) priklauso tai pačiai duomenų grupei - priimama, t.y. pirma arba paskutinė tyrimo rezultatų reikšmė neskaitoma ryškiai išsiskiriančia ir ji neatmetama. Tuo atveju, kai

$$u_1 > u_\alpha \text{ arba } u_n > u_\alpha , \quad (3.11)$$

nulinė hipotezė nepriimama, t.y.  $x_n$  arba  $x_1$  nėra būdingi esamai duomenų grupei ir jie atmetami. Atmetus šiuos dydžius, anksčiau apskaičiuoti įverčiai  $x$  ir  $s$  turi būti koreguojami, imant  $n-1$ .

**Smirnovo kriterijaus panaudojimas ryškiai išsiskiriančių suirimo kreivių charakteristikų atmetimui.** Čia parodytas legiruotųjų konstrukcinių plienų suirimo kreivės parametro  $C_p$  ir legiruotųjų plienų suvirinimo siūlių suirimo parametro  $C_e$  aukštesnėje temperatūroje ryškiai išsiskiriančių reikšmių atmetimas ir nulinės hipotezės - didžiausia reikšmė  $y_n$  (arba mažiausia  $y_1$ ) priklauso tai pačiai duomenų grupei ir neatmetama - tikrinimas, naudojant (3.1), (3.4)-(3.11) priklausomybes. Duomenys skaičiavimui pateikti 2.2 - 2.3 lentelėse.

Pagal grafinį vaizdą buvo atmestos mažai tikėtinos reikšmės, siekiant sumažinti dispersiją, gauti tikslesnę vidutinę reikšmę [27], taip pat siekiant koreliacinio ryšio tarp turimų duomenų, nors ir buvo teisingos (3.10) nelygybės. Šių mažai tikėtinų reikšmių buvo nedaug (2 - 5%).

Sudarytai legiruotųjų plienų suirimo parametro  $C_p$  variacinei eilutei (3.1) buvo nustatyta didžiausia reikšmė  $y_n = 1119,7$ , kuri atitiko medžiagos Nr. 30, duotą 2.3 lentelėje. Vidutinė reikšmė  $\bar{y}$  apskaičiuota remiantis (3.2) lygybe. Dispersija ir vidutinis kvadratinis nuokrypis  $s$  apskaičiuoti remiantis (3.3) ir (3.7) lygybėmis. Pagal (3.9) lygybę apskaičiuota statistika  $u$  buvo lyginama su kritine reikšme  $u_\alpha$ . Skaičiavimo rezultatai pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė

Legiruotųjų konstrukcinių plienų ryškiai išsiskiriančių suirimo parametrų  $C_p$  ir plienų suvirinimo siūlių medžiagų ryškiai išsiskiriančių suirimo parametrų  $C_e$  aukštesnėje temperatūroje atmetimo sąlygos  $u_1 > u_\alpha$  tikrinimas

Ryškiai išsiskiriantys parametrai	$y_i$	$\sum_{i=1}^n y_i$	$\sum_{i=1}^n y_i^2$	$\bar{y}$	$n$	$s^2$	$s$	$u_i$	$u_{0.05}$	Parametro atmetimas
LEGIRUOTŪJŲ PLIENŲ SUIRIMO KONSTANTA $C_p$										
28	456,85	4253,48	1964114,7	212,7	20	55763,7	236,14	1,03	2,56	Neatmesta
30	1119,7	4253,48	1964114,7	212,7	20	55763,7	236,14	3,84	2,56	Atmesta
LEGIRUOTŪJŲ PLIENŲ SIŪLIŲ MEDŽIAGOS SUIRIMO KONSTANTA $C_e$										
44	0,48	53,39	118,04	1,62	33	0,989	0,995	1,14	2,95	Neatmesta
40	6,04	53,39	118,04	1,62	33	0,989	0,995	4,45	2,95	Atmesta

Bendras medžiagų skaičius ir medžiagų skaičius po ryškiai išsiskiriančių bei mažai tikėtinų reikšmių atmetimo legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų siūlių medžiagoms aukštesnėje temperatūroje pateikti 3.2 lentelėje.

Medžiagų skaičius  $n$ , koreliacijos koeficientas  $r$  ir individualios sklaidos apie regresijos tiesę dydis  $\delta_y$  (lentelėje pažymėta  $n \frac{r}{\delta_y}$ ), esant tiesinei suirimo kreivių parametų priklausomybei nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$

Suirimo charakteristikos	Mechaninė charakteristika	Medžiagos numeris	
	$(\sigma_u/\sigma_y)\psi$	Nėra duomenų	Atmesti duomenys
LEGIRUOTIEJI KONSTRUKCINIAI PLIENAI <span style="float: right;">viso 32</span>			
$C_p$	$19 \frac{0,57}{70,20}$	$\psi$ (3, 6, 8, 10, 11, 12, 13) $C_p, m_p, C_e, m_e$ (1, 2, 17, 18)	2 (28, 30)
$m_p$	$18 \frac{0,57}{0,10}$		3 (4, 22, 30)
$C_e$	$20 \frac{0,62}{1,38}$		1 (30)
$m_e$	$20 \frac{0,57}{0,08}$		1 (30)
LEGIRUOTŲJŲ KONSTRUKCINIŲ PLIENŲ SIŪLIŲ MEDŽIAGA <span style="float: right;">viso 44</span>			
$C_p$	$30 \frac{0,40}{106,38}$	$\psi$ (8, 9, 10, 11, 12, 16) $\sigma_u/\sigma_y$ (34) $C_p, m_p, C_e, m_e$ (1, 2, 3, 41)	3 (4, 5, 17)
$m_p$	$28 \frac{0,65}{0,09}$		5 (4, 5, 17, 26, 44)
$C_e$	$31 \frac{0,56}{0,50}$		2 (40, 44)
$m_e$	$31 \frac{0,48}{0,05}$		2 (23, 40)
Skliaustuose duotas medžiagos numeris atitinka medžiagos markę 2.2 – 2.3 lentelėse			



### 3.2.2. Preliminarus suirimo kreivių parametrų ir mechaninių charakteristikų tarpusavio priklausomybės nustatymas

Suirimo kreivių parametrai  $m_p, C_p, m_e, C_e$ , kurių reikšmes žymėsime  $y$ , ir modifikuotas plastiškumas  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$ , kurio reikšmę žymėsime  $x$ , yra susieti tam tikra priklausomybe. Priklausomybės  $y = f(x)$  matematiniam modeliui surasti reikia nustatyti jos tipą (tiesinė, laipsninė, kt.)

Prenkant regresijos linijos tipą, stačiakampėje koordinačių sistemoje buvo atidėti imties  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)$  taškai. Apibudinant charakteristikų tarpusavio priklausomybę, buvo atsižvelgta į taškų išsidėstymą koreliaciniame lauke (atmetus ryškiai išsiskiriančias ir mažai tikėtinas reikšmes) ir gautas koreliacinis laukas.

Tikslios regresijos užrašymo sudėtingumas dažnai priverčia apsiriboti apytiksliu šios regresijos užrašymu. Pati paprasčiausia funkcija (tuo pačiu ir pats grubiausias regresijos  $y = f(x)$  įvertis) yra tiesinė funkcija. Todėl, atsižvelgus į taškų išsidėstymą koreliaciniame lauke, t.y. pagal konkrečios imties grafinį vaizdą, preliminariai buvo pasirinkta suirimo kreivių parametrų  $m_p, C_p, m_e, C_e$  tiesinė regresija modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  atžvilgiu. Būna įvertinti šios regresijos  $y = a + bx$  koeficientus.

Tiesinio priklausomumo laipsnis, kurį charakterizuoja koreliacijos koeficientas ir sklaidos apie regresijos tiesę dydis, pateikti 3.2 lentelėje.

### 3.2.3. Suirimo kreivių parametrų ir modifikuoto plastiškumo atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas

Suirimo kreivių parametrai ir modifikuotas plastiškumas yra atsitiktiniai dydžiai, kadangi priklauso nuo daugelio faktorių, kurių didžioji dalis yra atsitiktinio pobūdžio (temperatūriniai, mechaniniai poveikiai, nukrypimai nuo technologinio proceso ir kt.). Be to, eksperimentiškai nustatant medžiagų grupės parametrus, neišvengiamos atsitiktinės paklaidos. Todėl eksperimentų rezultatai visada yra atsitiktinio pobūdžio ir jų analizė atliekama statistiniais metodais.

Kadangi koreliacinės ir regresinės analizės metodai yra gauti ir taikomi nepriklausomų bandymų rezultatams, todėl prieš pradėdant statistiškai apdoroti tyrimo rezultatus, patikrinome, ar turimi rezultatai yra stochastiškai nepriklausomi. Minėtam uždaviniui spręsti buvo panaudoti:

**Serijų kriterijus, naudojant imties medianą** [29]. Surašius imties  $x_1, x_2, \dots, x_n$  elementus didėjimo tvarka, gaunama variacinė eilutė pagal (3.1) lygybę.

Medianos reikšmė, esant nelyginiam tyrimo rezultatų skaičiui  $n = 2m - 1$ , yra lygi vidutiniam variacinės eilutės nariui:

$$x_{0,5} = x_m. \quad (3.12)$$

Medianos reikšmė, esant lyginiam tyrimo rezultatų skaičiui  $n = 2m$ , yra lygi:

$$x_{0,5} = \frac{x_m + x_{m+1}}{2}. \quad (3.13)$$

Pradžioje turėtai imčiai  $x_1, x_2, \dots, x_n$  buvo sudaryta ženklų eilutė: vietoj  $x_i$  rašytas ženklas “+”, jei  $x_i > x_{0,5}$ , ir ženklas “-“, jei  $x_i < x_{0,5}$ . Imties nariai, lygūs medianos reikšmei, buvo praleisti. Gauta pliusų ir minusų eilutė.

Vienas paskui kitą einanti ženklų seka vadinama serija. Atskiru atveju seriją gali sudaryti vienas pliusas arba vienas minusas. Pliusų ir minusų eilutę charakterizuoja bendras serijų skaičius  $\gamma_n$  ir pačios ilgiausios serijos elementų skaičius  $\tau_n$ . Jei tyrimo rezultatai yra stochastiškai nepriklausomi, tai pliusų ir minusų kaita turi būti atsitiktinė. Todėl serijų eilutėje neturi būti labai ilgų serijų ir serijų skaičius  $\gamma_n$  neturi būti labai mažas.

Pasirinkus reikšmingumo lygmenį  $\alpha$ , turi būti tenkinamos nelygybės

$$\left. \begin{aligned} \gamma_n &> \left[ \frac{1}{2} (n+1 - z_\alpha \sqrt{n-1}) \right]; \\ \tau_n &< [3,3(\lg n + 1)]. \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

čia  $z_\alpha$  - normaliojo pasiskirstymo kvantilis [28]. Nelygybėje (3.14) laužtiniai skliaustai reiškia, kad imama sveikoji skaičiaus, esančio skliaustuose, dalis.

Jei bent viena iš (3.14) nelygybių netenkinama, tai hipotezė apie tyrimo rezultatų nepriklausomumą atmetama.

**Kylančių ir krintančių serijų kriterijus** [29]. Turimai duomenų imčiai  $x_1, x_2, \dots, x_n$  buvo sudaryta pliusų ir minusų seka:  $i$  vietoje rašytas ženklas “+”, jei  $x_{i+1} - x_i > 0$ , ir ženklas “-“, jei  $x_{i+1} - x_i < 0$ . Kai du ir daugiau vienas po kito einantys imties elementai tarpusavyje lygūs, tai imamas vienas iš jų.

Legiruotųjų konstrukcinių plienuų suirimo kreivių parametrų  $m_p$  ir  $C_p$  aukštesnėje temperatūroje atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas, naudojant imties medianą bei kylančių ir krintančių serijų kriterijus pateiktas 3.3 lentelėje. Duomenys skaičiavimui duoti 2.2 lentelėje.

