

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

**Linas Radžius**

**KOFINO KREIVĖS PARAMETRŲ IR MECHANINIŲ  
CHARAKTERISTIŲ RYŠIO TYRIMAS BŪDINGAME  
INTERVALE**

Magistro baigiamasis darbas

**Šiauliai, 2013**

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

**KOFINO KREIVĖS PARAMETRŲ IR MECHANINIŲ  
CHARAKTERISTIŲ RYŠIO TYRIMAS BŪDINGAME  
INTERVALE**

Magistro baigiamasis darbas

**Autorius – Linas Radžius (MM – 11 gr.)**

**Vadovas – lekt. dr. Agnė Stulpinaitė**

**Recenzentas – doc. dr. Raimondas Šniuolis**

**Katedros vedėjas – doc. dr. Artūras Sabaliauskas**

**Šiauliai, 2013**



**TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

TVIRTINU \_\_\_\_\_

(parašas, data)

\_\_\_\_\_  
(vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS**  
**Studijų programa MECHANIKOS INŽINERIJA**

Išduota magistrantui (-ei) Linui Radžiui

Darbo tema: Kofino kreivės parametrų ir mechaninių charakteristikų ryšio tyrimas būdingame intervale

Patvirtinta 2013 m. kovo mėn. 29 d. fakulteto dekanu potvarkiu Nr. 060-03-9.

1. Darbo tikslas

Nustatyti legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų mechaninių ir Kofino kreivės charakteristikų priklausomybes nustatytame būdingame intervale kambario ir aukštesnėje temperatūroje.

2. Darbo struktūra

***Įvadas.*** Aptartas temos aktualumas, darbo mokslinis naujumas ir praktinė vertė.

***Pirmas skyrius.*** Literatūros šaltinių apžvalga.

***Antras skyrius.*** Mažacilkio nuovargio eksperimentinis tyrimas.

***Trečias skyrius.*** Aprašyti būdingo intervalo pagal mechanines charakteristikas nustatymą kambario ir aukštesnėje temperatūrose. Suirimo parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus statistinė analizė būdingame intervale. Nustatyti Kofino kreivės ir mechaninių charakteristikų tarpusavio analitinių priklausomybių koeficientus.

Atlikti medžiagų suirimo parametrų pagal modifikuoto plastiškumo kriterijų kambario ir aukštesnėje temperatūrose palyginimą tarp būdingo intervalo duomenų ir bendrų plienų, suvirinimo siūlių medžiagų grupių duomenų.

Darbo pateikimo terminas 2013m. birželio mėn. 5 d.

Užduotį gavau

Linus Radžius

(magistranto vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas, data)

Vadovas

lekt. dr. Agnė Stulpinaitė

(pareigos, vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_  
(parašas, data)

## TURINYS

|  |    |
|--|----|
| LENTELIŲ SĄRAŠAS .....   | 7  |
| PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS .....  | 9  |
| ĮVADAS .....   | 10 |
| 1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA .....   | 12 |
| 1.1. Ciklinio nuovargio tyrimai .....  | 16 |
| 2. MAŽACIKLIO NUOVARGIO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI .....   | 17 |
| 2.1. Ciklinis nuovargis .....  | 17 |
| 2.2. Tiriamos medžiagos .....  | 18 |
| 3. KOFINO KREIVĖS PARAMETRŲ IR MECHANINIŲ CHARAKTERISTIŲ RYŠIO TYRIMAS .....   | 19 |
| 3.1. Tiriamų medžiagų intervalų nustatymas .....   | 19 |
| 3.2. Tiriamų medžiagų statistika .....   | 22 |
| 3.3. Ryškiai išsiskiriančių taškų atmetimas .....  | 23 |
| 3.4. Rezultatų atsitiktinumo bei nepriklausomumo statistinis tikrinimas .....  | 27 |
| 3.5. Deformavimo, nuovargio parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus reikšmių pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimas ..... | 31 |
| 3.7. Medžiagų grupavimo įtaka nuovargio charakteristikų nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus nustatymui .....                                     | 49 |
| IŠVADOS IR PASIŪLYMAI .....  | 53 |
| LITERATŪRA .....   | 54 |
| PRIEDAI .....  | 56 |

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

Linus Radžius. KOFINO KREIVĖS PARAMETRŲ IR MECHANINIŲ CHARAKTERISTIKŲ RYŠIO TYRIMAS BŪDINGAME INTERVALE. Magistro baigiamasis darbas / vadovas lekt. dr. A. Stulpinaitė

**SANTRAUKA**

Atlikta literatūros apžvalga parodė, kad tyrimų, nagrinėjant medžiagas būdingame intervale kambario ir aukštesnėje temperatūroje nebuvo atlikta. Todėl šiame darbe, nustatyti analizuojamų duomenų sklaidos intervalai: legiruotiems konstrukciniams plienams bei legiruotų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagoms (kambario ir aukštesnėje temperatūroje). Atliktas deformavimo, nuovargio parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus reikšmių pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimas, kuris parodė, kad dauguma nuovargio nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus duomenų yra pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį. Pasiūlyti analitinių priklausomybių koeficientai tarp suirimo kreivės parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus. Gauti koreliacinės analizės duomenys patvirtino medžiagų atmetimo (būdingo intervalo nustatymo) tikslumą. Tai reiškia, kad darbe nustatytos analitinės priklausomybės gali būti taikomos įrenginių konstrukcijų preliminariam ilgalaikiškumui bei patikimumui apskaičiuoti.

Šiaulių universiteto Technologijos fakulteto organizuojamoje 8 – oje konferencijoje „Studentų moksliniai darbai“ skaitytas pranešimas tema: „Kofino kreivės parametrų ir mechaninių charakteristikų ryšio tyrimas būdingame intervale“.

**Pagrindiniai žodžiai:** mažaciklis nuovargis, ilgalaikiškumas, Kofino kreivės parametrai, modifikuoto plastiškumo kriterijus, tiesinė priklausomybė

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

Linās Radžius. COFFINS CURVE PARAMETERS AND MECHANICAL CHARACTERISTICS CONNECTIVITY TEST IN TYPICAL RANGE. Master final work / research advisor lect. dr. A. Stulpinaitė

**SUMMARY**

Performed literature review showed that any studies of examining materials in intrinsic range at room and elevated temperature haven't been performed. That's why, in this paper, analyzed data setted diffusion ranges-alloyed for structural steels and alloy structural steels weld (at room and elevated temperatures). Performed deformation, fatigue parameters and modified plasticity criteria value distribution by the normal law hypothesis testing, which showed that most of the fatigue plasticity criteria from modified data is distributed according to the normal principle. Offered analytical dependency ratios between the disintegrate curve parameters and modified plasticity criteria. Counted correlation analysis appropriate rejection of materials (in typical range). This means that in paper setted analytical relationships can be used for equipment preliminary calculation of durability and reliability.

I was a participant in Šiauliai Univeristy faculty of Technology organized 8 - th conference "Student scientific search" with theme: Coffins curve parameters and mechanical characteristics connectivity test in typical range.

**Key words:** low-cycle fatigue, durability, Coffin curve's parameters, modified plasticity criteria, linear relationship

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

|  |    |
|--|----|
| <b>3.1 lentelė.</b> Tiriamų medžiagų kiekio kitimas .....  | 22 |
| <b>3.2 lentelė.</b> Legiruotų konstrukcinių plienų nuovargio charakteristikos $C_p$ (kambario temperatūroje) ryškiai išsiskiriančių taškų atmetimas .....  | 26 |
| <b>3.3 lentelė.</b> Atmestos medžiagos, tiriamų medžiagų skaičius po atmetimo .....  | 26 |
| <b>3.4 lentelė.</b> Legiruotų konstrukcinių plienų nuovargio kreivės parametro $m_p$ reikšmių atsitiktinumą ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas, naudojant imties medianą .....  | 28 |
| <b>3.5 lentelė.</b> Serijų kriterijaus, naudojant medianą, gautų duomenų lentelė .....   | 28 |
| <b>3.6 lentelė.</b> Legiruotų konstrukcinių plienų siūlių nuovargio kreivės parametro $C_p$ reikšmių atsitiktinumą ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas, naudojant kylačių ir krintančių serijų kriterijų .....   | 30 |
| <b>3.7 lentelė.</b> Serijų kriterijaus, naudojant medianą, gautų duomenų lentelė .....   | 31 |
| <b>3.8 lentelė.</b> Legiruotų konstrukcinių plienų variacinė eilutė nuovargio kreivės parametrui $m_e$ kambario temperatūroje .....  | 34 |
| <b>3.9 lentelė.</b> Legiruotų konstrukcinių plienų reikšmių pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimas, naudojant suderinamumo kriterijų $W$ nuovargio kreivės parametrui $m_e$ kambario temperatūroje .....   | 34 |
| <b>3.10 lentelė.</b> Legiruotų konstrukcinių plienų kambario temperatūroje nuovargio parametrų tikrinimas Kolmogorovo – Smirnovu metodu .....  | 36 |
| <b>3.11 lentelė.</b> Nuovargio parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus duomenų normaliojo skirstinio tikrinimas kambario temperatūroje ir aukštesnėje temperatūrose panaudojus vidutinį absoliutinį nuokrypį (VAN), imties pločio ir dispersijos santykį $IP/s$ , Šapiro ir Vilko $W$ kriterijų bei Kolmogorovo – Smirnovu metodus legiruotiems konstrukciniams plienams būdingame intervale .....              | 37 |
| <b>3.12 lentelė.</b> Nuovargio parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus duomenų normaliojo skirstinio tikrinimas kambario temperatūroje ir aukštesnėje temperatūrose panaudojus vidutinį absoliutinį nuokrypį (VAN), imties pločio ir dispersijos santykį $IP/s$ , Šapiro ir Vilko $W$ kriterijų bei Kolmogorovo – Smirnovu metodus legiruotiems konstrukcinių plienų siūlėms (atmetus papildomą medžiagą) ..... | 38 |

|  |    |
|--|----|
| <b>3.13 lentelė.</b> Kintamųjų legiruotųjų plienų nuovargio charakteristikos $m_p$ ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus kambario temperatūroje koreliacija.....  | 41 |
| <b>3.14 lentelė.</b> Pirsono koreliacijos koeficiento $r$ rezultatai .....   | 41 |
| <b>3.15 lentelė.</b> Legiruotųjų konstrukcinių plienų kintamųjų modifikuoto plastiškumo kriterijaus bei nuovargio charakteristikos $m_p$ kambario temperatūroje tiesinio ryšio stiprumo vertinimas .....                                   | 42 |
| <b>3.16 lentelė.</b> Stjudento krterijaus reikšmingumo vertinimas legiruotų konstrukcinių plienų nuovargio parametrui $m_p$ nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ kambario temperatūroje .....                    | 44 |
| <b>3.17 lentelė.</b> Regresijos lygties koeficientų reikšmingumas parametrms $m_e, C_e, m_p, C_p$ nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ kambario temperatūroje .....  | 44 |
| <b>3.18 lentelė.</b> 95% prognozuojamų reikšmių tikėtinumo juostos ribų nustatymas tiesinei regresijai $y = 0,546 + 0,044x$ , kai $t_{p,k} = 8,638$ , $p = 0,05$ .....   | 45 |
| <b>3.19 lentelė.</b> Legiruotų konstrukcinių plienų nuovargio parametrų $m_p, C_p$ priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus regresijos tiesiškumo tikrinimas.....  | 47 |
| <b>3.20 lentelė.</b> Tiesinio ryšio adekvatumo tyrimas (Fišerio kriterijus) nuovargio parametrms .....   | 48 |
| <b>3.21 lentelė.</b> Legiruotų konstrukcinių bei plienų siūlių medžiagų nuovargio parametrų $m_p, C_p, m_e, C_e$ tiesinės priklausomybės koeficientai nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus kambario bei aukštesnėje temperatūrose ..... | 49 |
| <b>3.22 lentelė.</b> Tiriamų medžiagų bendros grupės bei medžiagų būdingame intervale koreliacijos koeficientų palyginimai .....   | 52 |



## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

|  |    |
|--|----|
| <b>1.1 pav.</b> Plastiškumo koeficiento (C) ir nuovargio eksponentės (m) priklausomybė nuo temperatūros .....  | 12 |
| <b>1.2 pav.</b> Servohidraulinė bandymo sistema MTS – 810 .....  | 13 |
| <b>1.3 pav.</b> Medžiagų klasifikavimas kambario ir aukštesnėje temperatūroje .....  | 15 |
| <b>3.1 pav.</b> Legiruoti plienai kambario temperatūroje .....   | 20 |
| <b>3.2 pav.</b> Plienų siūlės kambario temperatūroje .....   | 20 |
| <b>3.3 pav.</b> Legiruoti plienai aukštesnėje temperatūroje.....   | 21 |
| <b>3.4 pav.</b> Plienų siūlės aukštesnėje temperatūroje .....  | 21 |
| <b>3.5 pav.</b> Prognozuojamų reikšmių pasikliautinumo juosta, kai $y = 0,546 + 0,044x$ nuovargio parametro $m_p$ priklausomybei nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ legiruotiems konstrukciniams plienams būdingame intervale kambario temperatūroje ..... | 46 |
| <b>3.6 pav.</b> Nuovargio parametro $m_p$ priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus $\sigma_u/\sigma_yZ$ legiruotų konstrukcinių plienų bendrai grupei kambario temperatūroje ir 95% prognozuojamų reikšmių pasikliautinoji juosta (brūkšninė linija).....                 | 50 |
| <b>3.7 pav.</b> Nuovargio parametro $m_p$ priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ legiruotiems konstrukciniams plienams būdingame intervale kambario temperatūroje ir 95% prognozuojamų reikšmių pasikliautinoji juosta (brūkšninė linija).....   | 51 |

## IVADAS

Dabartiniiais laikais, kai visa pramonė išgyvena sunkmetį, visos naudojamos medžiagos privalo būti kuo tvaresnės, nesvarbu ar jos naudojamos mašinų gamybos, energetikos, ar kitose inžinerinėse srityse. Kuo ilgesnis mechanizmo naudojimo laikas, tuo didesnę pasitikėjimą jis sukelia, duodamas ekonominę naudą naudojantis juo. Tačiau ne visi įrengimai pasižymi ilgalaikiškumu. Norint, kad patikimumas didėtų, būtina įvertinti jų darbo sąlygas, medžiagų savybių įtaką stiprumui. Nesvarbu, koks mechanizmas bebūtų, juos veikia įvairiausios kintamos apkrovos, kurių įtaka dar labiau padidėja keičiantis darbo aplinkai – skiriantis darbo aplinkos temperatūrai.

Ankstesniuose kitų autorių darbuose buvo analizuojamos medžiagų ciklinio deformavimo diagramos, nuovargių kreivių parametrai ir mechaninės savybės, suskirstant medžiagų duomenis pagal tyrimų temperatūrą (aukštesnėje bei kambario), cheminę sudėtį. Šiame darbe analizuojamų medžiagų duomenys nagrinėjami nustatytuose pagal modifikuotą kriterijų būdinguose intervaluose kambario bei aukštesnėje temperatūroje. Tokiu būdu, tyrimo metu yra patikslinami medžiagų priklausomybių koeficientai, pagal kuriuos preliminariai apskaičiuojamas ilgalaikiškumas.

**Tyrimo tikslas.** Nustatyti legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų mechaninių ir Kofino kreivės charakteristikų priklausomybes nustatytame būdingame intervale kambario ir aukštesnėje temperatūroje.

### **Darbo uždaviniai.**

- nustatyti legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų nuovargio kreivės parametrų  $m_p$ ,  $C_p$ ,  $m_e$ ,  $C_e$  būdingą intervalą, kuris priklauso nuo mechaninių charakteristikų;
- nustatyti nuovargio kreivės parametrų  $m_p$ ,  $C_p$ ,  $m_e$ ,  $C_e$  tarpusavio ryšio dėsningumus būdingame intervale kambario ir aukštesnėje temperatūrose;
- nustatyto būdingo intervalo įtaką legiruotųjų konstrukcinių plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų nuovargio kreivės parametrų  $m_p$ ,  $C_p$ ,  $m_e$ ,  $C_e$  nustatymui pagal modifikuoto plastiškumo kriterijų kambario ir aukštesnėje temperatūrose;
- nustatyti analitinių priklausomybių koeficientus nuovargio kreivių parametrams nustatyti pagal mechanines savybes bei patikrinti pasiūlyto analitinio ryšio regresinio modelio adekvatumą.

**Tyrimo metodai.** Baigiamojo magistro darbo tyrimai atlikti remiantis eksperimentiniais, analitiniais bei statistiniais metodais. Apdoroti duomenys gauti KTU Mašinų projektavimo katedros mažaciklio nuovargio laboratorijoje bei kitų laboratorijų tyrimų rezultatais kambario bei aukštesnėje temperatūroje. Medžiagų atmetimui, nustatant būdingus intervalus, buvo panaudota „Origin 8.0“

programa. Statistiniams duomenų apdorojimams bei skaičiavimams naudota „SPSS 17.1“ programinės įrangos paketas.

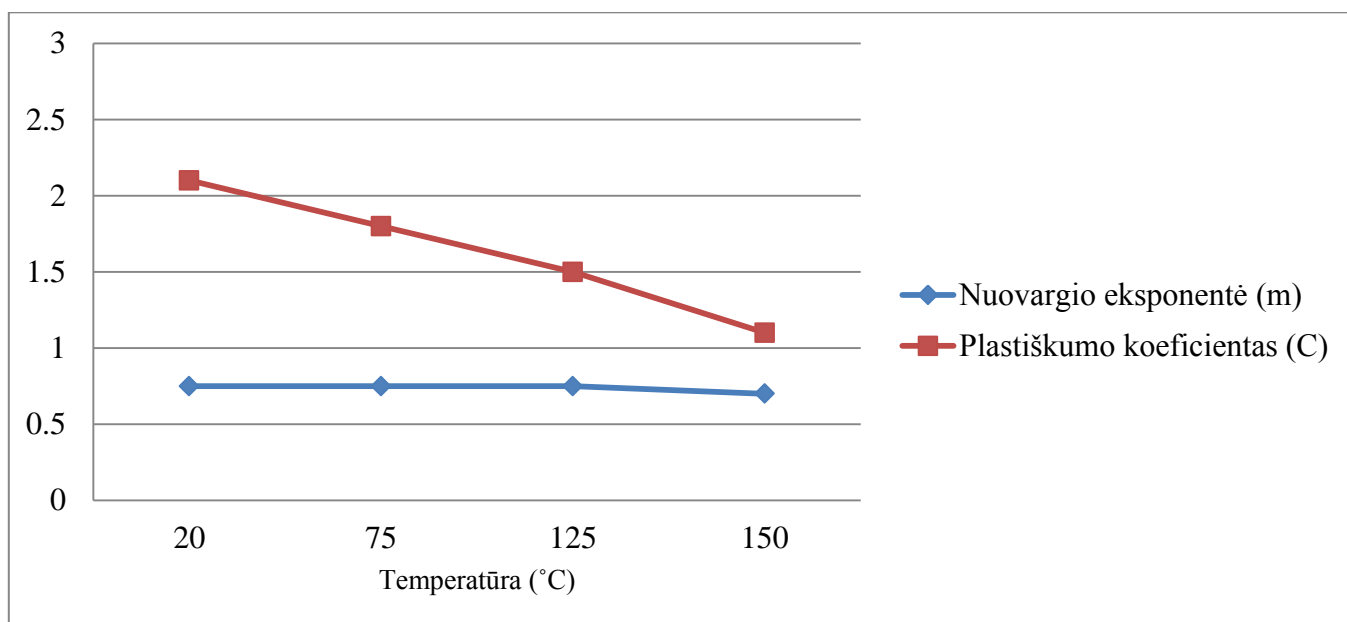
**Darbo pritaikymas.** Atlikti analitiniai skaičiavimai bei nustatytos tarpusavio priklausomybės gali būti panaudotos atliekant energetikos ir naftos pramonės įrenginių konstrukcijų ilgalaikiškumui bei patikimumui užtikrinti.

# 1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

Nuovargis – viena iš pagrindinių ciklinių apkrovų charakteristikų, kuri įtakoja kiekvienos mašinos patvarumą ir eksploataciją. Mažaciklis nuovargis – vienas iš galimų būdų sukeliančių plieno elementų ar jungčių irimą.

Okrajni, J; Junak, G. pateiktame darbe [9] nagrinėjami ilgalaikiškumo metodai, kurie apskaičiuojami matematiniais metodais pasitelkiant eksperimentinio patvirtinimo bandymus. Bandymai buvo atliekami nuosekliai didinant apkrovimo jėga aukštoje temperatūroje norint išsiaiškinti apkrovimo įtaką nuovargiui. Autoriai nustatė, kad mažaciklio tamprumo tyrimai leido nustatyti plienų nuovargį, kaip vientisos deformacijos funkciją veikimo srityje.

X. Q. Shi su bendraautoriais aprašytame straipsnyje [13] atlikti plienų tyrimai buvo vykdomi skirtingo dažnio (1024 – 1 Hz) bei temperatūros (25 – 150 °C) ribose. Atlikus tyrimus pastebėta, kad metalų patvarumas priklauso nuo mažėjančio dažnio bei temperatūros nors jų priklausomybė buvo santykinai nedidelė. 1.1 paveiksle pateikiama plastiškumo koeficiento (C) bei nuovargio eksponentės (m) priklausomybė nuo temperatūros esant tam pačiam bandymo dažniui.



**1.1 pav.** Plastiškumo koeficiento (C) ir nuovargio eksponentės (m) priklausomybė nuo temperatūros [13]

Iš paveikslo matoma, kad nuovargis beveik nepriklauso nuo veikiamos temperatūros, tuo tarpu, plastiškumo koeficientas labai priklauso nuo veikiamos temperatūros.

Junak, G; Ciesla, M. straipsnyje [7] rašoma apie atliktą mažaciklį tyrimą P91 ir P92 plienams, kurie naudojami didelio tikslumo įrengimuose. Plieno tyrimai buvo atliekami kambario temperatūroje. Bandymai atlikti servohidrauline bandymo sistema MTS – 810 (Pav. 1.2).



**1.2 pav.** Servohidraulinė bandymo sistema MTS – 810 [7]

Atlikus tyrimus buvo nustatyta, kad plienai P91 ir P92 parodė panašias mažaciklio nuovargio charakteristikos ( $N_f, \sigma_{an}$ ) matuojamose zonose. Abiejais atvejais buvo pastebimas ciklinis medžiagos susilpnėjimas. Šios medžiagoms būdingas didelis valkšnumas, todėl gali būti naudojamos ypatingomis (kritinėmis) darbo sąlygomis veikiančiuose įrengimuose.

B. R. Baubenspecko [3] darbe tiriami Ni pagrindo plienai, kurie naudojami aukštose 1100 – 1300 °C temperatūrose, tačiau dėl naudojamų dangų bei įvairių aušinimo metodų, duomenys yra iš bandymų, kurie atlikti 750 – 950 °C. Atlikus įtempių bandymus nustatyta, kad nors bendras stiprumas mažėja didėjant medžiagos temperatūrai, tačiau mechaninės savybės medžiagos IN738LC lieka geresnės aukštos temperatūros sąlygomis.

Stulpinaitė, A; Šniuolis, R, savo darbe [15] plačiai išnagrinėjo legiruotųjų konstrukcinių plienų ilgalaikiškumo priklausomybę nuo mechaninių charakteristikų. Taip buvo ištirti ypatingo

ilgalaikiškumo, stiprumo bei patikimumo reikalaujantys plienai. Nagrinėti 74 legiruotųjų plienų, 75 legiruotųjų plienų suvirinimo siūlių medžiagų ir 55 korozijai ir karščiui atsparių plienų, 36 jų suvirinimo siūlių medžiagų normalioje temperatūroje bei 53 legiruotųjų plienų, 40 legiruotųjų plienų suvirinimo siūlių medžiagų ir 46 korozijai ir karščiui atsparių plienų aukštesnėje temperatūroje duomenys. Duomenys surinkti iš Kauno technologijos universiteto, Čekijos, Rusijos bei Vengrijos laboratorijose, kuriose buvo atlikti mažaciklio nuovargio bandymai.

Pagal A. Stulpinaitės [14] atliktą skirstymą, medžiagos buvo suskirstytos į grupes pagal:

- darbo temperatūrą;
- plienų tipą;
- legiruojančius elementus.