3.3 lentelė

Legiruotųjų konstrukcinių plienuų suirimo kreivių parametrų  $m_p$  ir  $C_p$  aukštesnėje temperatūroje atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas, naudojant imties medianą bei kylančių ir krintančių serijų kriterijus

Serijų kriterijus, naudojant medianą										
$i$	$m_p$	$x_i - x_{0,5}$		$i$	$m_p$	$x_i - x_{0,5}$		$i$	$m_p$	$x_i - x_{0,5}$
1	0,63	-		7	0,57	-		13	0,816	+
2	0,716	-		8	0,889	+		14	0,773	-
3	0,597	-		9	0,845	+		15	0,918	+
4	0,834	+		10	0,702	-		16	0,837	+
5	0,782	+		11	0,606	-		17	0,791	+
6	0,813	+		12	0,733	-		18	0,952	+
$x_{0,5} = 0,774$ ; $\gamma = 8 > \left[ \frac{1}{2}(18+1-1,64\sqrt{18-1}) \right] = 6$ ; $\tau = 4 < [3,3(\lg 18 + 1)] = 7$										
Kylančių ir krintančių serijų kriterijus										
$i$	$C_p$	$x_{i+1} - x_i$		$i$	$C_p$	$x_{i+1} - x_i$		$i$	$C_p$	$x_{i+1} - x_i$
1	32,95	+		8	23,59	+		15	228,87	-
2	58,29	+		9	228,09	-		16	182,05	+
3	202,12	-		10	142,56	-		17	231,67	-
4	40,26	+		11	106,17	-		18	107,8	+
5	196,42	-		12	75,39	-		19	315,31	
6	130,83	+		13	35,49	+				
7	179,03	-		14	160,04	+				
$\gamma = 13 > \left[ \frac{1}{3}[2 \cdot 19 - 1] - 1,64\sqrt{(16 \cdot 19 - 29)/30} \right] = 9$ ; $\tau = 2 < \tau_k = 5$										

Paeiliui einančių plusų serijos atitinka tyrimo rezultatų reikšmių didėjimą (kylanti serija), o minusų serija – mažėjimą (krintanti serija). Jei turimi duomenys yra atsitiktiniai (tyrimo rezultatai yra nepriklausomi), gautoje ženklų sekoje serijų skaičius neturi būti labai mažas, o serijos ilgis didelis. Turimi duomenys yra atsitiktiniai, jei, esant pasirinktam reikšmingumo lygmeniui, teisinga nelygybė

$$\left. \begin{aligned} \gamma_n &> \left[ \frac{1}{3}(2n-1) - z_\alpha \sqrt{\frac{16n-29}{30}} \right]; \\ \tau_n &< \tau_k. \end{aligned} \right\}, \quad (3.15)$$

čia  $\gamma_n$  - serijų skaičius;  $\tau_n$  - didžiausias serijos ilgis;

$\tau_n = 5$ , kai ( $n \leq 26$ );  $\tau_k = 6$ , kai ( $26 \leq n \leq 153$ );  $\tau_k = 7$ , kai ( $n > 153$ ).

### 3.2.4. Tyrimo rezultatų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimas

Tiriant duomenų išsidėstymą, reikia žinoti jų pasiskirstymo dėsnius. Juos nustatėme remdamiesi eksperimento rezultatais. Sudarytam eksperimentiniam dėsniui parenkamas teorinis dėsnis ir pateikiama jo analitinė išraiška. Parinkta teorinė kreivė dažniausiai pilnai nesutampa su eksperimentine. Eksperimentinio ir teorinio pasiskirstymo sutapimas (arba neatitikimas) tikrinamas suderinamumo kriterijais. Suderinamumo kriterijai priskiriami prie neparimetrinių kriterijų, kuriems nereikalingos prielaidos apie duomenų pasiskirstymą.

Yra nemažai kriterijų, kuriais analitiniu būdu galima atlikti tyrimo rezultatų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimą. Kadangi mūsų turimų medžiagų skaičius grupėje  $n < 120$ , tai [27-33] galima rasti paprastas rekomendacijas normalumo hipotezių tikrinimui:

**Vidutinio absoliutinio nuokrypio (VAN) panaudojimas** [27]. Esant nedideliam duomenų skaičiui  $n$ , kaip sklaidos matą vidutinės reikšmės rekomenduojama naudoti vidutinį absoliutinį nuokrypį, kuris sumažina ekstremalių reikšmių įtaką. Vidutinis absoliutinis nuokrypis apskaičiuojamas pagal lygybę

$$VAN = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n}. \quad (3.16)$$

Kai tyrimo rezultatai artimi normaliajam dėsniui, turi būti tenkinama nelygybė

$$\left| \frac{VAN}{s} - 0,7979 \right| < \frac{0,4}{\sqrt{n}}, \quad (3.17)$$

čia  $s$  – empirinis vidutinis kvadratinis nuokrypis, apskaičiuotas pagal (3.7) lygybę, kai empirinė dispersija

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2. \quad (3.18)$$

**Apytikslis normalumo kriterijus** [28]. Hipotezės apie normalųjį skirstinį tikrinimui gali būti naudojami asimetrijos ir eksceso rodikliai. Tam tikslui apskaičiuojami pradiniai pasiskirstymo momentai

$$\left. \begin{aligned} h_1 = \bar{x} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^e x_j n_j; & h_3 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^e x_j^3 n_j; \\ h_2 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^e x_j^2 n_j; & h_4 &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^e x_j^4 n_j. \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

Apskaičiuojami centriniai momentai

$$\left. \begin{aligned} m_3 &= h_3 - 3h_3 h_1 + 2h_1^3; \\ m_4 &= h_4 - 4h_3 h_1 + 6h_2 h_1^2 - 3h_1^4. \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Apskaičiuojami asimetrijos ir eksceso rodikliai

$$\hat{S}_k = \frac{m_3}{s^3}; \quad (3.21)$$

$$\hat{E}_k = \frac{m_4}{s^4} - 3; \quad (3.22)$$

ir jų vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai

$$\sigma_{S_k} = \sqrt{\frac{3(n-1)}{(n+1)(n+3)}}; \quad (3.23)$$

$$\sigma_{E_k} = \sqrt{\frac{24(n-2)(n-3)n}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}}. \quad (3.24)$$

Jei absoliutinės statistikų  $\hat{S}_k$  ir  $\hat{E}_k$  reikšmės lygios arba mažesnės už savo vidutinius kvadratinius nuokrypius  $\sigma_{S_k}$  ir  $\sigma_{E_k}$ , tai hipotezė apie duomenų normalųjį pasiskirstymą neatmetama. Jei absoliučios duotų statistikų reikšmės žymiai didesnės už savo vidutinius kvadratinius nuokrypius, tai hipotezė apie normalųjį pasiskirstymą atmetama.

**Deivido kriterijus, naudojant variavimo amplitudę  $R$**  (H. A. David). Greitas duomenų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimas, kai  $3 < n < 1000$ , gali būti atliktas pagal [27] pateiktą metodą, naudojant variavimo amplitudę  $R$ .

Šiuo atveju apskaičiuotą santykį  $R/s$  lyginame su [27] lentelėje duotomis viršutinėmis ir apatinėmis kritinėmis santykio ribomis, pasirinkus hipotezės reikšmingumo lygmenį  $\alpha$ . Jei variavimo amplitudės  $R$  ir standartinio nuokrypio  $s$  santykis mažesnis už atitinkančią šį lygmenį apatinę ribą arba didesnis už atitinkančią šį lygmenį viršutinę ribą, tai, esant pasirinktam reikšmingumo lygmeniui  $\alpha$ , hipotezė apie normalųjį pasiskirstymą atmetama. Tai ypač svarbu, kai reikšmingumo lygmuo  $\alpha = 0,1$ , t.y. 10% (gretutinės) ribos [27].

**Šapiro ir Vilko suderinamumo kriterijus  $W$**  (S. S. Shapiro, M. B. Wilk) [28] naudojamas hipotezės, kad tyrimo rezultatai pasiskirstę pagal normalųjį arba logaritminį normalųjį dėsnį, tikrinimui ir yra efektyvus (su didesne tikimybe atmeta neteisingą hipotezę) tikrinant normalumą, kai duomenų skaičius nedidelis ( $n \leq 50$ ). Atliekant skaičiavimą pagal šį kriterijų, tyrimo rezultatai išdėstomi variacine eilute remiantis (3.1) lygybe.

Norint apskaičiuoti kriterijų

$$W = \frac{b^2}{S^2}, \quad (3.25)$$

nustatomi dydžiai

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}; \quad (3.26)$$

$$b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i). \quad (3.27)$$

Reikšmė  $a_{n-1+i}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ) parenkama iš lentelių [28]. Be to, jeigu  $n$  - lyginis skaičius, tai  $k = n/2$ , jeigu  $n$  nelyginis skaičius,  $k = (n-1)/2$ .

Jei teisinga nelygybė

$$W \geq W_\alpha, \quad (3.28)$$

tai hipotezė apie duomenų normalųjį pasiskirstymą neatmetama. Čia  $W_\alpha$  - kritinė Šapiro ir Vilko kriterijaus reikšmė [28], esant pasirinktam reikšmingumo lygmeniui  $\alpha$ .

**Pirsono ( $\chi^2$ ) suderinamumo kriterijus** (E. S. Pearson). Teorinio dėsnio atitikimą eksperimentiniam hipotezės tikrinimas pagal  $\chi^2$  suderinamumo kriterijų numato normaliojo dėsnio savybių panaudojimą [27]. Standartinio normaliojo pasiskirstymo kreivė

$$\varphi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} \approx 0,4e^{-z^2/2}, \quad (3.29)$$

$z = (x - a) / \sigma$  - normuotas atsitiktinis dydis su nuline vidutine reikšme ir vienetiniu standartiniu nuokrypiu. Čia  $a$  ir  $\sigma$  - normaliojo pasiskirstymo parametrai (teorinė matematinė viltis, nusakanti pasiskirstymo kreivės padėtį  $Ox$  ašies atžvilgiu ir standartinis nuokrypis teorinė atsitiktinio dydžio  $x$  dispersija. Jis nusako kreivės formą: didėjant  $\sigma$ , kreivė tampa lėkštesnė).

Naudojant  $\chi^2$  kriterijų, variavimo amplitudė sudalinama į intervalus  $e$  ir nustatomas stebėjimų dažnis. Kriterijus  $\chi^2$  apskaičiuojamas pagal lygybę

$$\chi^2 = \sum (n_j - n_{pj})^2 / n_{pj}, \quad (3.30)$$

čia  $n_j$  - stebėjimų dažnis;  $n_{pj}$  - laukiamas dažnis pagal standartinį normalųjį pasiskirstymą.

Hipotezė, kad stebėjimų dažnis turi normalųjį pasiskirstymą, tikrinama  $\chi^2$  kriterijų, apskaičiuotą pagal (3.30) lygybę, lyginant su kritine reikšme  $\chi_\alpha^2$  [28], kai reikšmingumo lygmuo  $\alpha$  ir laisvės laipsnių skaičius  $k = e_1 - m - 1$ . Čia  $e_1$  - intervalų skaičius po jų sujungimo;  $m$  - įvertinamų parametru skaičius ( $m = 2$ , kai įvertinami du parametrai:  $\bar{x}$ ;  $s$ ).

Jei teisinga nelygybė

$$\chi^2 \leq \chi_\alpha^2, \quad (3.31)$$

tai rezultatų duomenys neprieštarauja normaliojo pasiskirstymo dėsniai.

Kriterijaus  $\chi^2$  privalumas yra jo universalumas. Kriterijus taikomas visų rūšių funkcijoms  $F(x)$ , netgi nežinant jas charakterizuojančių parametru (matematinės vilties, standartinio nuokrypio ir kt.). Kriterijaus  $\chi^2$  trūkumas - pradinės informacijos praradimas dėl būtinumo grupuoti duomenis į intervalus ir juos sujungti, kai  $n_j < 5$ . Todėl rekomenduojama normalumo tikrinimą pagal  $\chi^2$  kriterijų papildyti kitais kriterijais. Tai būtina atlikti esant duomenų skaičiui  $n \leq 100$  [27,28].

$\chi^2$  kriterijus, naudojant asimetrijos ir eksceso rodiklius [28], leidžia objektyviau, nei apytikris normalumo kriterijus, nagrinėti empirinio pasiskirstymo dėsnį kaip normalųjį pasiskirstymą. Šiuo atveju abu rodikliai sujungiami į vieną statistiką

$$\chi^2 = \frac{\hat{S}_k^2}{\sigma_{S_k}^2} + \frac{\hat{E}_k^2}{\sigma_{E_k}^2}, \quad (3.32)$$

kuri lyginama su kritine reikšme [28], pasirinkus reikšmingumo lygmenį  $\alpha$  ir esant laisvės laipsnių skaičiui  $k = 2$ . Jei teisinga (3.31) nelygybė, tai hipotezė apie duomenų pasiskirstymą pagal normalųjį dėsnį neatmetama.

**Kolmogorovo ir Smirnovio suderinamumo kriterijus** (A. Kolmogorov, N. Smirnov) [27]. Kai eksperimentinis pasiskirstymo dėsnis yra pasiskirstymo funkcijos pavidalo, tai, pasirinkus teorinę pasiskirstymo funkcijos išraišką, tikrinamas jos tinkamumas eksperimentiniams rezultatams aprašyti. Šis kriterijus gerai nustato nukrypimus nuo normaliojo pasiskirstymo dėsnio, esant nedideliame duomenų skaičiui, ir yra galingesnis už  $\chi^2$  kriterijų. Remiantis Kolmogorovo ir Smirnovio kriterijumi, nesutapimas tarp teorinio ir eksperimentinio dėsnių  $D$  siūlomas skaičiuoti taip:

$$D = \frac{\max |F_{n_j} - F_{n_{pj}}|}{n}, \quad (3.33)$$

čia  $F_{n_j}$  - sukauptas stebėjimų dažnumas;  $F_{n_{pj}}$  - sukauptas laukiamas dažnumas .

Jei teisinga nelygybė

$$D \leq D_\alpha, \quad (3.34)$$

tai hipotezė apie duomenų pasiskirstymą pagal normalųjį dėsnį neatmetama.

Tikslios Kolmogorovo ir Smirnovio kriterijaus ribos, kai  $n > 30$ , nustatomos pagal Lilliforsio (H. W. Lilliefors) pasiūlytas priklausomybes:  $0,805/\sqrt{n}$  ( $\alpha = 0,10$ ) ir  $0,886/\sqrt{n}$  ( $\alpha = 0,05$ ) arba pagal [27] pateiktą metodiką.

Naudojantis šiuo kriterijumi, būtina žinoti ne tik teorinio dėsnio analitinę išraišką, bet ir dėsnį charakterizuojančius parametrus. Jeigu dėsnio parametrus surandame iš tyrimo rezultatų, mažėja priimto sprendimo patikimumas. Tai Kolmogorovo ir Smirnovio kriterijaus trūkumas [28].



**Suderinamumo kriterijus**  $\omega^2$  [28] naudojamas esant duomenų skaičiui  $50 \leq n \leq 200$  ir yra galingesnis už  $\chi^2$  kriterijų, tačiau jo taikymą apsunkina ilgas skaičiavimas. Skiriamos dvi statistikos:

*Smirnov* suderinamumo kriterijus. Tyrimo rezultatų pasiskirstymo pagal normalųjį arba logaritminį normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimui, kai dėsnį charakterizuojantys parametrai įvertinami pagal stebėjimų duomenis, naudojama Smirnov statistika, kuri apskaičiuojama pagal lygybę

$$\omega^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{i=1}^n \left[ W(x_i) - \Phi\left(\hat{z}_i\right) \right]^2. \quad (3.35)$$

Tyrimo rezultatų atitikimo normaliojo arba logaritminio normaliojo pasiskirstymo dėsniai sąlyga išreiškiama nelygybe

$$\omega^2 \left( 1 + \frac{1}{2n} \right) \leq W_\alpha^2, \quad (3.36)$$

čia  $\Phi\left(\hat{z}_i\right)$  - aplaso funkcijos reikšmė, kai  $\hat{z}_i = (x_i - \bar{x})/s$ ;  $W_\alpha^2$  - kritinė Smirnov kriterijaus reikšmė,  $W_{0,1}^2 = 0,104$ ;  $W_{0,05}^2 = 0,126$ ;  $W_{0,01}^2 = 0,178$ .

*Andersono ir Darlingo* (T. W. Anderson, D. A. Darling) suderinamumo kriterijus, esant toms pačioms sąlygoms, apskaičiuojamas pagal lygybę

$$\omega^2 = -n - 2 \sum_{i=1}^n \left\{ W(x_i) \ln \Phi\left(\hat{z}_i\right) + [1 - W(x_i)] \ln \left[ 1 - \Phi\left(\hat{z}_i\right) \right] \right\}; \quad (3.37)$$

$$\left( \omega^2 - \frac{0,7}{n} \right) \left( 1 + \frac{3,6}{n} - \frac{8}{n^2} \right) \leq A_\alpha, \quad (3.38)$$

čia  $A_{0,1} = 0,656$ ;  $A_{0,05} = 0,787$ ,  $A_{0,01} = 1,092$ .

### 3.2.5. Suirimo kreivių parametrų ir modifikuoto plastiškumo pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį tikrinimas

Kadangi toliau nagrinėjama suirimo charakteristikų  $m_p, C_p, m_e, C_e$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$ , tai pagal žemiau pateiktą skaičiavimo metodiką reikalaujama, kad šie atsitiktiniai dydžiai būtų pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį (priešingu atveju, turi būti taikomi neparimetriniai metodai). Regresinės analizės atveju šis reikalavimas reiškia, kad kiekvienai fiksuotai argumento  $x$  reikšmei priklausomas kintamasis  $Y$  būtų pasiskirstęs pagal normalųjį dėsnį.

Praktiniame darbe rekomenduojamos dvi metodikos [30]: pagal variavimo amplitudę  $R$  ir pagal  $\chi^2$  kriterijų, kur pirmoji naudojama greitam normalumo tikrinimui, o antroji - nuodugniam duomenų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį tikrinimui. Šiame darbe, be šių dviejų minėtų kriterijų, suirimo charakteristikų  $m_p, C_p, m_e, C_e$  ir modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės buvo tikrinamos panaudojus vidutinį absoliutinį nuokrypį ( $VAN$ ) bei Šapiro ir Vilko  $W$  suderinamumo kriterijų.

Šiame skirsnyje parodytas legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  aukštesnėje temperatūroje pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį tikrinimas, panaudojus vidutinį absoliutinį nuokrypį ( $VAN$ ), variavimo amplitudę  $R$  bei Pirsono ( $\chi^2$ ) suderinamumo kriterijų ir legiruotųjų konstrukcinių plienų modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  aukštesnėje temperatūroje normalumo tikrinimas, panaudojus Šapiro ir Vilko suderinamumo kriterijų  $W$ . Duomenys skaičiavimui pateikti 2.3 lentelėje.

**Vidutinio absoliutinio nuokrypio ( $VAN$ ) naudojimas.** Čia atliktas legiruotųjų konstrukcinių plienų siūlių medžiagų modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  aukštesnėje temperatūroje pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį tikrinimas, naudojant vidutinį absoliutinį nuokrypį. Pradiniai duomenys pateikti ir skaičiavimai atlikti 3.4 lentelėje.

Pagal 3.4 lentelės duomenis ir (3.16) lygybę

$$VAN = \frac{415,03}{28} = 14,82.$$

Pagal (3.18) lygybę apskaičiuotas dispersijos įvertis

$$s^2 = \frac{10447}{28-1} = 386,94.$$

Legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi = x$  aukštesnėje temperatūroje duomenys dydžiams  $\bar{x}$  ir  $s$  apskaičiuoti

Medž.	$(\sigma_u/\sigma_y)\psi, \%$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$	Medž.	$(\sigma_u/\sigma_y)\psi, \%$	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
6	91,49	-18,25	333,06	28	152,17	42,43	1800,30
7	90,75	-18,99	360,62	29	106,4	-3,34	11,16
13	107,64	-2,1	4,41	30	111,41	1,67	2,79
14	108,48	-1,26	1,59	31	101,04	-8,70	75,69
15	83,65	-26,09	680,69	32	69,53	-40,21	1616,84
18	99,18	-10,56	111,51	33	96,82	-12,92	166,93
19	99,36	-10,38	107,75	35	150,63	40,89	1671,99
20	104,41	-5,33	28,41	36	117,86	8,12	65,93
21	114,70	4,96	24,60	37	112,63	2,89	8,35
22	100,96	-8,78	77,09	38	100,50	-9,24	85,38
23	119,31	9,57	91,58	39	127,68	17,94	321,84
24	103,68	-6,06	36,72	40	84,01	-25,73	662,03
25	93,66	-16,08	258,57	42	144,57	34,83	1213,13
27	119,70	9,96	99,20	43	133,31	23,57	555,55
$n = 28;$ $\bar{x} = 3045,53/28 = 108,77;$ $\sum  x_i - \bar{x}  =  -207,53  + 207,5 = 415,03.$				Suma	3045,53	-0,03	10447,32
				Vidutinė reikšmė $\bar{x}$ apskaičiuota pagal (3.2) lygybę.			

Pagal (3.7) lygybę apskaičiuotas vidutinis kvadratinis nuokrypis

$$s = \sqrt{386,94} = 19,67.$$

Ištačius šias reikšmes į (3.17) nelygybę, gauta

$$\left| \frac{14,82}{19,67} - 0,7979 \right| < \frac{0,4}{\sqrt{28}} \quad \text{arba} \quad 0,04447 < 0,07559.$$

Vadinasi galima manyti, kad legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų modifikuotas plastiškumas  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  aukštesnėje temperatūroje yra pasiskirstęs pagal normalųjį dėsnį.

3.4 lentelėje stulpelio  $x_i - \bar{x}$  suma teoriškai turi būti lygi nuliui (pirmos eilės centrinis momentas  $m_1$ ) ir tai gali būti tarpinis skaičiavimo rezultatų patikrinimas. Tačiau, skaičiuojant dviejų ženklų tikslumu, visada gaunamos nedidelės paklaidos.

**Pirsono ( $\chi^2$ ) suderinamumo kriterijaus naudojimas.** Hipotezės apie legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  aukštesnėje temperatūroje pasiskirstymą pagal normalųjį dėsnį tikrinimas, naudojant  $\chi^2$  kriterijų ir (3.29) – (3.31) priklausomybes, pateiktas 3.5 lentelėje. Duomenys skaičiavimui duoti 2.3 lentelėje.

3.5 lentelė

Hipotezės apie konstrukcinių plienų siūlių medžiagų modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  aukštesnėje temperatūroje pasiskirstymą pagal normalųjį dėsnį tikrinimas, naudojant  $\chi^2$  kriterijų

$e$	$x_j$	$n_j$	$x_j^2$	$n_j x_j$	$n_j x_j^2$	$x_j - \bar{x}$	$\left  \frac{x_j - \bar{x}}{s} \right  = z$	$f(z)$	$f(z)k'$	$n_{pj}$	$n_j - n_{pj}$	$\frac{(n_j - n_{pj})^2}{n_{pj}}$
1	54	1	2916	54	2916	-54,4	2,30	0,028	0,58			
2	70	1	4900	70	4900	-38,4	1,63	0,106	2,15			
3	86	5	7396	430	36980	-22,4	0,95	0,254	5,16	7,89	-0,89	0,100
4	102	11	10404	1122	114444	-6,4	0,27	0,385	7,82	7,82	3,18	1,293
5	118	6	13924	708	83544	9,6	0,41	0,367	7,45	7,45	-1,45	0,282
6	134	2	17956	268	35912	25,6	1,08	0,223	4,53	6,25	-0,25	0,01
7	150	4	22500	600	90000	41,6	1,76	0,085	1,72			
			Suma	3252	368696							1,685

$x_j$  - intervalo vidutinė reikšmė, sudalinus vienodo ilgio intervalais nuo 46 iki 62; 62 iki 78; 78 iki 94; 94 iki 110; 110 iki 126, 126 iki 142, 142 iki 158.

$n_j$  - stebėjimų dažnis;

$n_{pj}$  - laukiamas dažnis pagal standartinį normalųjį pasiskirstymą;

$$\bar{x} = \frac{\sum n_j x_j}{n} = \frac{3252}{30} = 108,4;$$

$f(z)$  - [3];

$$k' = \frac{nb}{s} = \frac{30 \cdot 16}{23,62} = 20,32, \text{ čia } b \text{ – intervalo plotis;}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum n_j x_j^2 - \frac{(\sum n_j x_j)^2}{n}}{n-1}} = \sqrt{\frac{368696 - 3252^2/30}{30-1}} = 23,62$$

Vidutinė reikšmė  $\bar{x}$  apskaičiuojama pagal (3.2) lygybę, remiantis [30] pateikta skaičiavimo metodika. 3.5 lentelėje kriterijus  $\chi^2 = 1,685$ . Kai reikšmingumo lygmuo  $\alpha = 0,05$  ir laisvės laipsnių skaičius  $k = 4 - 2 - 1 = 1$ , kritinė kriterijaus reikšmė  $\chi^2_{(1;5)} = 3,841$  [5]. Čia “4”- intervalų skaičius po jų sujungimo, “2” – įvertinamų parametrų skaičius ( $\bar{x}; s$ ).

Sąlyga (3.31) tenkinama, vadinasi, rezultatų duomenys neprieštaruja normaliojo pasiskirstymo dėsniai.

**Variavimo amplitudės  $R$  naudojimas.** Atliktas legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagų modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  aukštesnėje temperatūroje pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimas, naudojant variavimo amplitudę  $R$ . Pagal 3.4 lentelės duomenis buvo nustatyta didžiausia ir mažiausia modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  reikšmė ir pagal (3.4) lygybę apskaičiuota variavimo amplitudė

$$R = 152,17 - 69,53 = 82,64.$$

Santykis

$$\frac{R}{s} = \frac{82,64}{19,67} = 4,20.$$

Kai  $n = 28$  ir  $\alpha = 0,10$ , nustatytos apatinės 3,35 ir viršutinė 4,39 ribos [30]. Santykis neišeina iš intervalo ribų, t.y.  $3,35 < 4,20 < 4,39$ , ir todėl su užsiduotu statistiniu patikimumu galima teigti, kad pagal šį kriterijų hipotezė apie legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  aukštesnėje temperatūroje pasiskirstymą pagal normalųjį dėsnį pasitvirtina.

**Šapiro ir Vilko suderinamumo kriterijaus  $W$  naudojimas.** Šapiro ir Vilko kriterijus panaudotas legiruotųjų konstrukcinių plienų siūlių medžiagų modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  aukštesnėje temperatūroje pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimui. Modifikuotas plastiškumas  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$ , išdėstytas variacine eilute pagal (3.1) lygybę, pateiktas 3.6 lentelėje.

Pagal (3.26) lygybę apskaičiuotas dydis

$$S^2 = 341706 - \frac{3045^2}{28} = 10562,25.$$

Kai  $n = 28$  ir  $k = n / 2 = 14$ , buvo parinktos reikšmės  $\alpha_{n-i+1}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, 28$ ) ir pagal (3.27) lygybę apskaičiuotas dydis  $b$ . Parinkti ir apskaičiuoti duomenys pateikti 3.7 lentelėje.

Pagal (3.25) lygybę apskaičiuotas kriterijus

$$W = \frac{99,78^2}{10562,25} = 0,943.$$

palyginus su kritine reikšme, kai  $n = 28$  ir  $\alpha = 0,05$ ,  $W_{0,05} = 0,924$  [28].

Sąlyga  $W \geq W_\alpha$  tenkinama, t.y. empirinis skirstinys (3.7 lentelė) yra pasiskirstęs pagal normalųjį dėsnį.