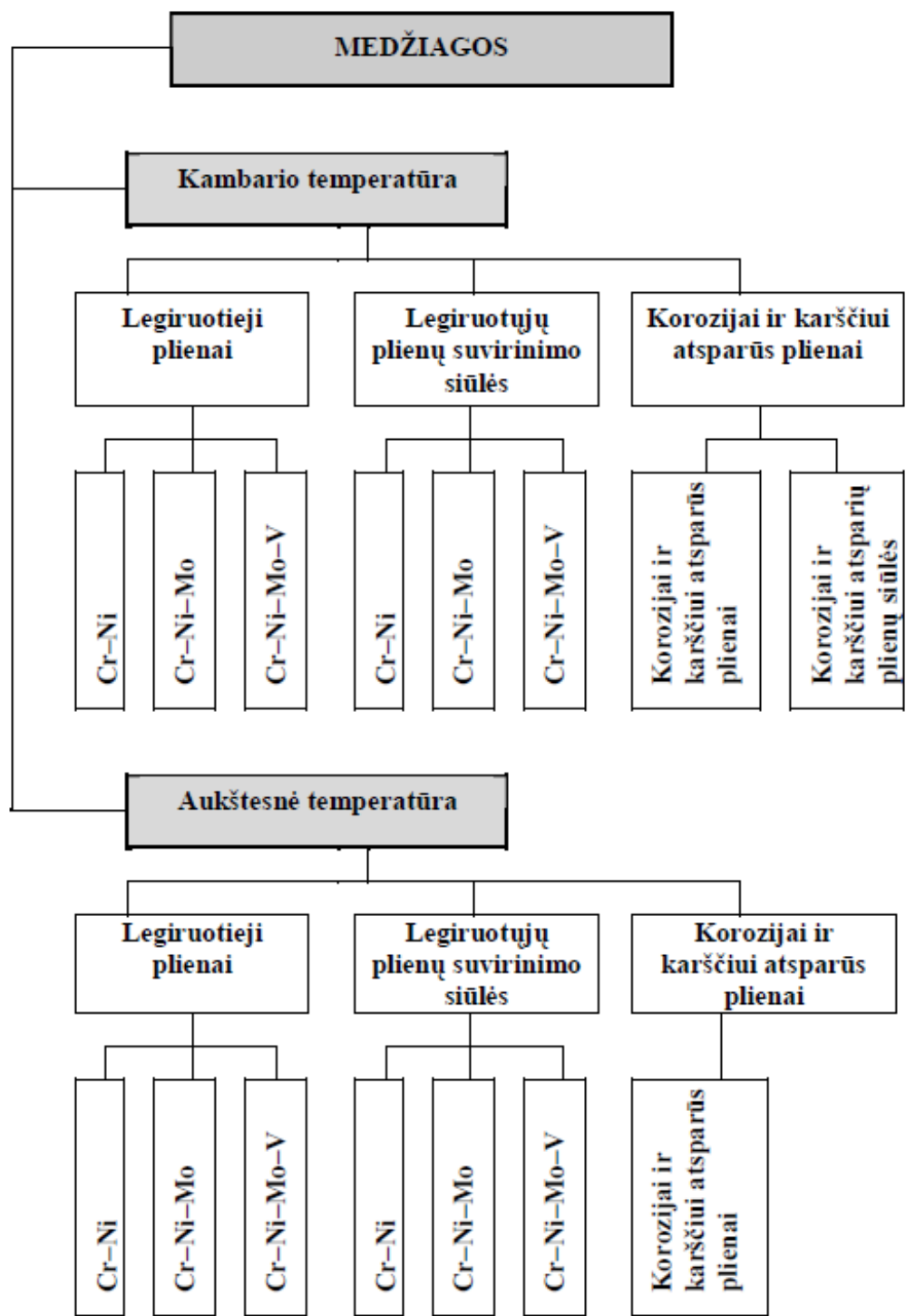
Pagal sugrupuotų legiruotų konstrukcinių plienų cheminius elementus buvo pateiktos šios medžiagų grupės (1.3 pav.).

M. Daunio, A. Stulpinaitės ir R. Šniuolio darbe [5] aprašomas statistinis ciklinių įtempių – deformacijų kreivės parametrai suskirstytų į tris grupes. Tyrimai buvo atliekami, norint išsiaiškinti svarbių konstrukcinių elementų ilgalaikiškumą. Mažaciklio apkrovimo eksperimentai buvo atliekami esant simetriniam įtempių apkrovimui ir įtempių kontolijuojamas sąlygas.

Buvo nustatyta, kad sugrupuotų pagal cheminę sudėtį elementų rezultatai lemia geresnį linijinį ryšį tarp parametru  $m_e$ ,  $C_e$ ,  $m_p$ ,  $C_p$  bei modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  legiruotiems konstrukciniams plienams kambario bei aukštesnėje temperatūrose.

Atlikti statistiniai tyrimai pagrindė, kad suirimo kreivių parametrai, modifikuoto plastiškumo kriterijus  $(\sigma_u/\sigma_y) Z$  yra atsitiktiniai ir nepriklausomi dydžiai, pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį.

Anot M. Daunio, A. Stulpinaitės ir R. Šniuolio [4] mažaciklis ilgalaikiškumas tiesiškai koreliuoja su medžiagų modifikuotu plastiškumu  $(\sigma_u/\sigma_y) Z$ . Pagal atliktus skaičiavimus nustatyta, kad mažaciklio nuovargio kreivės parametrai  $m_e$ ,  $C_e$ ,  $m_p$ ,  $C_p$  legiruotų konstrukcinių plienų suvirintų siūlių modifikuotas plastiškumas  $(\sigma_u/\sigma_y) Z$  kambario ir aukštesnėje temperatūroje yra susiję su tiesine regresija.



1.3 pav. Medžiagų klasifikavimas kambario ir aukštesnėje temperatūroje [14]

## 1.1. Ciklinio nuovargio tyrimai

Pasikartojanti priešingų ženklų arba ženkliai skirtingų dydžių plastinė deformacija labai pagreitina medžiagos nuovarginį irimą. Tokio proceso įtakojami konstrukciniai elementai suyra žymiai greičiau (ne per milijonus ciklų, o per tūkstančius), dažniausiai  $N < 10^5$ . Kintamųjų įtempių konstrukcijose išvengti dažniausiai neįmanoma, todėl reikia žinoti bei naudoti būdus jų įtakai švelninti bei konstrukcijų elementų patvarumui didinti.

Šiame darbe nagrinėjami medžiagų duomenys yra susisteminti, t.y. analizuojami duomenys nustatytame būdingame intervale, pagal stačiakampę diagramą atitinkant kvartilio skirstinį. Ankstesniuose darbuose, medžiagos buvo skirstomos pagal paskirtį, bandymo temperatūrą, darbe [14] atsižvelgiant į lydinių legiruojančius elementus.

Pagal [16] R. Šniuolio atliktą darbą, tiriamos medžiagos buvo sujungtos į bendras grupes išskiriant plienus, plienų siūles, korozijai ir karščiui atsparius plienus plienų siūles. Šių grupių medžiagos buvo tiriamos aukštesnėje bei kambario temperatūroje. Iš šio suskirstymo buvo atmesti ryškiai išsiskiriantys taškai, pagal kuriuos, tiriamų medžiagų kiekis žymiai sumažėjo.



## 2. MAŽACIKLIO NUOVARGIO EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

### 2.1. Ciklinis nuovargis

Mažaciklės apkrovos įvairiuose įrengimuose, jų konstrukcijose, dažniausiai atsiranda įtempių koncentracijos zonose. Deformacijos šiose zonose atsiranda nedideliuose tūriuose kur yra tampriai deformuojamos medžiagos. Šioje vietoje, apkrovimas ypač artimas standžiam apkrovimui su apribota deformacija. Šie nuovarginiai pažeidimai gali būti aprašomi L. F. Kofino lygtimi.

Pagal L. F. Kofino lygtį, medžiagos ilgalaikiškumą, esant standžiam mažacikliam apkrovimui tampriai plastinėje srityje, galima apskaičiuoti pagal plastinę defomaciją [1]:

$$\delta N^{m_p} = C_p; \quad (2.1)$$

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

$N$  – ciklų skaičius iki plyšio susidarymo ar suirimo;

$m_p$  ir  $C_p$  – konstantos pagal galutinį suirimą. Pagal L. F. Kofino pasiūlymą, konstanta  $m_p = 0,5$ .

Medžiagos, kurios yra veikiamos įvairių jėgų, ilgalaikiškumas apkrovimo metu priklauso nuo skerspjuvio santykinio susiaurėjimo  $Z$ . Plastiškumo konstanta  $C_p$  pagal L. F. Kofiną nustatoma pasinaudojus plastikumo charakteristika  $Z$ , tada:

$$C_p = \frac{1}{2} \ln \frac{1}{1-Z}. \quad (2.2)$$

Atliekant standaus apkrovimo bandymus pastebimas cikliškai stiprėjančių ir silpnėjančių medžiagų įtempių ir tampriųjų bei plastinių deformacijų kitimas. Dėl šios priežasties, L. F. Kofino lygtyje nustatoma ekvivalentinė plastinė deformacija.

Atliekant standaus apkrovimo bandymus, pastebimi cikliškai stiprėjantys ir silpnėjantys medžiagų įtempiai, plastinių deformacijų kitimai. Pagal tai, Kofino lygtyje ekvivalentinė plastinė deformacija nustatoma naudojant  $\frac{1}{k} \sum_0^k \delta_k$  išraišką. Ciklinė plastinė deformacija priklauso nuo ciklų skaičiaus, todėl  $\delta N^{m_p} = C_p$  (2.2) lygybėje siūloma taikyti stabilizuotą histerezės kilpos plotį, kai pusė ilgalaikiškumo iki nuovargio plyšio susidarymo, tame apkrovime, lygio.

**Ciklinio nuovargio eksperimento rezultatų apdorojimas.** Konstantų  $C_p$  ir  $C_e$  eksperimentinės reikšmės nustatomos tęsiant mažaciklio nuovargio kreivės pagal plastinę ir tamprią deformacijas iki  $N_f = 1$  ciklo. Panaudojus L.F. Kofino (2.2) lygtį apskaičiuojama konstanta  $m_p$  pagal plastinę deformaciją [14].

$$\lg \bar{\delta} = -m_p \lg k_f + \lg C_p. \quad (2.3)$$

Siekiant sumažinti sklaidą, šiame darbe ilgalaikiškumas tampriai plastinėje srityje apskaičiuojamas, įvertinus tamprią ir plastinę deformacijas, pagal mažaciklio nuovargio kreivės lygtį [8]:

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

čia:  $\varepsilon$  – ciklinė tampriai plastinė deformacija;

$m_p, C_p, m_e, C_e$  – nuovargio kreivių parametrai įvertinus tamprią ir plastinę deformaciją.

**Ciklinio nuovargio rezultatų apibendrinimas.** Pagal atliktus tyrimus, plienai buvo sugrupuoti į:

- legiruotus plienus;
- legiruotų plienų suvirinimo siūlės.

Visos šios grupės, buvo tiriamos kambario bei aukštesnėje temperatūrose. Nustatyti intervalai bei atrinktos medžiagos, kurios buvo tiriamos bus pateikti kituose skyriuose. Atlikus apibendrinimus, buvo eliminuotos 121 medžiagos, kurių duomenų reikšmės pasinaudojus stačiakampės diagramos bei kvartilinio pločio duomenimis, buvo nenatūraliai didesni ar mažesni už daugumos rezultatų reikšmes.

## 2.2. Tiriamos medžiagos

Analizė atliekama legiruotų plienų bei suvirinimo siūlių grupėms priskiriamų medžiagų. Daugelis šių medžiagų yra eksploatuojamos kambario ar aukštesnėje temperatūroje, todėl šie duomenys tarptautiniu lygiu klasifikuojami į dvi grupes:

- kambario temperatūroje ( $\sim 20^\circ\text{C}$ );
- aukštesnėje temperatūroje ( $200 - 500^\circ\text{C}$ ).

### 3. KOFINO KREIVĖS PARAMETRŲ IR MECHANINIŲ CHARAKTERISTIKŲ RYŠIO TYRIMAS

#### 3.1. Tiriamų medžiagų intervalų nustatymas

Kitų autorių darbuose pastebėta kad, nagrinėjamų duomenų sklaida koncentruojasi tam tikrame intervale pagal medžiagų mechanines charakteristika. Taikant kvartilinio imties metodą, pasinaudojus programine įranga, buvo nustatyti atitinkami duomenų imties intervalai, kurie bus paminėti kituose skyriuose. Medžiagų modifikuoto plastiškumo kriterijaus duomenų sklaida atskiroms medžiagų grupėms pateikti 3.1 – 3.4 paveiksluose.