3.6 lentelė

Plienų siūlių medžiagų modifikuotas plastiškumas  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  aukštesnėje temperatūroje

$i$	$(\sigma_u/\sigma_y)\psi, \%$	$i$	$(\sigma_u/\sigma_y)\psi, \%$	$i$	$(\sigma_u/\sigma_y)\psi, \%$	$i$	$(\sigma_u/\sigma_y)\psi, \%$	
1	69,53	8	99,18	15	106,40	22	119,31	
2	83,65	9	99,36	16	107,64	23	119,70	
3	84,01	10	100,50	17	108,48	24	127,68	
4	90,75	11	100,96	18	111,41	25	133,31	
5	91,49	12	101,04	19	112,63	26	144,57	
6	93,66	13	103,68	20	114,70	27	150,63	
7	96,82	14	104,41	21	117,86	28	152,17	
							Suma	3045,53
							$\Sigma((\sigma_u/\sigma_y)\psi)^2 = 341706$	

3.7 lentelė

Legiruotųjų konstrukcinių plienų siūlių medžiagų modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  aukštesnėje temperatūroje pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimas, naudojant Šapiro ir Vilko suderinamumo kriterijų

$i$	$\alpha_{n-i+1}$	$(\sigma_u/\sigma_y)\psi_{n-i+1}$	$(\sigma_u/\sigma_y)\psi_i$	$b$	
1	0,4328	152,17	69,53	35,77	
2	0,2992	150,63	83,65	20,04	
3	0,2510	144,57	84,01	15,20	
4	0,2151	133,31	90,75	9,13	
5	0,1857	127,68	91,49	6,72	
6	0,1601	119,70	93,66	4,17	
7	0,1372	119,31	96,82	3,09	
8	0,1162	117,86	99,18	2,17	
9	0,0965	114,70	99,36	1,48	
10	0,0778	112,63	100,5	0,94	
11	0,0598	111,41	100,96	0,63	
12	0,0424	108,48	101,04	0,32	
13	0,0253	107,64	103,68	0,10	
14	0,0084	106,40	104,41	0,02	
				Suma	99,78

Tikrinimo rezultatai legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagoms aukštesnėje temperatūroje pateikti 3.8 lentelėje. “+” ženklas reiškia, kad duomenys pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį, “-“ ženklas reiškia, kad normaliojo pasiskirstymo nėra.

Tyrimo rezultatų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės buvo tikrinamos naudojant (3.17), (3.28), ir (3.31) nelygybes. Kritinės reikšmės nustatytos iš lentelių [28], pasirinkus  $\alpha = 0,05$ , o normalumas buvo patikrintas pagal santykį  $R/S$ , kai reikšmingumo lygmuo  $\alpha = 0,1$ .

3.8 lentelė

Suirimo parametrų ir modifikuoto plastiškumo normalumo tikrinimas aukštesnėje temperatūroje panaudojus vidutinį absoliutinį nuokrypį ( $VAN$ ), variavimo amplitudės ir dispersijos santykį  $R/S$ , Šapiro ir Vilko  $W$  kriterijų bei  $\chi^2$  kriterijų (skliaustuose)

Suirimo charakteristikos	Medžiagų skaičius $n$	$(\sigma_u/\sigma_y)\psi$			$m_p, C_p, m_e, C_e$		
		$VAN$	$R/S$	$W; (\chi^2)$	$VAN$	$R/S$	$W; (\chi^2)$
<b>LEGIRUOTIEJI KONSTRUKCINIAI PLIENAI</b>							
$m_p$	18	-	+	-	+	+	-
$C_p$	19	+	+	-	+	+	+
$m_e$	20	+	+	-	+	+	-
$C_e$	20	+	+	-	+	-	+
<b>LEGIRUOTŲJŲ KONSTRUKCINIŲ PLIENŲ SIŪLIŲ MEDŽIAGA</b>							
$m_p$	28	+	+	+	+	+	+
$C_p$	30	-	+	+	+	+	-
$m_e$	31	+	-	+	+	+	+
$C_e$	31	+	+	+	+	+	-

### 3.2.6. Tyrimo rezultatų koreliacinė analizė

Pagrindinis koreliacinės analizės uždavinys – surasti regresijos kreivę, analitiškai ją aprašyti ir atlikti gautų rezultatų statistinį įvertinimą [36]. Šis uždavinys gali būti išspręstas tiesinės priklausomybės ribose tarp normaliai pasiskirsčiusių atsitiktinių dydžių.

Kaip kiekybinis stipraus ryšio tarp atsitiktinių dydžių  $X$  ir  $Y$  įvertinimas naudojamas koreliacijos koeficientas, kuris charakterizuoja šių atsitiktinių dydžių tiesinio priklausomumo

laipsnį ir, esant atsitiktinių dydžių pasiskirstymui pagal normalųjį dėsnį, apskaičiuojamas pagal lygybę

$$r = \frac{m_{111}}{s_x s_y}, \quad (3.39)$$

čia  $m_{111}$  - mišrus centrinis momentas;  $s_x, s_y$  - atsitiktinių dydžių  $X$  ir  $Y$  vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai.

Mišrus centrinis momentas apskaičiuojamas pagal lygybę

$$m_{111} = \frac{1}{n-1} \left( \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right). \quad (3.40)$$

Atsitiktinių dydžių  $X$  ir  $Y$  dispersijos įverčiai  $s_x^2$  ir  $s_y^2$  apskaičiuojami remiantis (3.3) arba (3.12) lygybėmis.

Koreliacijos koeficientas kinta ribose  $-1 \geq r \geq 1$ . Tuo atveju, kai koreliacijos koeficientas  $r = 0$ , negalima teigti, kad nėra koreliacinės priklausomybės, t.y. ne visada reiškia, kad atsitiktiniai dydžiai yra nepriklausomi. Koreliacijos koeficientas gali būti artimas nuliui ir esant koreliuotiems atsitiktiniams dydžiams, kai tarp  $X$  ir  $Y$  nėra tiesinės priklausomybės. Koreliacijos koeficiento artėjimas prie vieneto rodo, kad tarp nagrinėjamų atsitiktinių dydžių yra beveik taisyklinga linijinė funkcinė priklausomybė ir maža atsitiktinių faktorių įtaka.

Esant teigiamoms koreliacijos koeficiento reikšmėms, didėjant vienam iš atsitiktinių dydžių, vidutiniškai didėja ir kitas. Kai koreliacijos koeficiento reikšmė  $r < 0$ , didėjant vienam iš atsitiktinių dydžių, kitas mažėja.

Koreliacijos koeficientas, kaip ir kitos charakteristikos, yra atsitiktinis dydis ir gali turėti skirtingas reikšmes, esant pakartotiniams bandymams. Atliekant nepriklausomų dydžių, kuriems teorinė koreliacijos koeficiento reikšmė  $\rho$  lygi nuliui, analizę, empirinis koreliacijos koeficientas  $r$  gali gerokai skirtis nuo nulinės reikšmės. Todėl buvo atliktas hipotezės apie koreliacijos nebuvimą tarp atsitiktinių dydžių  $X$  ir  $Y$  tikrinimas, t.y. nulinės hipotezės tikrinimas (teorinio koreliacijos koeficiento  $\rho$  lygybė nuliui pagal esamus duomenis), panaudojus Fišerio (R. A. Fisher) keitinį  $u$ . Šis keitiny parodo, kad atsitiktinio dydžio pasiskirstymą

$$u = \frac{1}{2} \ln \frac{1+r}{1-r}, \quad (3.41)$$



galima aproksimuoti normaliuoju dėsnio su matematine viltimi

$$M\{U\} = a_u = \frac{1}{2} \ln \frac{1+\rho}{1-\rho} + \frac{\rho}{2(n-1)}, \quad (3.42)$$

ir dispersija

$$D\{U\} = \sigma_u^2 = \frac{1}{n-3}. \quad (3.43)$$

Antrasis dėmuo (3.42) lygybėje visada mažas, lyginant su vidutiniu kvadratinu nuokrypiu  $\sigma_u$ , ir jį galima atmesti.

Nulinės hipotezės tikrinimas  $\rho = 0$ , esant alternatyviai  $\rho \neq 0$ , atliktas pagal (3.41) ir (3.43) lygybes apskaičiavus  $u$ ,  $\sigma_u$  ir palyginus parametą  $u$  su kritiniu, esant tikimybei  $P = 1 - \alpha/2$ . Jei tenkinama sąlyga

$$|u| \leq z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_u, \quad (3.44)$$

atsitiktiniai dydžiai yra tiesiškai vienas nuo kito nepriklausomi, t.y. buvo priimta nulinė hipotezė  $\rho = 0$ . Kai  $|u| > z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_u$  - nulinė hipotezė atmesta, nes tarp ciklinių deformavimo charakteristikų ir modifikuoto plastiškumo yra koreliacinė priklausomybė. Čia  $z_{1-\alpha/2}$  - standartinio normaliojo pasiskirstymo kvantinis parenkamas pagal lentelę [28], pasirinkus tikimybės  $P = 1 - \alpha/2$  reikšmę;  $\alpha$  - reikšmingumo lygmuo (klaidos tikimybė).

Koreliacijos koeficiento pasikliautieji intervalai nustatyti panaudojus (3.41) lygybę. Nustatant pasikliautinuosius intervalus, buvo priimtas 0,975 pasikliautiniosios tikimybės lygis.

Pasirinkus tikimybės  $P$  reikšmę arba reikšmingumo lygmenį  $\alpha = 1 - P$ , pirmiausia buvo nustatyti pasikliautinieji intervalai parametrai  $a_u$ :

$$u - z_{1-\alpha/2} \sigma_u < a_u < u + z_{1-\alpha/2} \sigma_u, \quad (3.45)$$

arba

$$u_1 < a_u < u_2, \quad (3.46)$$

čia  $u_1 = u - z_{1-\alpha/2} \sigma_u$ ;  $u_2 = u + z_{1-\alpha/2} \sigma_u$ .

Ribinėms  $u_1$  ir  $u_2$  panaudojus (3.41) lygybę pagal

$$r = \frac{e^{2u} - 1}{e^{2u} + 1}, \quad (3.47)$$

nustatytos pasikliautojo intervalo ribos teoriniam koreliacijos koeficientui su tikimybe  $1 - \alpha$  teigiant, kad koreliacijos koeficientas  $\rho$  yra intervale  $[r_1, r_2]$ , t.y.

$$r_1 < \rho < r_2. \quad (3.48)$$

### 3.2.7. Koreliacijos reikšmingumo įvertinimas tarp suirimo kreivių parametrų ir modifikuoto plastiškumo. Pasikliautinis intervalas teoriniam koreliacijos koeficientui

Šiame skirsnyje parodytas koreliacijos koeficiento reikšmingumo įvertinimas tarp suirimo parametrų ir modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)$  legiruotiesiems konstrukciniams plienams aukštesnėje temperatūroje ir 90% pasikliautinio intervalo ribų koreliacijos koeficientui nustatymas, panaudojus (3.39) – (3.48) lygybes. Bandymų rezultatų reikšmės duotos 2.3 lentelėje, o jų statistinis apdorojimas pateiktas 3.9 lentelėje.

Remiantis (3.2) lygybe ir 3.10 lentelės duomenimis, apskaičiuotos vidutinės reikšmės

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{1952}{18} = 108,44;$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} = \frac{13,804}{18} = 0,77.$$

Remiantis (3.3) ir (3.7) lygybėmis, apskaičiuoti dispersijos įverčiai ir jų vidutiniai kvadratiniai nuokrypiai

$$s_x^2 = \frac{1}{18-1} \left( 225976 - \frac{1952^2}{18} \right) = 840,73;$$

$$s_x = \sqrt{840,73} = 28,995;$$

$$s_y^2 = \frac{1}{18-1} \left( 10,799 - \frac{13,80^2}{18} \right) = 0,0125;$$

$$s_y = \sqrt{0,0125} = 0,112.$$

Pagal (3.40) lygybę apskaičiuotas mišrus centrinis momentas

$$m_{III} = \frac{1}{18-1} \left( 1466 - \frac{1952 \cdot 13,80}{18} \right) = -1,796.$$

Skaičiavimo rezultatai koreliacijos koeficiento apskaičiavimui tarp suirimo parametru ir modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)$  legiruotųjų konstrukcinių plienų aukštesnėje temperatūroje

Medž	$x_i$	$y_i$	$x_i^2$	$y_i^2$	$x_i y_i$	Medž	$x_i$	$y_i$	$x_i^2$	$y_i^2$	$x_i y_i$
5	100,20	0,630	10039,30	0,397	63,12	23	99,51	0,702	9902,69	0,493	69,86
7	96,66	0,716	9342,61	0,513	69,21	24	158,47	0,606	25114,20	0,367	96,04
9	93,36	0,597	8716,11	0,356	55,74	25	113,38	0,733	12856,07	0,537	83,11
14	95,55	0,834	9129,27	0,696	79,69	26	91,22	0,816	8320,76	0,666	74,43
15	109,60	0,782	12012,16	0,612	85,71	27	116,00	0,773	13456,00	0,598	89,67
16	89,76	0,813	8056,86	0,661	72,98	28	83,36	0,918	6949,65	0,843	76,53
19	192,67	0,570	37120,46	0,325	109,82	29	127,49	0,837	16254,69	0,701	106,71
20	61,70	0,889	3807,40	0,790	54,86	31	111,60	0,791	12453,60	0,626	88,27
21	110,03	0,845	12106,58	0,714	92,98	32	101,67	0,952	10337,79	0,906	96,79
$n = 18; \sum_{i=1}^n x_i = 1952,24; \sum_{i=1}^n y_i = 13,804; \sum_{i=1}^n x_i^2 = 225976,19; \sum_{i=1}^n y_i^2 = 10,799; \sum_{i=1}^n x_i y_i = 1465,499$											

Pagal (3.39) lygybę apskaičiuotas koreliacijos koeficientas

$$r = \frac{-1,796}{28,995 \cdot 0,112} = -0,57.$$

Tikrinant nulinę hipotezę  $\rho = 0$ , pagal (3.41) lygybę apskaičiuotas dydis

$$u = \frac{1}{2} \ln \frac{1-0,57}{1+0,57} = -0,618.$$

Pagal (3.43) lygybę apskaičiuotas vidutinis kvadratinis nuokrypis

$$\sigma_u = \frac{1}{\sqrt{18-3}} = 0,258.$$

Pasirinkus reikšmingumo lygmenį  $\alpha = 0,05$ , tikimybei  $P = 1 - \alpha/2 = 0,975$  buvo surastas kvantilis  $z_{0,975} = 1,96$  [28] ir apskaičiuota  $z_{0,975} \cdot \sigma_u = 1,96 \cdot 0,258 = 0,506$ . Šiuo atveju (3.44) sąlyga netenkinama, kadangi  $|u| = 0,618 > z_{0,975} \cdot \sigma_u = 0,506$ , t.y. nulinė hipotezė atmetama, ir tai rodo, kad tarp suirimo parametro  $m_p$  ir modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)$  yra koreliacinis ryšys.