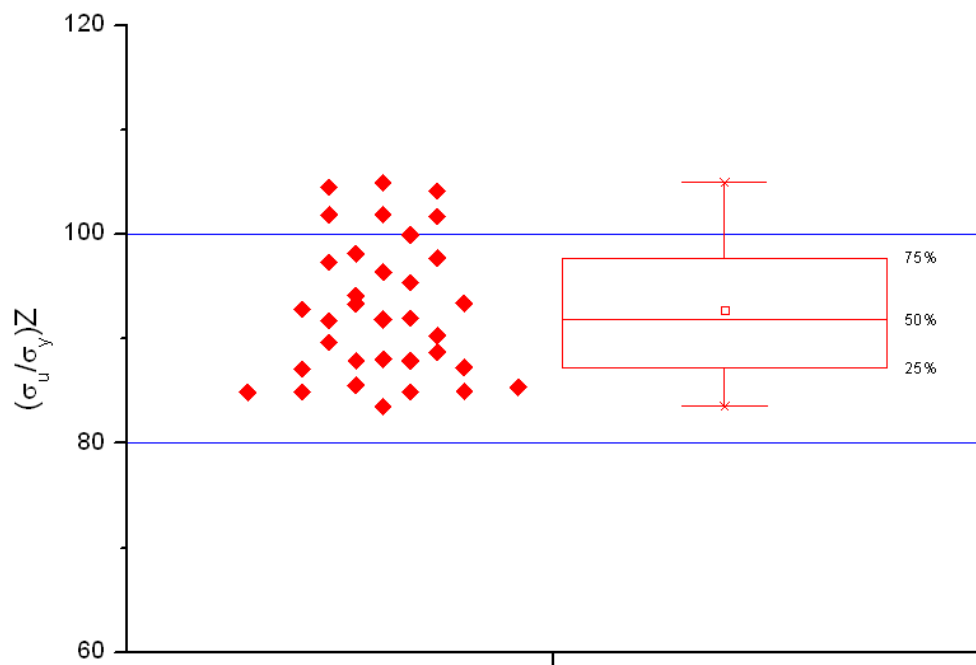
Po pirmo medžiagų intervalų išrinkimo, tiriamų medžiagų kiekis ženkliai sumažėja. Pritaikius kvartilio pločio metodą bei panaudojus kompiuterinę programą, nustatyti bei priimti šie tiriamų medžiagų intervalai pagal kurių duomenis bus atliekamas statistinis tyrimas.

- Legiruoti plienai kambario temperatūroje: 0,83 ... 1,05;
- Plienų siūlės kambario temperatūroje: 0,88 ... 1,10;
- Legiruoti plienai aukštesnėje temperatūroje: 0,70 ... 1,25;
- Plienų siūlės aukštesnėje temperatūroje: 0,70 ... 1,25.

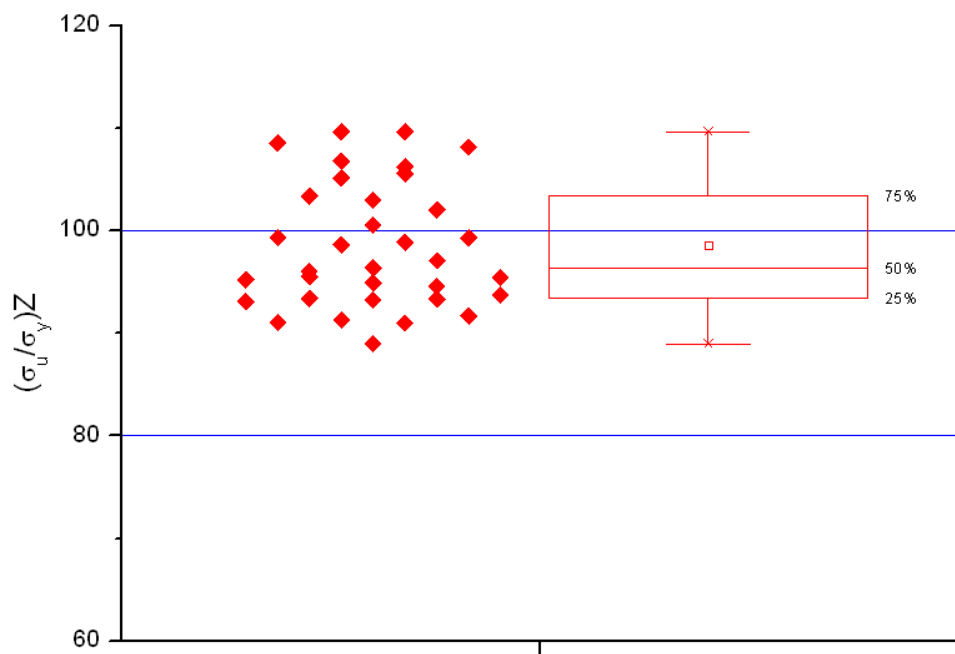
Pateikti modifikuoto plastiškumo kriterijų ( $\sigma_u/\sigma_y$ )Z intervalai procentinėmis reikšmėmis norint padidinti duomenų tikslumą skaičiavimuose.

Kvartilio imties pločio metodas dažnai naudojamas statistiniuose uždaviniuose. Šis metodas dalija kintamųjų reikšmių aibę į keturias grupes, kurios suskirstytos po 25 % imties reikšmes.

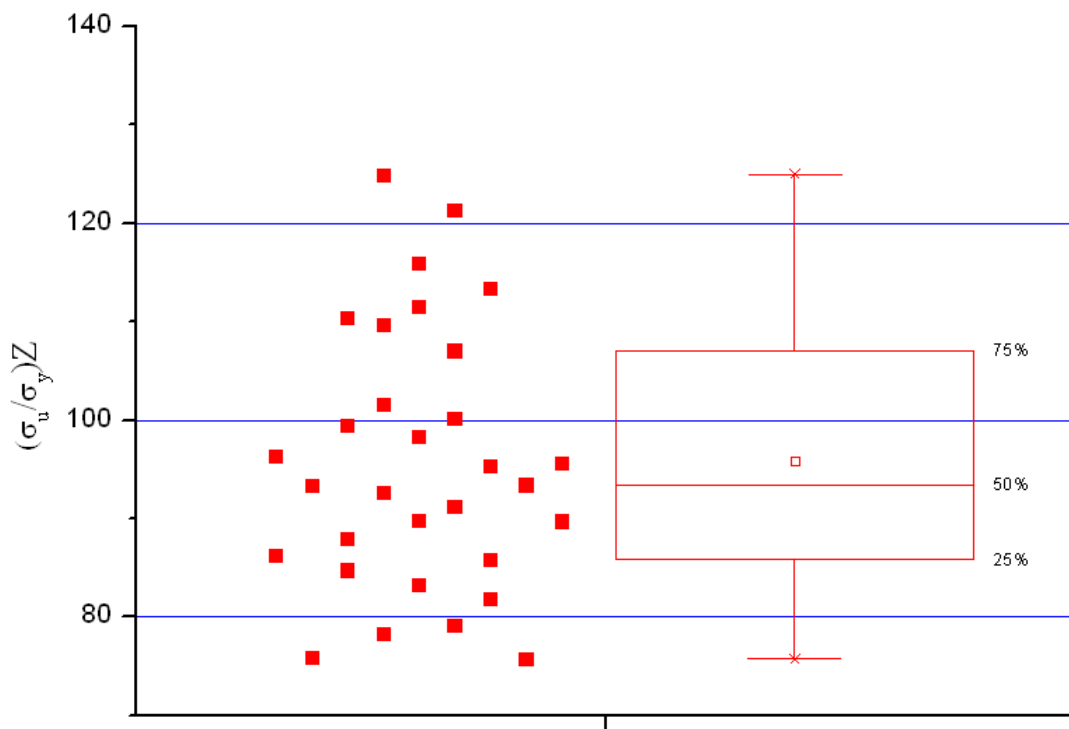
Naudojant į šiuos intervalus patenkančias medžiagas, jos, kvartilio pločio metodu, apdorojamos dar kartą, siekiant patikslinti intervalus palyginant tiriamų medžiagų pirmuoju medžiagų atmetimu kiekvienai grupei.



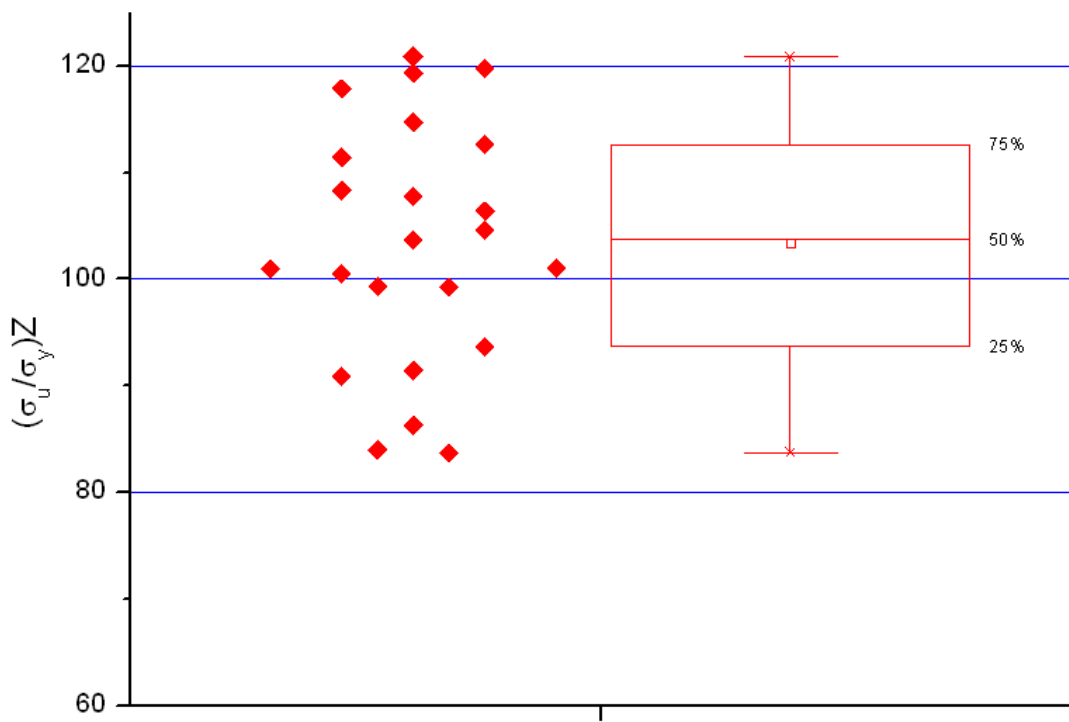
**3.1 pav.** Legiruoti plienai kambario temperatūroje



**3.2 pav.** Plienų siūlės kambario temperatūroje



3.3 pav. Legiruoti plienai aukštesnėje temperatūroje



3.4 pav. Plienų siūlės aukštesnėje temperatūroje

Atlikus antrą medžiagų atmetimo tyrimą su duomenimis, gautais po pirmojo medžiagų atmetimo, gauti intervalai:

- Legiruoti plienai kambario temperatūroje: 0,87 ... 0,97;
- Plienų siūlės kambario temperatūroje: 0,93 ... 1,03;
- Legiruoti plienai aukštesnėje temperatūroje: 0,86 ... 1,07;
- Plienų siūlės aukštesnėje temperatūroje: 0,93 ... 1,13.

Po atlikto antrojo medžiagų atmetimo gautų intervalų matome, jog tiriamų medžiagų ribos susiaurėja, todėl naudotis gautais duomenimis nėra tikslinga. Naudojamės intervalais, gautais po pirmojo medžiagų intervalo išskyrimo.

### 3.2. Tiriamų medžiagų statistika

Atlikus palyginimą, tiriant intervalus pirmą bei antrą kartą, buvo priimta, kad tolimesni tyrimai bus atliekami su medžiagomis patekusiomis į pirmąjį nustatytą intervalą. Tokiu būdu, tyrimai bus atliekami su didesniu tiriamų medžiagų kiekiu, kas leis padidinti tyrimo tikslumą. Priimti intervalai, pagal kuriuos bus atliekami tolimesni tyrimai pateikti 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. Tiriamų medžiagų kiekio kitimas

| Ciklinės charakteristikos                              | Medžiagų skaičius tyrimo pradžioje | Medžiagų skaičius po pirmo medžiagų atmetimo | Priimtas intervalas | Medžiagų skaičius po antro medžiagų atmetimo |
|--|------------------------------------|--|---------------------|--|
| KAMBARIO TEMPERATŪROJE (~20°C)                         |                                    |  |                     |  |
| <b>Legiruoti konstrukciniai plienai</b>                |                                    |  |                     |  |
| $m_p$  | 74                                 | 34   | 0,83 – 1,05         | 20   |
| $C_p$  |                                    |  |                     |  |
| $m_e$  |                                    |  |                     |  |
| $C_e$  |                                    |  |                     |  |
| <b>Legiruotų konstrukcinių plienų siūlių medžiagos</b> |                                    |  |                     |  |
| $m_p$  | 75                                 | 34   | 0,88 – 1,10         | 16   |
| $C_p$  |                                    |  |                     |  |
| $m_e$  |                                    |  |                     |  |
| $C_e$  |                                    |  |                     |  |

| AUKŠTESNĖJE TEMPERATŪROJE (200 – 500 °C)        |    |    |             |    |
|---|----|----|-------------|----|
| Legiruoti konstrukciniai plienai                |    |    |             |    |
| $m_p$   | 59 | 29 | 0,70 – 1,25 | 15 |
| $C_p$   |    |    |             |    |
| $m_e$   |    |    |             |    |
| $C_e$   |    |    |             |    |
| Legiruotų konstrukcinių plienų siūlių medžiagos |    |    |             |    |
| $m_p$   | 40 | 23 | 0,70 – 1,25 | 13 |
| $C_p$   |    |    |             |    |
| $m_e$   |    |    |             |    |
| $C_e$   |    |    |             |    |

### 3.3. Ryškiai išsiskiriančių taškų atmetimas

Surinkta medžiaga apie kiekvieną medžiagą reikalauja ypatingo dėmesio juos apdorojant bei atrenkant. Šiuo atveju, norint naudoti numatytą statistinį metodą, būtiną patikrinti ar tarp tyrimo rezultatų duomenų nėra labai išsiskiriančių duomenų reikšmių, nes jie gali iškreipti vidutinę reikšmę ir mažinti koreliacinį ryšį.

Ypatingai išsiskiriančių duomenų atmetimui naudoti kvartilio pločio bei mažai tikėtinų reikšmių atmetimo pagal grafinį vaizdą metodai.

Naudojant kvartilio pločio metodą, vaizduojamos duomenų skaitinės charakteristikos. Išskirčių eliminavimui – naudojamas kvartilinis plotis, kurį pasiūlė Džonas Tjukis [6].

Išskirtis – tai duomenų reikšmė, išsiskirianti iš bendros visumos, t.y. reikšmė, kuri yra nenatūraliai didesnė arba mažesnė už kitas duomenų reikšmes [6].

$$KP = x_{0,75} - x_{0,25}; \quad (3.1)$$

čia:  $x_{0,75}$  – viršutinis (trečiasis) kvartilis;  
 $x_{0,25}$  – apatinis (pirmasis) kvartilis.

Kvartilinis apibūdina vidurinių 50% imties reikšmių sklaidą. Variacinės eilutės pirmasis arba  $n - 1$  – tasis narys priklauso tai pačiai duomen grupei (nėra išsiskiriantis), jei tenkinamos nelygybės:

$$x_1 \geq x_{0,25} - 1,5KP \text{ arba } x_n \leq x_{0,75} + 1,5KP. \quad (3.2)$$

Duomenys, kurie buvo analizuojami pagal mažai tikėtinų reikšmių atmetimo pagal grafinį vaizdą metodą, buvo gauti naudojantis „Origin 8.0“ kompiuterine programa. Gauti grafiniai vaizdai leido iširti, palyginti, sudaryti bei atmesti nereikalingas medžiagas būdinguose intervaluose. Šie metodo pritaikymo duomenys pateikti grafiniu būdu (3.1 – 3.4 pav.).

Dar vienas būdas, kuriuo naudojantis galima atmesti ryškiai išsiskiriančių duomenų atmetimą – **N. Smirnov**o kriterijus. Šis kriterijus [19] dažniausiai taikomas, kai žinomi parametrų įverčiai. Surinkus tyrimo imties elementus didėjimo tvarka – sudaroma variacinė seka:

$$x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_n. \quad (3.3)$$

Pirminis skaičiavimas vadinamas imties vidurkiu. Jis apibūdina imties vidutinę reikšmę, kuris esant nedideliame duomenų skaičiui ( $n < 50$ ), empirinis vidurkis skaičiuojamas pagal:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (3.4)$$

Atsitiktinis dydį  $X$  nusako dispersija:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \right]; \quad (3.5)$$

čia:  $x_i$  – dydžio  $X$  reikšmės;  
 $n$  – duomenų skaičius.

Imties dispersija matuojama kvadratiniais vienetais. Sklaida dažniausiai apibūdinama naudojantis kita charakteristika – imties standartiniu nuokrypiu:

$$s = \sqrt{s^2}. \quad (3.6)$$



Žymiai išsiskiriančio duomenų variancinės eilutės pirmojo nario atmetimui skaičiuojama statistika:

$$u_1 = \frac{\bar{x} - x_1}{s}, \quad (3.7)$$

jei abejojama dėl didžiausią reikšmę turinčio variancinės sekos nario:

$$u_n = \frac{x_n - \bar{x}}{s}. \quad (3.8)$$

Duomenų atmetimas pradedamas nuo hipotezės suformulavimo:

$H_0$ : didžiausia reikšmė  $x_n$  (arba mažiausia  $x_1$ ) priklausanti tai pačiai duomenų grupei;

$H_a$ : didžiausia reikšmė  $x_n$  (arba mažiausia  $x_1$ ) ryškiai išsiskirianti reikšmė.

Apskaičiuoti duomenys yra lyginami su kritine riba  $u_p$  [19] parenkant ją pagal reikšmingumo lygį  $p$  bei duomenų kiekį  $n$ .

Jeigu apskaičiuoto pirmojo bei  $n -$  tojo nario variancinės sekos nario statistikos yra lygio arba mažesnės už kritinę statistikos reikšmę, tai:

$$u_1 \leq u_p \text{ arba } u_n \leq u_p, \quad (3.9)$$

tada nulinė hipotezė priimama, t. y. pirmojo ir paskutiniojo tyrimo rezultatų reikšmė su pasirinktąja garantija nelaikomi ryškiai išsiskiriančia, todėl jos atmesti nėra pagrindo.

Kai nelygybės yra tenkinamos:

$$u_1 > u_p \text{ arba } u_n > u_p, \quad (3.10)$$

nulinė hipotezė atmetama, t. y. priimama alternatyvi hipotezė ( $x_n$  arba  $x_1$  reikšmė žymiai išsiskirianti ir ji yra atmetama). Atmetus išsiskiriančius dydžius, anksčiau apskaičiuoti įvertinimai  $\bar{x}$  ir  $s$  privalomi koreguoti imant  $n - 1$  bei vėl tikrinami kiti abejonių keliantys duomenys.

**3.2 lentelė.** Legiruotų konstrukcinių plienų nuovargio charakteristikos  $C_p$  (kambario temperatūroje) ryškiai išsisikiriančių taškų atmetimas

| Apskaičiuota reikšmė N. Smirnovu metodu        |                        |                    |                      |            |     |  |       |                            |                            |
|--|------------------------|--------------------|----------------------|------------|-----|--|-------|----------------------------|----------------------------|
| Eilės numeris                                  | $x_i$                  | $\sum_{i=0}^n x_i$ | $\sum_{i=0}^n x_i^2$ | $\bar{x}$  | $n$ | $s$  | $u_n$ | $u_{0,05}$                 | Atmesta „-“, neatmesta „+“ |
| 2  | 43,5                   | 6983,61            | 1804305              | 225,3      | 34  | 87,76  | 1,72  | 2,66                       | -                          |
| 33   | 11,7                   |                    |                      |            |     |  | 2,01  |                            | -                          |
| Apskaičiuota reikšmė kvartilinio pločio metodu |                        |                    |                      |            |     |  |       |                            |                            |
| Eilės numeris                                  | Variacinės sekos narys | $x_i$              | $x_{0,25}$           | $x_{0,75}$ | KP  | $x_i \geq x_{0,25} - 1,5KP$<br>$x_n \leq x_{0,75} + 1,5KP$ |       | Atmesta „-“, neatmesta „+“ |                            |
| 2  | $x_i$                  | 43,5               | 83                   | 105        | 22  | 43,5 ≤ 50  |       | -                          |                            |
| 33   | $x_i$                  | 11,7               |                      |            |     | 11,7 ≤ 50  |       | -                          |                            |

**3.3 lentelė.** Atmestos medžiagos, tiriamų medžiagų skaičius po atmetimo

|                                       |                           | Ciklinės charakteristika | Tiriamų medžiagų kiekis |
|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Legiruoti konstrukciniai plienai      | Kambario temperatūroje    | $m_p$                    | 24                      |
|                                       |                           | $C_p$                    | 24                      |
|                                       |                           | $m_e$                    | 25                      |
|                                       |                           | $C_e$                    | 22                      |
|                                       | Aukštesnėje temperatūroje | $m_p$                    | 19                      |
|                                       |                           | $C_p$                    | 20                      |
|                                       |                           | $m_e$                    | 17                      |
|                                       |                           | $C_e$                    | 20                      |
| Legiruotų konstrukcinių plienų siūlės | Kambario temperatūroje    | $m_p$                    | 24                      |
|                                       |                           | $C_p$                    | 21                      |
|                                       |                           | $m_e$                    | 16                      |
|                                       |                           | $C_e$                    | 21                      |
|                                       | Aukštesnėje temperatūroje | $m_p$                    | 17                      |
|                                       |                           | $C_p$                    | 19                      |
|                                       |                           | $m_e$                    | 13                      |
|                                       |                           | $C_e$                    | 12                      |

Atmestų medžiagų kiekis, lyginant su medžiagų kiekiu nustatytu parinkus intervalus sumažėjo apie 10 %.

### 3.4. Rezultatų atsitiktinumo bei nepriklausomumo statistinis tikrinimas

**Serijų kriterijus, naudojant imties medianą** [9]. Iš tiriamos imties  $x_1, x_2, \dots, x_n$  elementų sudaroma didėjančia tvarka einanti variacinė seka. Apskaičiuojama duomenų padėties charakteristika – mediana  $x_{me}$ , dalinanti duomenis į dvi dalis, t. y. 50% imties narių reikšmės yra ne didesnės už  $x_{me}$  ir 50% imties narių reikšmės ne mažesnės už  $x_{me}$ . Jei tiriamų medžiagų skaičius:

- nelyginis ( $n = 2m - 1$ ), tai medianos reikšmė lygi vidutiniam variacijos sekos nariui;
- lyginis ( $n = 2m$ ), tai medianos reikšmė lygi vidutinio  $x_m$  ir  $x_{m+1}$  variacinės sekos nariui.

Nagrinėjamų duomenų imties  $x_1, x_2, \dots, x_n$  statistiniam nepriklausomumo įvertinimui būtina sudaryti ženklų eilutę priskiriant „+“ ženklą  $x_i$ , kai  $x_i > x_{me}$ , o kai  $x_i < x_{me}$  – priskiriamas „-“ ženklas. Jei imties narių reikšmės yra lygios medianos reikšmei, tai tokie nariai yra neįvertinami. Su šia sąlyga sudaroma „+“ ir „-“ eilutės, kurios tas pats ženklas sudaro seriją. Viena pliuso ar minuso gauta reikšmė taip pat gali sudaryti seriją. Esama ženklų seka apibūdinama charakteristikomis: bendras serijų skaičius  $\gamma_n$  bei ilgiausio plus arba minus ženklo serijų elementų skaičius  $\tau_n$ . Pagal gautus rezultatus, atitinkamų ženklų priskyrimas yra atsitiktinis. Ženklų serijoje negali būti ilgų vienodų reikšmių, todėl serijų skaičius  $\gamma_n$  neturi būti labai mažas.

Pasirinkus reikšmingumo lygmenį  $p$ , nagrinėjami duomenys yra nepriklausomi jei tenkinamos nelygybės:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_n &> \left[ \frac{1}{2}(n+1 - x_p \sqrt{n-1}) \right] \\ \tau_n &< 3,3[(lgn+1)] \end{aligned} \right\}; \quad (3.11)$$

čia:  $x_p$  – normaliojo pasiskirstymo kvantilis. Naudojama sveika skaičiaus dalis.