Pasikliautinis intervalas koreliacijos koeficientui su pasiklivimo tikimybe  $P = 1 - \alpha = 0,9$  nustatytas radus kvantilį  $z_{1-\alpha/2} = z_{0,95} = 1,64$  [28] ir pagal (3.45) lygybę apskaičiavus intervalo ribas statistika  $a_u$  :

$$-0,618 - 1,64 \cdot 0,258 < a_u < -0,618 + 1,64 \cdot 0,258$$

arba

$$-1,041 < a_u < -0,195.$$

Pasinaudojus (3.46) priklausomybėje priimtu žymėjimu  $u_1 = -1,041$  ir  $u_2 = -0,195$ , pagal (3.47) lygybę nustatytos intervalo ribos koreliacijos koeficientui. Šiuo atveju  $r_1 = -0,998$  ir  $r_2 = -0,152$ , t.y.  $-0,998 < \rho < -0,152$ .

Skaičiavimo rezultatai plienams ir jų suvirinimo siūlių medžiagoms aukštesnėje temperatūroje pateikti 3.10 lentelėje. Kai tenkinama sąlyga  $|u| \leq z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_u$ , priimama nulinė hipotezė  $\rho = 0$ . Tada sakoma, kad atsitiktiniai dydžiai yra nekoreliuoti, t.y. suirimo charakteristikos  $m_p, C_p, m_e, C_e$  ir modifikuotas plastiškumas  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  tiesiškai vienas nuo kito nepriklausomi.

3.10 lentelė

Nulinės hipotezės  $\rho = 0$  tikrinimas tarp suirimo parametrų ir modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  aukštesnėje temperatūroje pagal sąlygą  $|u| \leq z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_u$ , kai  $z_{0,975} = 1,96$  ( $\alpha = 0,05$ ,  $P = 1 - \alpha/2 = 0,975$ ). 90 % pasikliautinio intervalo ribos  $[r_1, r_2]$  teoriniam koreliacijos koeficientui

Ciklinės charakteristikos	n	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$s_x$	$s_y$	r	u	$z_{0,975} \cdot \sigma_u$	$ u  \leq z_{1-\alpha/2}$	$r_1 < \rho < r_2$	
										$r_1$	$r_2$
LEGIRUOTIEJI KONSTRUKCINIAI PLIENAI											
$m_p$	18	108,44	0,767	28,99	0,112	-0,57	-0,618	0,506	$\rho \neq 0$	-0,998	-0,152
$C_p$	19	118,05	140,89	37,59	83,166	-0,57	-0,651	0,490	$\rho \neq 0$	-0,983	-0,163
$m_e$	20	116,34	0,191	37,30	0,091	0,57	0,660	0,475	$\rho \neq 0$	0,180	0,976
$C_e$	20	116,34	2,416	37,30	1,671	0,62	0,728	0,475	$\rho \neq 0$	0,198	0,994
LEGIRUOTŲJŲ KONSTRUKCINIŲ PLIENŲ SIŪLIŲ MEDŽIAGA											
$m_p$	28	108,77	0,731	19,67	0,110	-0,65	0,772	0,392	$\rho \neq 0$	-0,976	-0,32
$C_p$	30	106,20	136,15	22,02	114,27	-0,40	0,428	0,378	$\rho \neq 0$	-0,721	-0,088
$m_e$	31	110,26	0,143	25,05	0,05	-0,48	-0,522	0,370	$\rho \neq 0$	-0,789	-0,169
$C_e$	31	111,66	1,512	24,84	0,59	-0,56	-0,631	0,370	$\rho \neq 0$	-0,869	-0,249

Koreliacinė analizė parodė, kad tarp plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų suirimo charakteristikų  $m_p, C_p, m_e, C_e$  ir modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  aukštesnėje temperatūroje yra koreliacinis ryšys.

### 3.2.8. Suirimo kreivių parametrų ir modifikuoto plastiškumo tyrimo rezultatų regresinė analizė

Jei dydžiai  $X$  ir  $Y$  yra atsitiktiniai, tai jų priklausomybei tirti taikoma koreliacinė analizė, kurios metu apskaičiuojami aritmetiniai vidurkiai  $\bar{x}$  ir  $\bar{y}$ , dispersijos  $s_x^2$  ir  $s_y^2$  ir koreliacijos koeficientas  $r$ . praktikoje nagrinėjamas atsitiktinio dydžio  $Y$  sąlyginis vidurkis, kai atsitiktinis dydis  $X$  įgyja tam tikras reikšmes. Šiuo atveju teorinės regresijos tiesės lygtis

$$M(Y/x) = a_{y/x} = MY + \rho \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - MX), \quad (3.49)$$

čia  $M(Y/x)$  - sąlyginė dydžio  $Y$  matematinė viltis esant fiksuotam dydžiui  $X = x$ .

Koreliacinė analizė parodė, kad tarp daugumos plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų suirimo kreivės parametrų  $m_p, C_p, m_e, C_e$  aukštesnėje temperatūroje yra koreliacinis ryšys (3.10 lentelė), t.y. egzistuoja tiesinė priklausomybė, kurią galima aprašyti empirine regresijos tiesės lygtimi

$$Y = \bar{y} + r \frac{s_y}{s_x} (x - \bar{x}), \quad (3.50)$$

arba

$$Y = a + bx, \quad (3.51)$$

čia  $b = r \frac{s_y}{s_x}$ ;  $a = \bar{y} - b\bar{x}$ .

Atsitiktinio dydžio  $Y$  sąlyginės dispersijos įvertinimui, kai turima  $n$  duomenų porų  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2), \dots, (x_i, y_i), \dots, (x_n, y_n)$ , panaudota dispersija apie regresijos tiesę

$$s_{y/x}^2 = s_y^2 (1 - r^2) \frac{n-1}{n-2}. \quad (3.52)$$

Individualios sklaidos apie regresijos tiesę dydis, t.y.  $Y$  nustatymo pagal (3.50) lygybę grynoji klaida

$$\delta_y = \sqrt{s_{y/x}^2}. \quad (3.53)$$

Teorinei regresijos tiesei (3.49) yra nustatomi pasikliautiniai intervalai ir pasikliautinoji sritis. Šiam tikslui pagal (3.50) ir (3.51) lygybes buvo apskaičiuotas dydis  $Y$  ir nustatyta jo dispersija

$$s_{Y/x}^2 = s_{y/x}^2 \left[ \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{(n-1)s_x^2} \right]. \quad (3.54)$$

Tikrojo (teorinio) sąlyginio vidurkio  $a_y = M(Y/x)$ , gaunamo iš teorinės regresijos lygties, pasikliautinasis intervalas

$$Y - s_{Y/x} t_{\alpha,k} < a_y < Y + s_{Y/x} t_{\alpha,k}, \quad (3.55)$$

čia  $t_{\alpha,k}$  - Stjudento (Student) kriterijaus reikšmė, nustatoma pagal pasirinktą reikšmingumo lygmenį  $\alpha = 0,05$  ir laisvės laipsnių skaičių  $k = n - 2$  [28].

Regresijos lygties adekvatumo tikrinimas. Suradus regresijos linijos parametrų įverčius  $a$  ir  $b$ , buvo patikrinta, ar gautoji lygtis pakankamai tiksliai aprašo tyrimo rezultatus, t.y. buvo patikrintas regresijos lygties  $y = a + bx$  adekvatumas [29]. Tam panaudotas Fišerio kriterijus

$$F = \frac{s_y^2}{\delta_y^2}, \quad (3.56)$$

čia  $s_y^2$  - dispersija, apibudinanti duomenų nukrypimą nuo vidurkio;

$\delta_y^2 = s_{y/x}^2$  - liekamoji dispersija, apibudinanti duomenų nukrypimą nuo regresijos linijos taškų.

Jei pasirinktam reikšmingumo lygmeniui  $\alpha$  dydis  $F$  yra ne mažesnis už reikšmę  $F_{\alpha(k_1-1, k_2-2)}$  [27], regresijos lygtis yra adekvati. Priešingu atveju manoma, kad nėra tiesinės priklausomybės tarp tikrinamų dydžių ir reikia nagrinėti sudėtingesnes priklausomybes.

Tarpinėms  $F_\alpha$  reikšmėms, kai  $k_1$  ir  $k_2$  daugiau už 30, teisinga aproksimacija [27]:

$$\left. \begin{aligned} g &= 1/k_1 - 1/k_2; \quad h = 2/(1/k_1 + 1/k_2); \\ \lg F_{0,5} &= -0,29g; \quad \lg F_{0,3} = \frac{0,4555}{\sqrt{h-0,55}} - 0,329g; \quad \lg F_{0,1} = \frac{1,1131}{\sqrt{h-0,77}} - 0,527g; \\ \lg F_{0,05} &= \frac{1,4287}{\sqrt{h-0,95}} - 0,681g; \quad \lg F_{0,01} = \frac{2,0206}{\sqrt{h-1,4}} - 1,073g. \end{aligned} \right\} (3.57)$$

Tyrimo rezultatų aprašymo tikslumui nustatyti, t.y.  $F$  kriterijaus reikšmingumui nustatyti ( $\alpha > 0,1$ ), panaudota aproksimacija, kurią pasiūlė Paulsonas (Paulson E.S.) [27]:

$$\hat{z} = \frac{\left(1 + \frac{2}{9k_2}\right)F^{1/3} - \left(1 - \frac{2}{9k_1}\right)}{\sqrt{\frac{2}{9k_2}F^{2/3} + \frac{2}{9k_1}}}. \quad (3.58)$$

(3.58) lygybė teisinga esant laisvės laipsnių skaičiui  $k > 3$ . Klaidos tikimybė  $\alpha$  nustatyta kaip plotas pagal  $z$  kriterijų [27] atitinkamai  $F$  reikšmei.

### 3.1.9 Tiesinė regresinė analizė suirimo kreivių parametrų ir modifikuoto plastiškumo atveju

Šiame skirsnyje parodyta tiesinės suirimo kreivės parametrų  $m_p, C_p, m_e, C_e$  regresijos modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  atžvilgiu analizė legiruotiems konstrukciniams plienams aukštesnėje temperatūroje ir nustatytos 95% pasikliautiniosios srities ribos regresijos tiesei, panaudojus (3.49) - (3.58) lygybes.

**Regresijos koeficientų įvertinimas.** Regresijos tiesialinijškumas buvo tikrinamas grafiškai, atidėjus koordinatėse  $x = (\sigma_u/\sigma_y)\psi$  ir  $y = m_p, C_p, m_e, C_e$  tyrimo rezultatų duomenis (3.1-3.4 pav.). Kadangi buvo manyta, kad gauti taškai grupuojasi apie tiesę, preliminariam tiesiniam ryšiui nusakyti buvo panaudota (3.50) lygybė. Empirinės tiesinės regresijos parametrai pateikti 3.10 lentelėje.

Regresijos lygties  $y = a + bx$  koeficientų  $a$  ir  $b$  reikšmės plienams ir jų suvirinimo siūlių medžiagoms aukštesnėje temperatūroje pateiktos 3.10 lentelėje.

**Adekvatumo tikrinimas.** Plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų tiesinės regresijos  $y = a + bx$  adekvatumo tikrinimas parodė (3.11 lentelė), kad tiesinės suirimo kreivių parametru priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo patikimumas yra 65-85% esant koreliaciniam ryšiu tarp minėtų charakteristikų (3.10 lentelė).

Fišerio pasiskirstymo  $\alpha$  eilės kvantilio  $F_{\alpha(k_1-1, k_2-2)}$  tarpinės reikšmės, kai medžiagų skaičius  $n \leq 30$ , buvo nustatytos interpoliuojant. Pavyzdžiui, legiruotųjų konstrukcinių plienų aukštesnėje temperatūroje parametrai  $m_p$  medžiagų skaičius  $n=18$ ,  $k_1=18-1=17$ ,  $k_2=18-2=16$ . Pasirinkus  $\alpha = 0,1$ , nustatytos ribos  $15 < k_1 = 17 < 20$ , kurios atitinka 1,94 ir 1,89 [32], esant vardikliui  $k_2 = 16$ . Ieškomą reikšmę pažymėjus  $x$ , sudaryta lygybė  $(1,94-x)/(1,94-1,89)=(1/15-1/17)/(1/15-1/20)$ . Iš čia  $x = F_{0,1} = 1,92$ .