Kvantilis dalina variacinės sekos narius į  $p \cdot 100\%$  ir  $(1-p) \cdot 100\%$  dalis ( $0 < p < 1$ ), t.y.  $p \cdot 100\%$  imties reikšmių yra nedidesnės už kvantilį ir  $(1-p) \cdot 100\%$  – nemažesnės už kvantilį  $x_p$  [14]

**3.4 lentelė.** Legiruotų konstrukcinių plienų nuovargio kreivės parametro  $m_p$  reikšmių atsitiktinumo ir nepriklausomumo statistinis tikrinimas, naudojant imties medianą

| Serijų kriterijus, naudojant medianą |       |                |                           |       |                |
|--------------------------------------|-------|----------------|---------------------------|-------|----------------|
| Kambario temperatūroje               |       |                | Aukštesnėje temperatūroje |       |                |
| $i$                                  | $m_p$ | $x_i - x_{me}$ | $i$                       | $m_p$ | $x_i - x_{me}$ |
| 1                                    | 0,73  | -              | 1                         | 0,79  | +              |
| 2                                    | 0,95  | +              | 2                         | 0,83  | +              |
| 3                                    | 0,95  | +              | 3                         | 0,63  | -              |
| 4                                    | 0,97  | +              | 4                         | 0,7   | -              |
| 5                                    | 0,94  | +              | 5                         | 0,73  | -              |
| 6                                    | 0,77  | -              | 6                         | 0,82  | +              |
| 7                                    | 0,86  | +              | 7                         | 0,77  | -              |
| 8                                    | 0,84  | -              | 8                         | 0,92  | +              |
| 9                                    | 0,84  | -              | 9                         | 0,79  | +              |
| 10                                   | 0,86  | +              | 10                        | 0,82  | +              |
| 11                                   | 0,79  | -              | 11                        | 0,89  | +              |
| 12                                   | 0,85  | -              | 12                        | 0,81  | +              |
| 13                                   | 0,91  | +              | 13                        | 0,6   | -              |
| 14                                   | 0,84  | -              | 14                        | 0,8   | +              |
| 15                                   | 0,86  | +              | 15                        | 0,71  | -              |
| 16                                   | 0,87  | +              | 16                        | 0,83  | +              |
| 17                                   | 0,78  | -              | 17                        | 0,81  | +              |
| 18                                   | 1,00  | +              | 18                        | 0,78  | -              |
| 19                                   | 0,91  | +              | 19                        | 0,72  | -              |
| 20                                   | 0,8   | -              |                           |       |                |
| 21                                   | 0,86  | +              |                           |       |                |
| 22                                   | 0,77  | -              |                           |       |                |
| 23                                   | 0,85  | -              |                           |       |                |
| 24                                   | 0,71  | -              |                           |       |                |

**3.5 lentelė.** Serijų kriterijaus, naudojant medianą, gautų duomenų lentelė

| Rodiklis | Kambario temperatūra | Aukštesnė temperatūra |
|----------|----------------------|-----------------------|
| $x_{me}$ | 0,855                | 0,79                  |
| $\gamma$ | $9 > 8$              | $9 > 7$               |
| $\tau_n$ | $4 < 14$             | $5 < 13$              |

Skaičiavimo pavyzdys legiruotiems konstrukciniams plienams kambario temperatūroje:

$$x_{me} = 0,855;$$

$$\gamma = \left[ \frac{1}{2} (24 + 1 - 0,855 \cdot \sqrt{24 - 1}) \right] = 9;$$

$$\tau = 4 < [3,3(\lg 24 + 1)] = 14.$$

**Kylančių ir krintančių serijų kriterijus** [9]. Tiriamai duomenų imčiai  $x_1, x_2, \dots, x_n$  būtina sudaryti ženklų eilutę. Esant  $x_{i+1} - x_i > 0$  – variacinės eilutės sekos nariui  $x_i$  priskiriamas ženklas „+“, o jei  $x_{i+1} - x_i < 0$ , tai variacinės eilutės sekos nariui priskiriamas „-“ ženklas. Pasitaiko atveju, kai turimų duomenų imties eilutėje dviejų ar daugiau vienas po kito einančių elementų reikšmės gali lygios, tokiu atveju, vertinama tik viena reikšmė.

Gaunami „+“ ženklų pažymėti duomenys žymi reikšmių didėjimą (kylanti serija), o „-“ ženklų pažymėti duomenys atitinka reikšmių mažėjimą (krentanti serija). Esant nepriklausomiems ir atsitiktiniams rezultatams sudarytos ženklų eilutės serijų skaičius neturi būti labai mažas, o ir serijos ilgis neturi būti didelis.

Kai pasirenkamas reikšmingumo lygmuo  $p$  nagrinėjimui, duomenys yra nepriklausomi pagal kylančių ir krintančių serijų kriterijų, tada turi būti tenkinamos nelygybės:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_n &> \left[ \frac{1}{3} (2n - 1) - x_p \sqrt{\frac{16n - 29}{30}} \right]; \\ \tau_n &< \tau_k \end{aligned} \right\}; \quad (3.12)$$

čia:  $\gamma_n$  – serijų skaičius;

$x_p$  – normaliojo pasiskirstymo kvantilis;

$\tau_n$  – didžiausias serijos ilgis.

Jei bent viena iš (3.11) ar (3.12) nelygybių nėra tenkinama, tai tikrinama hipotezė, kad tyrimo rezultatai yra nepriklausomi, atmetama su  $(1 - p) \cdot 100\%$  garantija.

Vieni, legiruotų konstrukcinių plienų nuvargio kreivių parametru  $m_p$  duomenys kambario temperatūroje yra pateikiami 3.6 lentelėje. Tyrimas atliekamas naudojant imties medianą bei kylančių bei krintančių serijų kriterijais.

**3.6 lentelė.** Legiruotų konstrukcinių plienų siūlių nuvargio kreivės parametro  $C_p$  reikšmių atsitiktinumą ir nepriklausomumą statistinis tikrinimas, naudojant kylačių ir krintančių serijų kriterijų

| Kylančių ir krintančių serijų kriterijus |       |                 |                           |       |                 |
|--|-------|-----------------|---------------------------|-------|-----------------|
| Kambario temperatūroje                   |       |                 | Aukštesnėje temperatūroje |       |                 |
| $i$                                      | $m_p$ | $x_{i+1} - x_1$ | $i$                       | $m_p$ | $x_{i+1} - x_1$ |
| 1  | 0,73  | +               | 1                         | 0,79  | +               |
| 2  | 0,95  | +               | 2                         | 0,83  | -               |
| 3  | 0,95  | +               | 3                         | 0,63  | +               |
| 4  | 0,97  | -               | 4                         | 0,70  | +               |
| 5  | 0,94  | -               | 5                         | 0,73  | +               |
| 6  | 0,77  | +               | 6                         | 0,82  | -               |
| 7  | 0,86  | -               | 7                         | 0,77  | +               |
| 8  | 0,84  | +               | 8                         | 0,92  | -               |
| 9  | 0,84  | +               | 9                         | 0,79  | +               |
| 10                                       | 0,86  | -               | 10                        | 0,82  | +               |
| 11                                       | 0,79  | +               | 11                        | 0,89  | -               |
| 12                                       | 0,85  | +               | 12                        | 0,81  | -               |
| 13                                       | 0,91  | -               | 13                        | 0,60  | +               |
| 14                                       | 0,84  | +               | 14                        | 0,80  | -               |
| 15                                       | 0,86  | +               | 15                        | 0,71  | +               |
| 16                                       | 0,87  | -               | 16                        | 0,83  | -               |
| 17                                       | 0,78  | +               | 17                        | 0,81  | -               |
| 18                                       | 1,00  | -               | 18                        | 0,78  | -               |
| 19                                       | 0,91  | -               | 19                        | 0,72  | -               |
| 20                                       | 0,8   | +               |                           |       |                 |
| 21                                       | 0,86  | -               |                           |       |                 |
| 22                                       | 0,77  | +               |                           |       |                 |
| 23                                       | 0,85  | -               |                           |       |                 |
| 24                                       | 0,71  | +               |                           |       |                 |

**3.7 lentelė.** Serijų kriterijaus, naudojant medianą, gautų duomenų lentelė

| Rodiklis          | Kambario temperatūra | Aukštesnė temperatūra |
|-------------------|----------------------|-----------------------|
| $\gamma$          | $16 > 13$            | $11 > 10$             |
| $\tau_n < \tau_k$ | $3 < 5$              | $4 < 5$               |

Skaičiavimo pavyzdys legiruotų konstrukcinių plienų siūlėms kambario temperatūroje:

$$16 > \left[ \frac{1}{3} (2 \cdot 24 - 1) - 0,855 \sqrt{\frac{16 \cdot 24 - 29}{30}} \right] = 13;$$

$$\tau_n < \tau_k = 3 < 5$$

**3.5. Deformavimo, nuovargio parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus reikšmių pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezių tikrinimas**

Darbe, deformavimo, nuovargio bei modifikuoto plastiškumo kriterijaus duomenų pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezes tikrinant keturiais metodais:

- Deivido kriterijumi, naudojant imties plotį;
- Vidutinio absoliutinio nuokrypiu (VAN);
- Šapiro ir Vilko suderinamumo kriterijumi;
- Kolmogorovo ir Smirnov testu.

Visiems metodams atlikti, duomenys pateikti priedų 1 – 4 lentelėse.

Taikant *Deivido* kriterijaus metodą, naudojant imties plotį (*IP*), nustatomas skirtumas tarp didžiausios  $x_{\max}$  ir mažiausios  $x_{\min}$  imties reikšmių. Šis metodas tinkamas, kai eliminuotos visos išsiskiriančios reikšmės bei kai  $3 \leq n \leq 1000$ .

Parinktus hipotezės reikšmingumo lygmenį  $p$ , apskaičiuotą santykį  $IP/s$  ( $IP$  – imties plotis,  $s$  – standartinis nuokrypis) lyginame su [18] lentelėje duotomis viršutinėmis ir apatinėmis kritinėmis santykio ribomis.

Jei suskaičiuota santykio  $IP/s$  reikšmė mažesnė už šį lygmenį atitinkančia apatinės ribos reikšmę arba didesnė už šį lygmenį atitinkančia viršutinės ribos reikšmę, tai, esant pasirinktam reikšmingumo lygmeniui  $p$ , hipotezė apie normalųjį pasiskirstymą atmetama. Tai ypač svarbu, kad reikšmingumo lygmuo  $p = 0,1$ , t.y. 10% (gretutinės) ribos [14].

Skaičiavimas atliktas su legiruotais konstrukciniais plienais kambario temperatūroje nuovargiui  $m_p$  apskaičiuoti. Duomenys skaičiavimui paimti iš 1 priedo.

Apskaičiuota:

- imties plotis  $IP = 0,29$  (skirtumas tarp didžiausios  $x_{max}$  bei mažiausios  $x_{min}$  imties reikšmių);
- apskaičiuotas standartinis nuokrypis  $s = 0,0753$ ;
- apskaičiuotas dispersijos įvertis  $s^2 = 0,0057$ . Dydžiai apskaičiuoti pagal (3.5) bei (3.6) formules;
- apskaičiuotas Deivido kriterijus  $\frac{IP}{s} = 3,85$ .

Pagal tiriamų duomenų kiekį  $n = 24$  parenkamos viršutinės – 3,34 bei apatinės 4,71 reikšmių ribos [18]. Pagal tai gauname, kad gautas rezultatas netenkina lygybės, todėl hipotezė priimama, skirstinys normalus. Medžiagos pasiskirsto pagal normalųjį dėsnį.

**Vidutinio absoliutinio nuokrypio (VAN) naudojimas** [18]. Pagal tyrimo gautų rezultatų sklaidą apie vidutinę reikšmę, galima apibūdinti vidutinį absoliutinį nuokrypį. Sklaidos apibūdinimo metodologija sumažina ryškiai išsiskiriančių reikšmių įtaką. VAN apskaičiuojamas:

$$VAN = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n}. \quad (3.13)$$

Nagrinėjamų tyrimo rezultatų pasiskirstymo dėsnis artimas normaliajam skirstiniui, jei tenkinama lygybė [14]:

$$\left| \frac{VAN}{s} - 0.7979 \right| < \frac{0.4}{\sqrt{n}}; \quad (3.14)$$

čia:  $s$  – imties standartinis nuokrypis, apskaičiuotas pagal  $s = \sqrt{s^2}$ .

Legiruotų konstrukcinių plienų kambario temperatūroje parametro  $m_p$  atliktų skaičiavimų gauti duomenys pagal absoliutinį nuokrypį:

- $VAN=0,0336$ ;
- dispersijos įvertis  $s^2 = 0,0024$ ;
- standartinis nuokrypis  $s = 0,049$ .



Lygybė,  $\left| \frac{VAN}{s} - 0.7979 \right| < \frac{0.4}{\sqrt{n}}$ , tikrinant pagal (3.14) lygybę parametro duomenų pasiskirstymas pagal normalųjį dėsnį, gauname lygybę  $-0,11204 < 0,08$ . Iš lygybės matoma, kad duomenys yra pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį.

**Šapiro ir Vilko suderinamumo kriterijus  $W$**  [19]. Kriterijaus tikslas – didesne tikimybe atmesti neteisingą hipotezę, esant nedideliame duomenų kiekiui (daugiausia 50). Norint naudotis šiuo metodu, visus gautus rezultatus būtina išdėstyti variacine seka pagal (3.3) lygybę.

Šapiro ir Vilko suderinamumo kriterijus apskaičiuojamas:

$$W = \frac{b^2}{S^2}, \quad (3.15)$$

nustačius dydžius:

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}; \quad (3.16)$$

$$b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i); \quad (3.17)$$

čia:  $a_{n-i+1}$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, k$ ) – reikšmė parenkama iš lentelių [19]. Kai  $n$  – lyginis skaičius, tai  $k = \frac{n}{2}$ , kai  $n$  – nelyginis skaičius, tai  $k = \frac{(n-1)}{2}$ .

Hipotezė apie duomenų normalųjį pasiskirstymą neatmetama, jei tenkinama nelygybė:

$$W \geq W_p; \quad (3.18)$$

čia:  $W_p$  – kritinė Šapiro ir Vilko kriterijaus reikšmė [19], nustatyta pagal pasirinktą reikšmingumo lygmenį  $p$ .

Legiruotų konstrukcinių plienų kambario temperatūroje skaičiavimo pavyzdys pagal pasiskirstymo normalųjį dėsnį tikrinimas. Skaičiavimui reikalingi duomenys pateikti 1 priede.

**3.8 lentelė.** Legiruotų konstrukcinių plienų variacinė eilutė nuovargio kreivės parametrai  $m_e$  kambario temperatūroje

| <b>i</b>       | <b><math>m_e</math></b> |
|----------------|-------------------------|
| 1              | 0,07                    |
| 2              | 0,07                    |
| 3              | 0,08                    |
| 4              | 0,08                    |
| 5              | 0,08                    |
| 6              | 0,09                    |
| 7              | 0,09                    |
| 8              | 0,09                    |
| 9              | 0,10                    |
| 10             | 0,11                    |
| 11             | 0,12                    |
| 12             | 0,12                    |
| 13             | 0,12                    |
| 14             | 0,13                    |
| 15             | 0,14                    |
| 16             | 0,14                    |
| 17             | 0,14                    |
| 18             | 0,15                    |
| 19             | 0,15                    |
| 20             | 0,16                    |
| 21             | 0,17                    |
| 22             | 0,17                    |
| 23             | 0,19                    |
| 24             | 0,22                    |
| 25             | 0,27                    |
| $\sum m_p$     | 3,25                    |
| $\sum (m_p)^2$ | 0,48                    |

**3.9 lentelė.** Legiruotų konstrukcinių plienų reikšmių pasiskirstymo pagal normalųjį dėsnį hipotezės tikrinimas, naudojant suderinamumo kriterijų W nuovargio kreivės parametrai  $m_e$  kambario temperatūroje

| <b>i</b> | <b><math>a_{n-i+1}</math></b> | <b><math>(m_e)_{n-i+1}</math></b> | <b><math>(m_e)_i</math></b> | <b>b</b> |
|----------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------|
| 1        | 0,445                         | 0,270                             | 0,070                       | 0,089    |
| 2        | 0,307                         | 0,220                             | 0,070                       | 0,046    |
| 3        | 0,254                         | 0,190                             | 0,080                       | 0,028    |
| 4        | 0,215                         | 0,170                             | 0,080                       | 0,019    |
| 5        | 0,182                         | 0,170                             | 0,080                       | 0,016    |
| 6        | 0,154                         | 0,160                             | 0,090                       | 0,011    |
| 7        | 0,128                         | 0,150                             | 0,090                       | 0,008    |

3.9 lentelės tęsinys

|    |       |       |       |                    |
|----|-------|-------|-------|--------------------|
| 8  | 0,105 | 0,150 | 0,090 | 0,006              |
| 9  | 0,082 | 0,140 | 0,100 | 0,003              |
| 10 | 0,061 | 0,140 | 0,110 | 0,002              |
| 11 | 0,040 | 0,140 | 0,120 | 0,001              |
| 12 | 0,020 | 0,130 | 0,120 | 0,000              |
|    |       |       |       | $\sum (b) = 0,230$ |

Priimant, kad tiriamų medžiagų skaičiui esant 25, kritinė kriterijaus  $W_\alpha$  gauta:

- $W_{0,05} = 0,915$ .

Pasirinktam reikšmingumo lygiui  $p = 0,05$ , nulinė hipotezė, apie duomenų normalųjį pasiskirstymą yra atmetama, t.y.  $0,915 \leq 0,918$ .

Pagal pasirinktą garantijos dydį (šiuo atveju 95%), galima teigti, kad legiruotų konstrukcinių plienų nuovargio kreivės parametro  $m_p$  reikšmių skirstinys nėra normalusis, todėl duomenys nėra pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį.

**Kolmogorovo ir Smirnovo testas** [18]. Testo pagalba, paprasta apdoroti mažų apimčių duomenis, kurio statistika išreiškiama negrupuotais duomenimis.

Kai eksperimentinis skirstinys išreiškiamas empirine skirstinio funkcija, tai, pasirinkus teorinę pasiskirstymo funkcijos išraišką, tikrinamas jos tinkamumas eksperimentiniams duomenų rezultatams aprašyti. Nesutapimą tarp teorinio (normaliojo) ir eksperimentinio skirstinių nusako Kolmogorovo ir Smirnovo kriterijus  $D$  [14]:

$$D = \frac{\max |F_{nj} - F_{npj}|}{n}; \quad (3.19)$$

Čia:  $F_{nj}$  – sukauptas senėjimų dažnumas;

$F_{npj}$  – sukauptas tikėtinas dažnumas.

Duomenų imties ( $3 < n < 100$ ) Kolmogorovo ir Smirnovo kriterijaus ribos nustatomos iš Mikelio pasiūlytų lentelių [10] arba  $\frac{1,22}{\sqrt{n}}$  ( $p = 0,1$ ) ir  $\frac{1,36}{\sqrt{n}}$  ( $p = 0,05$ ) [18].

Kai ( $n > 30$ ), tai tikslios  $D$  kriterijaus ribos nustatomos pagal Lillifurso pasiūlytas priklausomybes:  $\frac{0,805}{\sqrt{n}}$  ( $p = 0,1$ ) ir  $\frac{0,886}{\sqrt{n}}$  ( $p = 0,05$ ) [14].

Jei teisinga nelygybė:

$$D \leq D_p \quad (3.20)$$

tai hipotezė, esant pasirinktam reikšmingumo lygmeniui  $p$ , apie duomenų pasiskirstymą pagal normalųjį dėsnį nepriimama [14].

Naudojant Kolmogorovo ir Smirnov testą apdorojant duomenis, naudojama „SPSS 17.0“ programa, taip pat, taikoma statistika [6], kurios pagalba yra įvertinami empirinio skirstinio funkcijos  $F_n(x)$  bei teorinio skirstinio funkcijos  $F(x)$  skirtumai:

$$Z = \sqrt{n} \max |F_n(x) - F(x)|. \quad (3.21)$$

Deformavimo, nuovargio parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijų reikšmių pasiskirstymui pagal normalųjį dėsnį hipotezėms tikrinti, pateiktos 1 priede, kuriose yra medžiagų statinės mechaninės ir nuovargio charakteristikos kambario bei aukštesnėje temperatūroje. Šiais duomenimis remiantis, buvo užpildytos 3.11 – 3.12 lentelės. Lentelių duomenys užpildyti naudojant tikrinimo rezultatus teigiamais bei neigiamais ženklais, kurie reiškia, kad „+“ – duomenys pasiskirstę pagal normalųjį dėsnį, o „-“ – duomenų skirstinys nėra normalus.

**3.10 lentelė.** Legiruotų konstrukcinių plienų kambario temperatūroje nuovargio parametrų tikrinimas Kolmogorovo – Smirnovu metodu.

|                                     |                        | $m_p$  | $C_p$   | $m_e$  | $C_e$  |
|-------------------------------------|------------------------|--------|---------|--------|--------|
| Duomenų kiekis, $n$                 |                        | 24     | 24      | 25     | 22     |
| Normaliojo skirstinio parametrai    | Vidurkis               | 0,855  | 245,031 | 0,130  | 1,621  |
|                                     | Standartinis nuokrypis | 0,075  | 63,520  | 0,049  | 0,660  |
| Labiausiai išsiskiriančios reikšmės | Absoliuti reikmė       | 0,138  | 0,193   | 0,113  | 0,127  |
|                                     | Teigiama reikšmė       | 0,138  | 0,193   | 0,113  | 0,127  |
|                                     | Neigiama reikšmė       | -0,132 | -0,105  | -0,110 | -0,096 |

3.10 lentelės tęsinys

|                                     |       |       |       |       |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Kolmogorovo – Smirnovo kriterijus,Z | 0,676 | 0,944 | 0,564 | 0,595 |
| Stebėtas reikšmingumo lygmuo,       | 0,751 | 0,335 | 0,908 | 0,871 |

Kolmogorovo – Smirnovo kriterijus apskaičiuojamas pasinaudojus kompiuterine programa SPSS. Gautas reikšmingumo lygmuo –  $(m_p) = 0,751$  yra didesnis nei kritinis reikšmingumo lygis  $p(m_p) = 0,242$ , kai  $\alpha = 0,1$  bei  $p(m_p) = 0,269$ , kai  $\alpha = 0,05$ , todėl hipotezė, kad realusis skirstinys atitinka normalųjį skirstinį yra priimama. Su 95 % garantija galima teigti, kad nuovargio parametrų  $m_p$ ,  $C_p$ ,  $m_e$ ,  $C_e$  duomenys yra pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį.

Medžiagų tikrinimų rezultatai, atlikti pagal visus pateiktus metodus, yra susisteminti ir surašyti 3.11 lentelėje. „+“ bei „-“ ženklų pažymėtos nuovargio charakteristikos pagal atitinkamą metodą teigia, kad apskaičiuota lygybė tenkina arba ne parinktą teorinę reikšmę.