Kai  $k_1$  ir  $k_2$  daugiau už 30, dydis  $F_{\alpha}$  buvo apskaičiuotas pagal (3.57) lygbes.  $F$  kriterijaus reikšmingumui nustatyti, kai  $\alpha > 0,1$  ir  $k < 30$ , buvo panaudota Paulsono pasiūlyta (3.58) lygybė.

3.11 lentelė

Suirimo parametru  $m_p, C_p, m_e, C_e$  tiesės regresijos  $y = a + bx$  modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)$  atžvilgiu adekvatumo tikrinimas naudojant Fišerio kriterijų. Adekvatumo sąlyga  $F \geq F_{\alpha(k_1, k_2)}$ ,  $k_1 = n - 1$ ,  $k_2 = n - 2$

Suirimo charakteristikos	Medžiagų skaičius $n$	$y = a + bx$			
		$F$	$F_{0,3}$	$F_{0,1}$	$F_{\alpha}$
LEGIRUOTIEJI KONSTRUKCINIAI PLIENAI					
$m_p$	18	1,41	-	1,92	$F_{0,25}$
$C_p$	19	1,40	-	1,88	$F_{0,20}$
$m_e$	20	1,42	-	1,84	$F_{0,20}$
$C_e$	20	1,54	-	1,84	$F_{0,15}$
LEGIRUOTŪJŲ KONSTRUKCINIŲ PLIENŲ SIŪLIŲ MEDŽIAGA					
$m_p$	28	1,66	-	1,66	$F_{0,15}$
$C_p$	30	1,15	-	1,63	$F_{0,35}$
$m_e$	31	1,26	1,21	1,60	$F_{0,3}$
$C_e$	31	1,41	1,21	1,60	$F_{0,25}$
$F'_{\alpha}$ - apytikslės reikšmės, atitinkančios $F$ kriterijų					



**Netiesinės regresijos parinkimas ir jos adekvatumo tikrinimas.** Kadangi negalima teigti, kad parinkta tiesinė regresija pakankamai tiksliai aprašo tyrimo rezultatus, darbe [1] buvo ieškota kitų, mažesnę liekamąją dispersiją  $s_{y/x}^2$  turinčių lygčių. Optimalią (tiksliai aprašančią tyrimo rezultatus) regresijos lygtį surasti sunku, todėl skaičiavimams buvo panaudotos dažniausiai pasitaikančios netiesinės regresijos (parabolinė, hiperbolinė, eksponentinė ir kt.) [27-30].

Netiesinių regresijų  $y = x/(a + bx)$  ir  $y = a + bx + cx^2$  adekvatumo tikrinimas legiruotiesiems konstrukciniams plienams aukštesnėje temperatūroje darbe [1] parodė, kad ciklinių suirimo charakteristikų regresijos modifikuoto plastiškumo atžvilgiu aproksimacija iš esmės nepagerėjo, t.y. netiesinėmis regresijomis tyrimo rezultatai buvo aprašomi panašiai kaip ir tiesinėmis regresijomis.

Tuo remiantis šiame darbe priimta, kad suirimo kreivių parametrų ir modifikuoto plastiškumo duomenis galima aproksimuoti tiesine regresija  $y = a + bx$ . Kadangi parametrų  $m_p, C_p, m_e, C_e$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)$  duoda mažiausią sklaidą ir geriausiai nusako tiesinio ryšio stiprumą, 3.13 lentelėje pateiktos analitinės šių charakteristikų tarpusavio priklausomybės.

**Pasikliautinosios srities ribos teorinei regresijos tiesei.** Čia parodytas legiruotųjų konstrukcinių plienų tiesinės regresijos  $m_p = 1,00796 - 0,0022(\sigma_u/\sigma_y)$  aukštesnėje temperatūroje pasikliautinosios srities ribų nustatymas su 0,95 pasiklovimo tikimybe.

Teorinei regresijos tiesei (3.49) įvertinti nustatoma pasikliautinoji sritis. Šiam tikslui pagal (3.52) lygybę įvertinta atsitiktinio dydžio  $Y$  sąlyginė dispersija

$$s_{y/x}^2 = 0,112^2(1 - 0,57^2) \frac{18-1}{18-2} = 0,009$$

ir pagal (3.53) lygybę apskaičiuotas individualios sklaidos apie regresijos tiesę dydis

$$\delta_y = \sqrt{s_{y/x}^2} = 0,095.$$

95% pasikliautinosios srities ribų (punktyrinės linijos) skaičiavimo eiliškumas regresijos tiesei pagal (3.54) ir (3.55) lygybes parodytas 3.12 lentelėje.

95% pasikliautiniosios srities ribų (punktyrinės linijos) skaičiavimo rezultatai tiesinei regresijai  $Y = 1,00796 - 0,0022x$ , kai  $(n-1)s_x^2 = 14287$ ,  $t_{\alpha,k} = 2,12$ ,  $\alpha = 0,05$  ir  $k = 16$

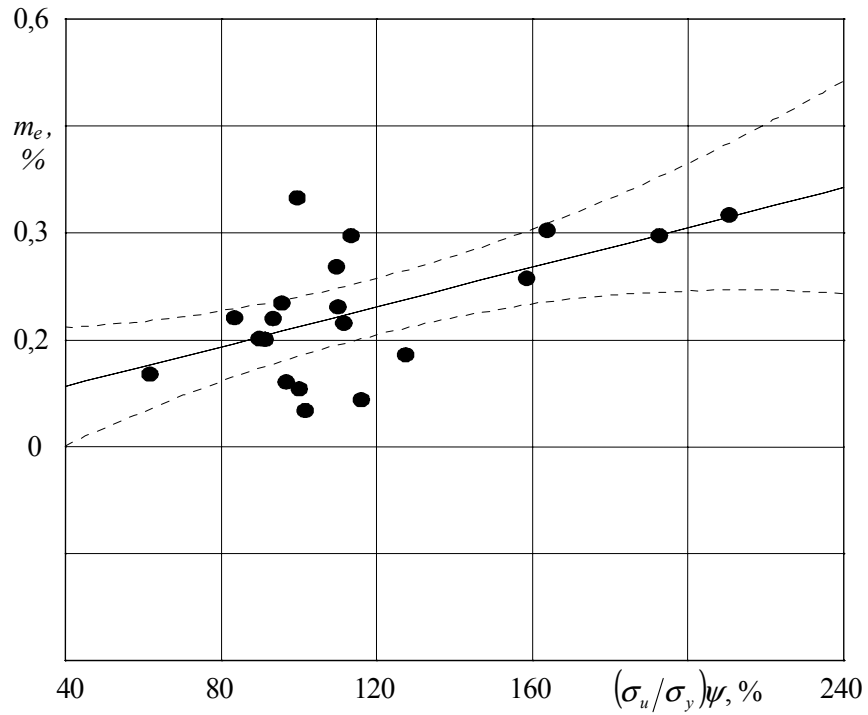
$x = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} \psi$	$0,0022x$	$Y = 1,00796 - 0,0022x$	$(x - \bar{x})$	$(x - \bar{x})^2$	$\frac{(x - \bar{x})^2}{(n-1)s_x^2}$	$s_{Y/x}^2$	$s_{Y/x}$	$s_{Y/x} t_{\alpha,k}$	$Y - s_{Y/x} t_{\alpha,k}$	$Y + s_{Y/x} t_{\alpha,k}$
70	0,155	0,85	-38	1444	0,1011	0,00146	0,038	0,081	0,769	0,931
90	0,200	0,81	-18	324	0,0227	0,00073	0,027	0,057	0,753	0,867
$\bar{x} = 108$	0,240	0,77	0	0	0	0,00052	0,023	0,049	0,721	0,819
130	0,289	0,72	22	484	0,0339	0,00083	0,029	0,062	0,658	0,782
150	0,333	0,68	42	1764	0,1235	0,00167	0,041	0,087	0,593	0,767
170	0,377	0,63	62	3844	0,2691	0,00302	0,055	0,117	0,513	0,747
190	0,422	0,59	82	6724	0,4706	0,00489	0,070	0,148	0,520	0,660

3.13 lentelė

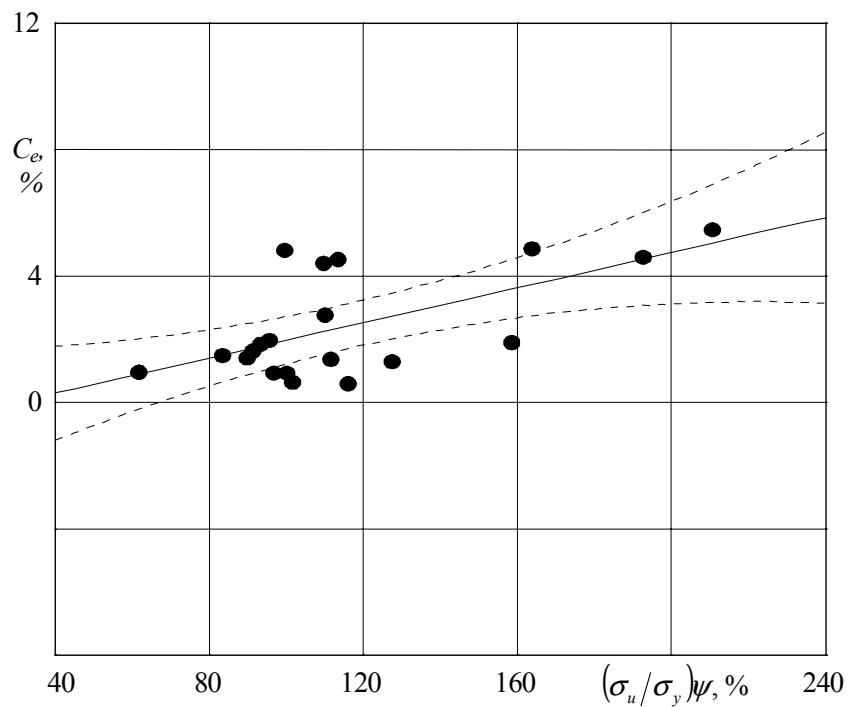
Suirimo parametrų  $m_p, C_p, m_e, C_e$  analitinės priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y) \psi$  plienams ir jų suvirinimo siūlių medžiagoms aukštesnėje temperatūroje

LEGIRUOTIEJI KONSTRUKCINIAI PLIENAI	LEGIRUOTŲJŲ KONSTRUKCINIŲ PLIENŲ SUVIRINIMO SIŪLIŲ MEDŽIAGA
$m_p = 1,00796 - 0,00222(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ ;	$m_p = 1,12405 - 0,00362(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ ;
$C_p = 290,90887 - 1,27059(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ ;	$C_p = 356,4234 - 2,07441(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ ;
$m_e = 0,02837 + 0,0014(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ ;	$m_e = 0,25422 - 0,00101(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ ;
$C_e = -0,8223 + 0,02781(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ .	$C_e = 2,98927 - 0,01329(\sigma_u/\sigma_y) \psi$ .

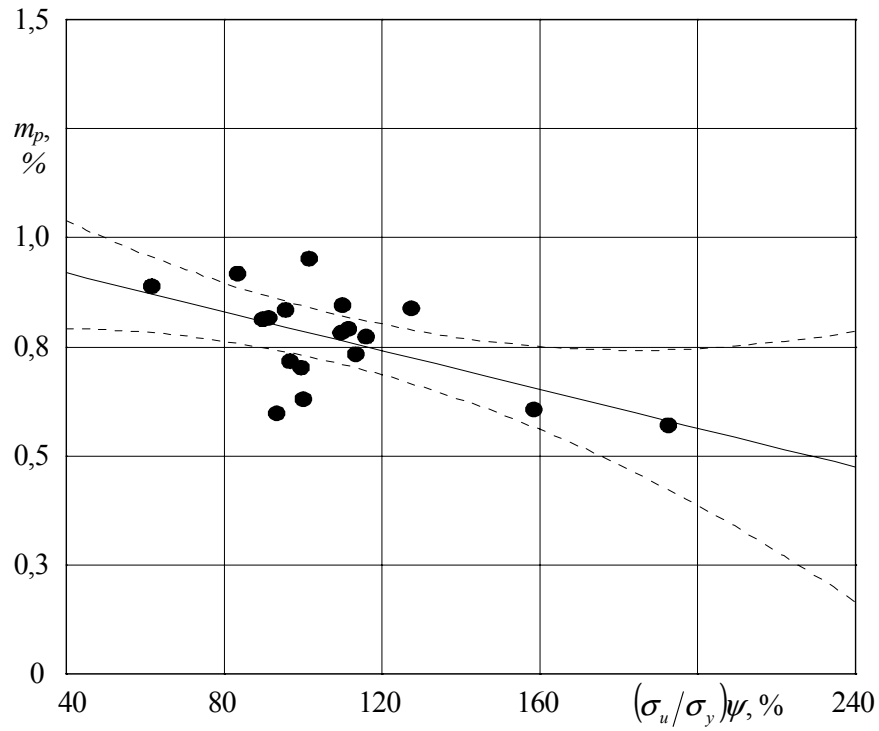
Empirinės regresijos tiesės, esant tiesinei legiruotųjų konstrukcinių plienų suirimo charakteristikų  $m_p, C_p, m_e, C_e$  priklausomybei nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y) \psi$  aukštesnėje temperatūroje, ir 95% pasikliautiniosios srities ribos (punktyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei parodytos 3.1–3.8 paveiksluose.



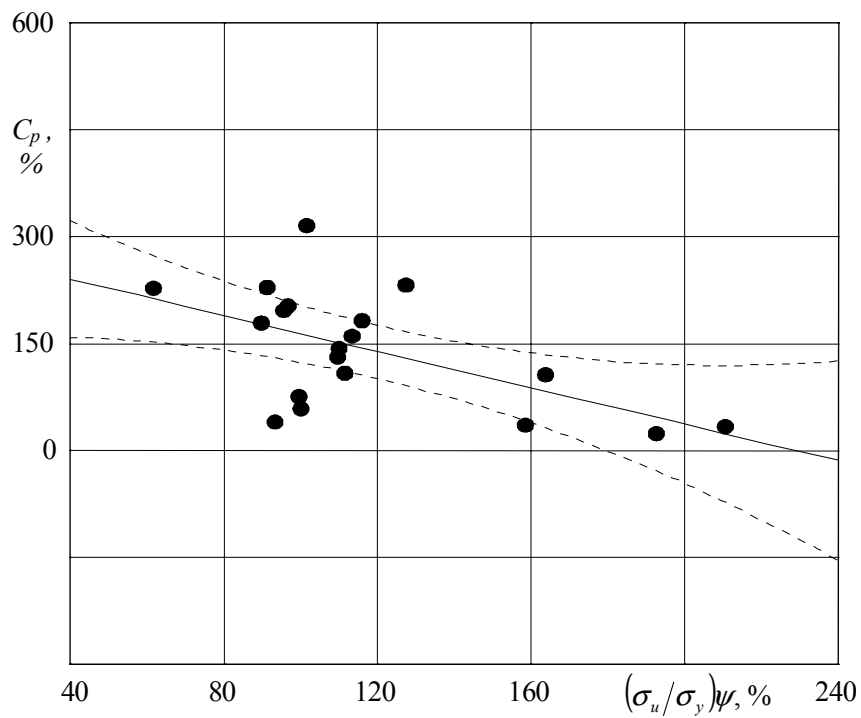
3.1 pav. Suirimo parametro  $m_e$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  legiruotiesiems konstrukciniams plienams aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautinosios srities ribos (punkttyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



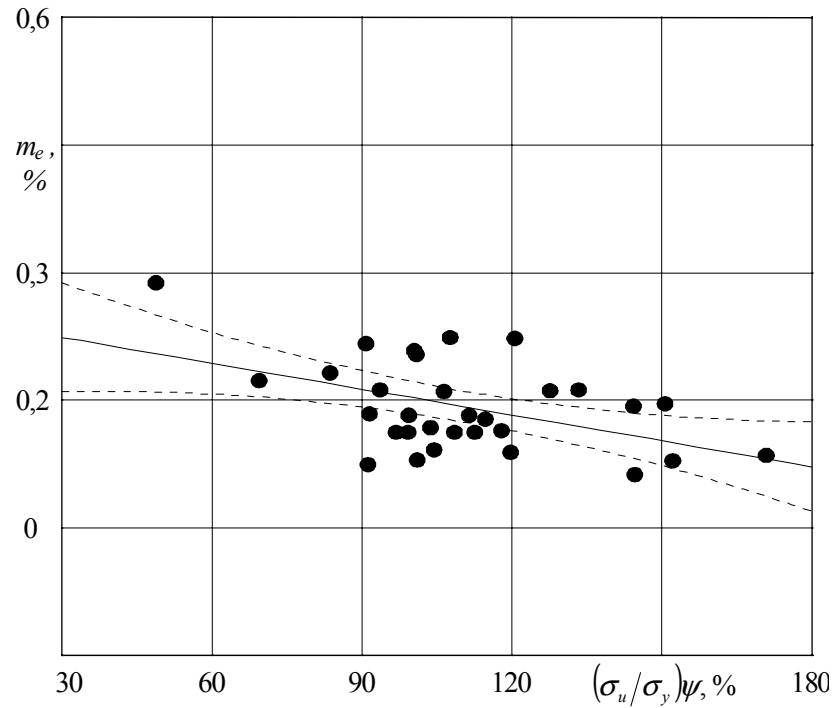
3.2 pav. Suirimo parametro  $C_e$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  legiruotiesiems konstrukciniams plienams aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautinosios srities ribos (punkttyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



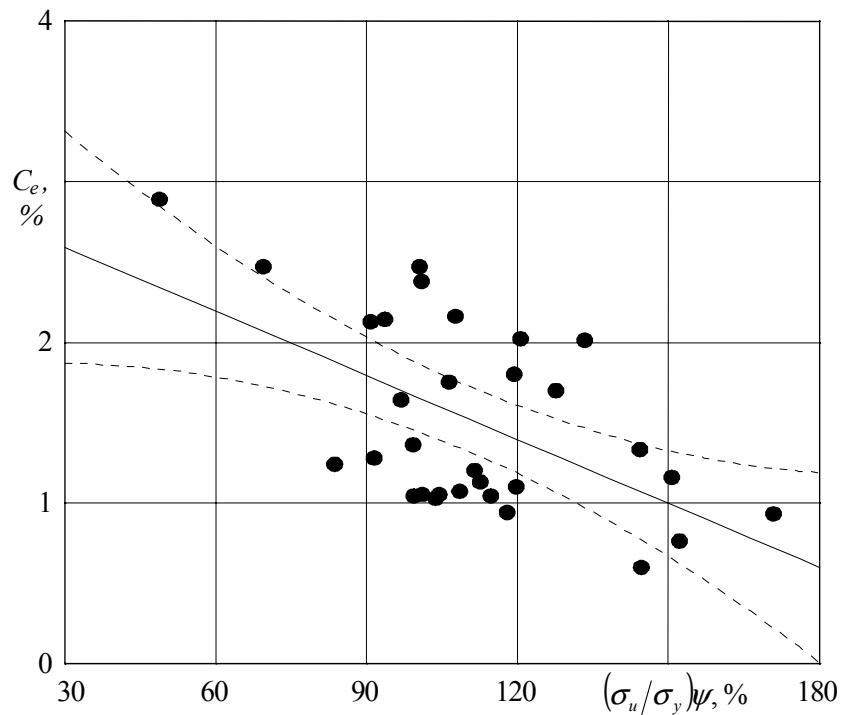
3.3 pav. Suirimo parametro  $m_p$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  legiruotiesiems konstrukciniams plienams aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautinosios srities ribos (punktyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



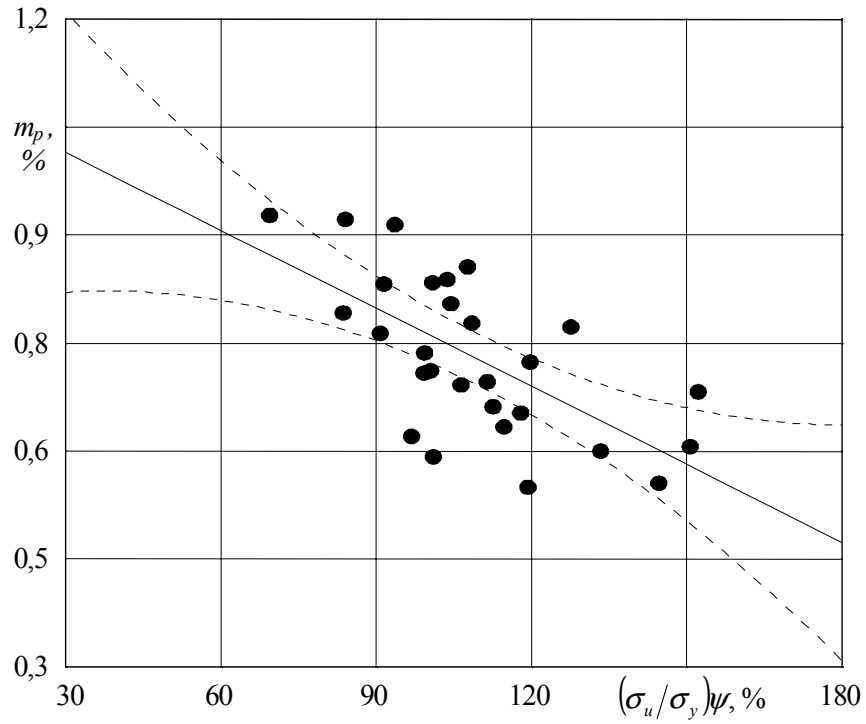
3.4 pav. Suirimo parametro  $C_p$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  legiruotiesiems konstrukciniams plienams aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautinosios srities ribos (punktyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



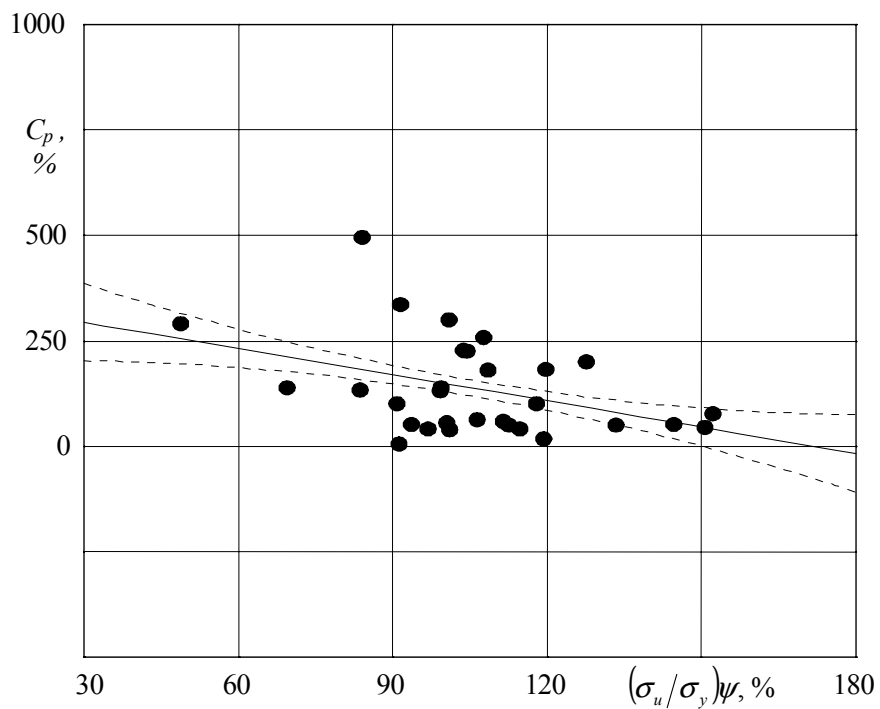
3.5 pav. Suirimo parametro  $m_e$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagoms aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautiniosios srities ribos (punktyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



3.6 pav. Suirimo parametro  $C_e$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagoms aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautiniosios srities ribos (punktyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



3.7 pav. Suirimo parametro  $m_p$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagoms aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautiniosios srities ribos (punktyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei



3.8 pav. Suirimo parametro  $C_p$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo  $(\sigma_u/\sigma_y)\psi$  legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagoms aukštesnėje temperatūroje ir 95% pasikliautiniosios srities ribos (punktyrinės linijos) teorinei regresijos tiesei

### 3.3. Prognozuojamo ir eksperimentinio ilgaamžiškumų palyginimas

Gusenkovo, 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 esti didesnė. Tai paaiškinama tuo, kad eksperimentas aukštesnėje temperatūroje yra sudėtingesnis ir daugiau faktorių (temperatūros svyravimas ir kt.) turi įtakos eksperimento rezultatams. Be to, suvirinimo siūlių medžiagų eksperimento rezultatų sklaida kur kas didesnė nei pagrindinių medžiagų.

Eksperimentinio ir pagal (2.1) ir (2.5) lygybes apskaičiuotų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų ilgaamžiškumų atitikimas pateiktas 4.1 lentelėje (parametrai  $m$  ir  $C$  yra apskaičiuoti pagal 3.13 lentelėje pateiktas lygybes ir darbo [1] rezultatus) ir parodytas 4.1-4.2 paveiksluose. Šiuose paveiksluose vienas taškas yra atitinkamos medžiagos vienas bandinys.

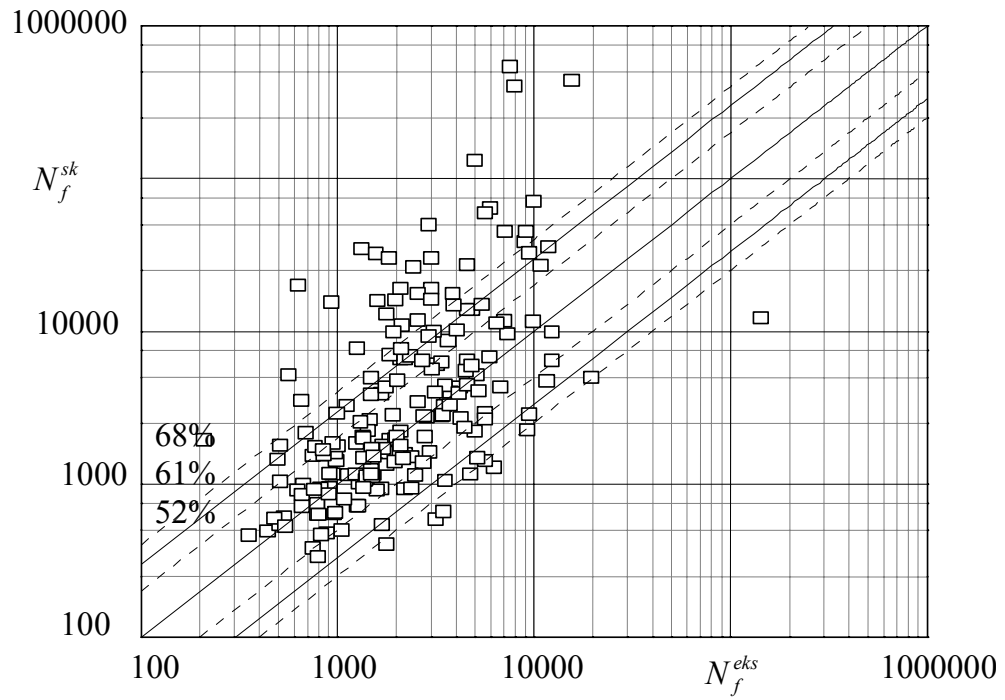
Kai ilgaamžiškumų  $N_f^{sk}$  ir  $N_f^{eksp}$  sklaida logaritminėse koordinatėse yra keturi kartai, į šią zoną patenka 52% legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirintojo sujungimo bandinių aukštesnėje temperatūroje, kai devyni kartai – 61-65 % bandinių, o kai šešiolika kartų – 68-89 % bandinių.

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

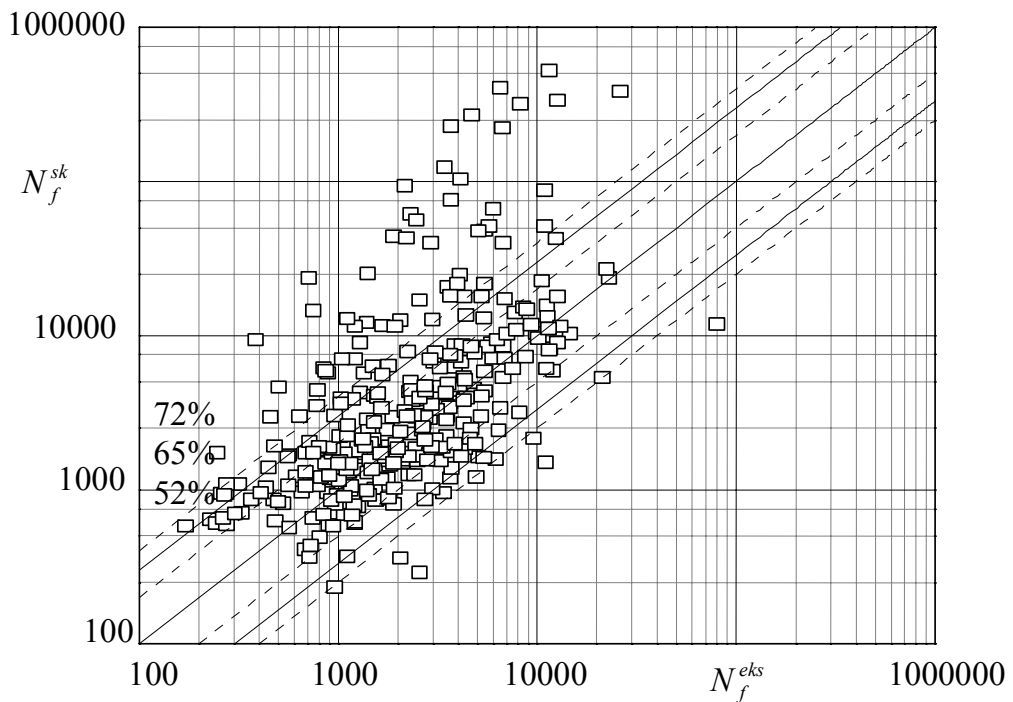
4.1 lentelė

Plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų prognozuojamo  $N_f^{sk}$  ir eksperimentinio  $N_f^{eksp}$  ilgaamžiškumų palyginimas aukštesnėje temperatūroje

Lygybė	Bendras bandinių skaičius	Bandinių skaičius, kai rezultatų sklaida tarp prognozuojamo ir eksperimentinio ilgaamžiškumų					
		4		9		16	
		vnt	%	vnt	%	vnt	%
Legiruotieji konstrukciniai plienai							
2.1	199	103	52	121	61	135	68
2.5	286	208	73	270	94	277	97
Legiruotųjų plienų suvirinimo siūlių medžiaga							
2.1	338	175	52	220	65	244	72
2.5	440	243	55	342	78	392	89



4.1 pav. Eksperimentinio  $N_f^{eks}$  ir skaičiuoto  $N_f^{sk}$  mažaciklių ilgaamžiškumų palyginimas legiruotiems konstrukciniams plienams aukštesnėje temperatūroje



4.2 pav. Eksperimentinio  $N_f^{eks}$  ir skaičiuoto  $N_f^{sk}$  mažaciklių ilgaamžiškumų palyginimas legiruotųjų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagoms aukštesnėje temperatūroje



## IŠVADOS

1. Legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų parametro  $m_p$  reikšmės aukštesnėje temperatūroje (gautos  $\lg \delta - \lg N$  koordinatėse) yra didesnės už L.Coffin pasiūlytą  $m = 0,5$  ir kinta intervale nuo 0,55 iki 0,95.
2. Plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų tyrimo rezultatų statistinis tikrinimas aukštesnėje temperatūroje patvirtino, kad tos pačios grupės medžiagų suirimo kreivių parametrai  $m_p, C_p, m_e, C_e$  taip pat modifikuotas plastiškumas  $(\sigma_u/\sigma_y)_{\psi}$  yra atsitiktiniai ir nepriklausomi dydžiai, pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį. Šių sąlygų tenkinimas leidžia taikyti matematinės statistikos metodus uždaviniams spręsti ir garantuoja koreliacinės ir regresinės analizės metodų teorinį pagrįstumą.
3. Suirimo kreivės parametrai, apskaičiuoti pagal modifikuotą plastiškumą, pakankamai tiksliai aprašo tyrimo rezultatus aukštesnėje temperatūroje.
4. Eksperimentinio ir pagal (2.1) lygybę apskaičiuotų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų ilgaamžiškumo rezultatų sklaida logaritminėse koordinatėse yra didesnė už rezultatų sklaidą, apskaičiuotą pagal (2.5) lygybę. Matomai tai atsitiko dėl apytikrio kilpos pločio nustatymo cikliškai silpnėjančioms ir stiprėjančioms medžiagoms naudojant (2.1) lygybę. Be to, rezultatų sklaida aukštesnėje temperatūroje yra didesnė.

## Literatūra

1. Šniuolis, R. Konstrukcinių medžiagų mažo ciklo nuovargio charakteristikų priklausomybė nuo mechaninių savybių. Daktaro disertacija. Kaunas, 1999.
2. Даунис М. Прочность и долговечность при малоцикловом нестационарном нагружении. Вильнюс: Мокслас, 1989. 256 с.
3. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Определение характеристик сталей при нормальной и повышенной температурах. Каунас: КПИ, 1970.
4. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Исследование характеристик малоциклового усталости для корпусных материалов. Каунас: КПИ, 1968. 58 с.
5. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Определение характеристик малоциклового усталости материалов различных зон сварных соединений при нормальной и повышенной температурах. Каунас: КПИ, 1971. 192 с.
6. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Определение характеристик малоциклового усталости материалов различных зон сварных соединений при заданных амплитудах деформаций и напряжений с учетом циклической ползучести и нестационарного нагружения. Каунас: КПИ, 1972. 254 с.
7. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Испытание образцов с различными технологическими дефектами на малоцикловую усталость при нормальной температуре. Каунас: КПИ, 1971. 177 с.
8. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Исследование надежности узлов энергетического оборудования с учетом воздействия конструкционных технологических и эксплуатационных факторов. Каунас: КПИ, 1984. –т. I 52 с., т. II 54 с., т. III 75 с.
9. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Исследование сопротивления малоциклового нагружению узлов энергетического оборудования с учетом воздействия конструкционных технологических и эксплуатационных факторов. Каунас: КПИ, 1986. т. I 70 с., т. II 92 с., т. III 125 с.
10. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Исследование поведения при малоцикловом нагружении механически неоднородных соединений в условиях нормальной и повышенных температур. Каунас: КПИ, 1974. 216 с.
11. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Исследование сопротивления разрушению конструкционных материалов и их сварных соединений при малоцикловом нагружении с учетом воздействия конструкционных технологических и эксплуатационных факторов. Каунас: КПИ, 1988. 242 с.
12. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Определение характеристик малоциклового усталости металлов сварных соединений при комнатных и служебных температурах с учетом неоднородности, технологических дефектов, нестационарности и деформационного старения. Каунас: КПИ, 1976. 426 с.

13. 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. 325 с.
14. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Оценка характеристик сварных соединений при циклическом упруго – пластическом нагружении в условиях комнатных и повышенных температур. – Каунас: КПИ, 1978. – 369 с.
15. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Исследование прочности конструкционных материалов и их сварных соединений при малоцикловом нагружении применительно к изделиям энергомашиностроения. Каунас: КПИ, 1990. 208с.
16. Даунис М. (Руководитель темы). Отчет научно исследовательской работы. Исследование повреждения при малоцикловом нагружении конструкционных материалов и их сварных соединений с учетом конструктивно – технологических факторов. Каунас: КПИ, 1982. 244 с.
17. Daunys M. (Vadovas). Biudžetinis mokslinis tiriamasis darbas. Mašinų ir konstrukcijų elementų patvarumo priklausomybė nuo įvairių konstrukcinių, technologinių ir eksploatacinių veiksnių. Kaunas: KTU, 1997. 147 p.
18. 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.
19. Manson, S. S. Fatigue: a complex subject – some simple approximations. – Experimental Mechanics, 1965. – vol. 5, No 7. – p. 193 – 276.
20. прочность при малом числе циклов нагружения / Под. ред. С. В. Серенсена. Москва: Наука, 1969. 258 с.
21. Браженас А. П., Даунис М. А. Определение продольных деформаций по диаграммам деформирования в координатах  $P - \Delta d$ . – Научные труды высших учебных заведений Литовской ССР. Механическая технология. – Вильнюс: Минтис, 1972, No 4, с. 237 – 31.
22. Медекша Г. Характеристики деформирования и разрушения при асимметричном упругопластическом нагружении. Диссертация. Каунас, 1967.
23. Романов А. Н. накопления повреждений при малоцикловом нагружении. Проблемы прочности, 1975, No 4, с. 21 – 27.
24. Ленджер Б. Расчет сосудов давления на малоцикловую долговечность. Техническая механика, 1962, No 3, с. 97 – 113.
25. Sessler I. G., Weis V. Low cycle fatigue damage pressure vessel materials. Trans ASME, 1963. D. – vol. 85, No 4. – p. 539 – 547.

26. Нормы расчета прочности элементов реакторов, парогенераторов, сосудов трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. Москва: Металлургия, 1973. 408 с.
27. Закс Л. Статистическое оценивание. Пер. с нем. / Под. Ред. Ю. П. Адлера, В. Г. Горского. Москва: Статистика, 1976. 598 с.
28. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник. Москва: Машиностроение, 1985. 232 с.
29. Kaminskienė V. Matematinės statistikos elementai. Mokymo priemonė 2 d. Vilnius: MA Fizikos ir matematikos institutas, 1976. 124 p.
30. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. Пособие. Москва: Высшая школа, 1982. 224 с.
31. Хан Г. Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах. Пер. с нем. / Под. Ред. В. В. Налимова. Москва: Мир, 1969. 395 с.
32. Ван дер Вардер Б. Л. Математическая статистика. Пер. с нем. / Под. Ред. Н. В. Смирнова. Москва: Изд – во иностр. лит. 1960. 434 с.
33. Mišeikis F. Statistika ir ekonometrija. Vilnius: Technika, 1997. 276 p.
34. Margolin B. Z., Gulenko A. G., Shvetsova V. A. Probabilistic Approach to Brittle Fracture and Fracture Toughness Prediction. – Proceedings of the Fifth International Conference on Material Issue in Design, Manufacturing and Operation of Nuclear Power Plants Equipment. St. Petersburg, 1998, v – 1. p. 121 – 135.
35. Timofejev B. T. Chernaenko T. A. Probabilistic Distribution of Mechanical Properties and Structure Integrity Characteristics of Materials for Russian Light Water Reactors. – Proceedings of the Fifth International Conference on Material Issue in Design, Manufacturing and Operation of Nuclear Power Plants Equipment. – St. Petersburg, 1998, v – 1. p. 99 – 120.
36. Grigas A. Radioelektroninės aparatūros inžinerinė sintezė ir analizė. – Kaunas: Technologija, 1992. – 214 p.
37. Каталог данных по механическим свойствам и расчетным характеристикам конструкционных материалов в области малоциклового усталости.- Москва, 1990.
38. Bražėnas A. Strength and low cycle fatigue of mechanically heterogeneous butt welded joints.- Kaunas: Technologija, 2002.-283 p.