**3.11 lentelė.** Nuovargio parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus duomenų normaliojo skirstinio tikrinimas kambario temperatūroje ir aukštesnėje temperatūrose panaudojus vidutinį absoliutinį nuokrypį (VAN), imties pločio ir dispersijos santykį IP/s, Šapiro ir Vilko W kriterijų bei Kolmogorovo – Smirnovą metodus legiruotiems konstrukciniams plienams būdingame intervale

| Legiruoti konstrukciniai plienai |      |                        | Nuovargio charakteristikos |       |       |       |   |
|----------------------------------|------|------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|---|
|                                  |      |                        | $m_p$                      | $C_p$ | $m_e$ | $C_e$ |   |
| Kambario temperatūroje           | VAN  | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | +                          | +     | +     | +     |   |
|                                  |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | +                          | +     | +     | +     |   |
|                                  | IP/s | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | +                          | +     | +     | +     |   |
|                                  |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | +                          | +     | +     | +     |   |
|                                  | W    | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | +                          | +     | +     | +     |   |
|                                  |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | +                          | +     | -     | +     |   |
|                                  | K-S  | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | +                          | +     | +     | +     |   |
|                                  |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | +                          | +     | +     | +     |   |
|                                  |      | VAN                    | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$     | +     | +     | +     | + |

3.11 lentelės tęsinys

|                           |      |                        |   |   |   |   |
|---------------------------|------|------------------------|---|---|---|---|
| Aukštesnėje temperatūroje |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | + | + | + | + |
|                           | IP/s | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | + | - | + | + |
|                           |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | + | - | + | + |
|                           | W    | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | + | - | + | + |
|                           |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | + | + | + | + |
|                           | K-S  | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | + | + | + | + |
|                           |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | + | + | + | + |

**3.12 lentelė.** Nuovargio parametrų ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus duomenų normaliojo skirstinio tikrinimas kambario temperatūroje ir aukštesnėje temperatūrose panaudojus vidutinį absoliutinį nuokrypį (VAN), imties pločio ir dispersijos santykį IP/s, Šapiro ir Vilko W kriterijų bei Kolmogorovo – Smirnovo metodus legiruotiems konstrukcinių plienų siūlėms (atmetus papildomą medžiagą)

| Legiruotų konstrukcinių plienų siūlės |      |                        | Nuovargio charakteristikos |       |       |       |   |
|---------------------------------------|------|------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|---|
|                                       |      |                        | $m_p$                      | $C_p$ | $m_e$ | $C_e$ |   |
| Kambario temperatūroje                | VAN  | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | +                          | -     | +     | +     |   |
|                                       |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | +                          | -     | +     | +     |   |
|                                       | IP/s | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | +                          | +     | -     | -     |   |
|                                       |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | +                          | -     | -     | +     |   |
|                                       | W    | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | +                          | -     | +     | +     |   |
|                                       |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | +                          | -     | -     | +     |   |
|                                       | K-S  | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | +                          | +     | +     | +     |   |
|                                       |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | +                          | +     | +     | +     |   |
|                                       |      | VAN                    | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$     | +     | +     | +     | + |

3.12 lentelės tęsinys

|                           |      |                        |   |   |   |   |
|---------------------------|------|------------------------|---|---|---|---|
| Aukštesnėje temperatūroje |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | + | + | + | + |
|                           | IP/s | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | + | - | - | - |
|                           |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | + | + | + | - |
|                           | W    | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | + | - | + | + |
|                           |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | + | + | + | + |
|                           | K-S  | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | + | + | + | + |
|                           |      | $m_e, C_e, m_p, C_p$   | + | + | + | + |

### 3.6. Rezultatų koreliacinė – regresinė analizė

Kokybės kintamųjų ryšių tiesinės priklausomybės stiprumas išmatuojamas pagal Pirsono koreliacijos koeficientą  $r$ . Šios koreliacinės analizės tikslas – nustatyti tarpusavio santykio tarp dviejų kintamųjų  $X$  ir  $Y$  dydį ir jo reikšmingumą.

Koreliacinė priklausomybė nusako, kad vieno požymio kitimas įtakoja kito požymio kitimą, tačiau neparodo, kuris kintamasis yra priežastis, o kuris pasekmė. Koreliacinės analizės metu nustatoma regresijos tiesė tarp normaliai pasiskirsčiusių atsitiktinių kintamųjų ir atliekamas gautų rezultatų statistinis įvertinimas [2].

Empirinis koreliacijos koeficientas yra apskaičiuojamas iš atliktų tyrimų duomenų pagal formulę:

$$r = \frac{1}{n-1} \left( \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i \right) / S_x S_y; \quad (3.20)$$

čia:  $X$  ir  $Y$  – atsitiktinių kintamųjų nuokrypiai;

$S_x$  ir  $S_y$  – atsitiktinių kintamųjų nuokrypiai.

Koreliacijos koeficientas gali būti kintantis ribose nuo -1 iki 1. Apskaičiavus koreliacijos koeficientą  $r = 0$ , galima teigti, kad kintamieji – tiesiškai nepriklausomi. Esant  $r > 0$  (teigiamas

koreliacijos ryšys), tai didėjant vienai kintamojo reikšmei, didėja ir kito, o esant  $r < 0$ , vieno atsitiktinio dydžio reikšmei didėjant, kito dydžio reikmė mažėja.

Koreliacijos koeficientas pasižymi šiomis charakteristikomis:

- kai  $r = 1$ , tai visi taškai ( $x_i$  ir  $y_i$ ) yra tiesėje, kurios krypties koeficientas yra teigiamas;
- kai  $r = -1$ , tai visi taškai ( $x_i$  ir  $y_i$ ) yra tiesėje, kurios krypties koeficientas yra neigiamas

[17].

Determinacijos koeficientas – lygus koreliacijos koeficiento kvadratui:

$$R^2 = r^2. \quad (3.21)$$

Pagal naudojimo dažnumą, ši formulė yra naudojama dažniau nei koreliacijos koeficientas. Šio koeficiento naudojimas parodo, kuri vieno kintamojo bendro kitimo dalis gali būti paaiškinta kito parametro kitimu. Esant per daug optimistiniam populiacijos vertinimui, parametras  $R^2$  yra apskaičiuojamas pagal pataisytą apibrėžtumo koeficientą, kuris tiksliau įvertina tiriamus duomenis:

$$R_a^2 = R^2 - \frac{k(1-R^2)}{(n-k-1)}; \quad (3.22)$$

čia:  $n$  – nagrinėjamų duomenų kiekis;

$k$  – nepriklausomų kintamųjų skaičius.

Regresinė analizė – randama apskaičiuavus koreliacijos koeficiento nustatytą tiesinio ryšio egzistavimą. Nustatyta, kad tarp atsitiktinių mažaciklio deformavimo, nuovargio parametrų ir modifikuoto plastiškumo kritejaus – tiesinis koreliacinis ryšys. Deja, bet pagal  $r$  negalima nustatyti kintamųjų statistinės priklausomybės analitinės išraiškos, todėl prognozavimui yra taikomi regresijos modeliai, pagal kuriuos parenkamos kintamuosiuos jungiančios funkcijos. Tiesinė kintamojo priklausomybė  $Y$  nuo kintamojo  $X$  užrašoma analizine lygtimi:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon; \quad (3.23)$$

čia:  $\beta_0$  ir  $\beta_1$  – nežinomi koeficientai (konstantos);

$\varepsilon$  – atsitiktinė paklaida.



**3.13 lentelė.** Kintamųjų legiruotųjų plienų nuovargio charakteristikos  $m_p$  ir modifikuoto plastiškumo kriterijaus kambario temperatūroje koreliacija

|                                    | $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ | $m_p$ |
|------------------------------------|------------------------|-------|
| $(\sigma_u/\sigma_y)Z$ Koreliacija | 1,000                  | 0,483 |
| $m_p$ Koreliacija                  | 0,483                  | 1,000 |

Visos tiriamų grupių medžiagos buvo apskaičiuotos kompiuterine programa, o skaičiavimo rezultatai pateikti 3.14 lentelėje.

**3.14 lentelė.** Pirsono koreliacijos koeficiento  $r$  rezultatai

|                                       |                           | $m_p$  | $C_p$  | $m_e$  | $C_e$ |
|---------------------------------------|---------------------------|--------|--------|--------|-------|
| Legiruoti konstrukciniai plienai      | Kambario temperatūroje    | 0,483  | 0,574  | -0,436 | 0,203 |
|                                       | Aukštesnėje temperatūroje | -0,420 | -0,414 | -0,435 | 0,416 |
| Legiruotų konstrukcinių plienų siūlės | Kambario temperatūroje    | 0,580  | 0,629  | 0,495  | 0,461 |
|                                       | Aukštesnėje temperatūroje | -0,790 | -0,458 | -0,463 | 0,234 |

**Apibrėžtumo (determinacijos) koeficientas** apskaičiuojamas pagal koreliacijos koeficiento kvadratą (esant tiesinei regresijai):

$$R^2 = r^2. \quad (3.24)$$

Šio metodo charakteristika naudojama dažniau nei koreliacijos koeficientas, nes apibrėžtumo koeficientas parodo, kurią kintamojo bendro kitimo dalį galima paaiškinti kito parametro kitimu. Norint įvertinti visus duomenis, parametras  $R^2$  duoda per daug gerą įvertinimą, todėl būtina skaičiuoti pataisytą apibrėžtumo koeficientą, kuris tiksliau įvertina tiriamus duomenis:

$$R_a^2 = R^2 - \frac{k(1-R^2)}{(n-k-1)}; \quad (3.25)$$

čia:  $n$  – nagrinėjamų duomenų kiekis;

$k$  – nepriklausomų kintamųjų kiekis (kadangi turime korelacijos koeficientą, tai ( $k = 1$ )).

Perskaičiuota koeficiento reikšmė  $R_a^2 \cdot 100\%$  žymi sklaidos vidurkį, kurį galima paaiškinti tiesine regresija. Siekiama, kad šio koeficiento reikšmė būtų kuo didesnė, tada duomenys yra mažiau nutolę nuo mažiausių kvadratų metodu gautos regresinės tiesės. Skaičiavimo pavyzdys pateiktas (3.15 lent.)

**3.15 lentelė.** Legiruotųjų konstrukcinių plienų kintamųjų modifikuoto plastiškumo kriterijaus bei nuovargio charakteristikos  $m_p$  kambario temperatūroje tiesinio ryšio stiprumo vertinimas

| Koreliacijos koeficientas, $r$ | Apibrėžtumo koeficientas<br>$R^2$ | Koreguotas apibrėžtumo koeficientas $R_a^2$ | Standartinė regresijos paklaida |
|--------------------------------|-----------------------------------|---|---------------------------------|
| 0,483                          | 0,528                             | 0,506                                       | 0,053                           |

Skaičiuojant regresinės analizės duomenis tiesinės analizės modelis taikomas, jei  $R_a^2 > 0,25$ , jei  $R_a^2$  yra mažesnis už minėtą reikšmę, būtina pritaikyti netiesinį ryšį. Šiuo atveju, gautas apibrėžtumo koeficientas – 48,4 %. Šia reikšme sklaidos vidurkis paaiškinamas tiesine regresija.

**Regresinė analizė** naudojama gavus apskaičiuotą koreliacijos koeficientą su nustatytu tiesinio ryšio buvimu. Tikrinimai pasitvirtino, kad tarp atsitiktinių modifikuoto plastiškumo kriterijaus egzistuoja tiesinis koreliacinis ryšys. Suskaičiavus koreliacijos koeficientą  $r$  negalime numatyti turimų duomenų statistinės priklausomybės analitinės išraiškos. Nustatymui naudojami regresijos modeliai, kurie parenka kintamuosius siejančius funkcijas. Tiesinė kintamojo  $Y$  priklausomybė nuo kintamojo  $X$  apskaičiuojama analizės lygtimi:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon; \quad (3.26)$$

čia:  $\beta_0$  ir  $\beta_1$  – nežinomi koeficientai (konstantos);

$\varepsilon$  – atsitiktinė paklaida (matavimo bei kitos priežastys).

Mažiausių nuokrypių kvadratų metodu apskaičiuojami tiesę geriausiai atitinkantys koeficientų  $\beta_0$  ir  $\beta_1$  taškiniai įverčiai  $a$  ir  $b$ :

$$a = \bar{y} - r \frac{S_y}{S_x} \bar{x}; \quad (3.27)$$

$$b = r \frac{S_y}{S_x}. \quad (3.28)$$

Gaunama regresinės tiesės lygties empirinė išraiška:

$$\hat{y} = a + bx, \quad (3.29)$$

o atsitiktinė paklaida (liekana):

$$\varepsilon = y(x) - \hat{y}(x). \quad (3.30)$$

Po regresinės lygties koeficientų apskaičiavimo, tikrinama hipotezė, kad tarp kintamųjų  $X$  ir  $Y$  nėra jokio tiesinio ryšio –  $a = 0$  arba  $b = 0$ . Hipotezės skaičiavimui naudojama Stjudento  $t$  kriterijus:

$$\left. \begin{array}{l} t = \frac{\alpha}{S_\alpha} \\ t = \frac{\beta}{S_\beta} \end{array} \right\} \sim t(n - 2); \quad (3.31)$$

čia:  $S_\alpha$  ir  $S_\beta$  – koeficientų  $a$  ir  $b$  standartinės paklaidos.

Pagal anksčiau aptartą metodologiją, nustatome regresinės lygties koeficientus ir jų reikšmingumą legiruotiems konstrukciniams plienams kambario temperatūroje nuovargio parametrai  $m_p$  nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus. Ši analizė atliekama pasinaudojus anksčiau minėtomis programomis. Skaičiavimo rezultatai pateikti 3.16 lentelėje.

Tikrinama hipotezė, ar legiruotų konstrukcinių plienų kambario temperatūroje nuovargio parametro  $m_p$  nuo modifikuoto plastiškumo koeficiento regresinės lygties apskaičiuoti koeficientai reikšmingi naudojant parinktą reikšmingumo lygį  $p = 0,1$  ir  $p = 0,05$ :

$H_0$ :  $a$  ir  $b$  nereikšmingi;

$H_a$ :  $a$  ir  $b$  reikšmingi.

Gauti bei įvertinti rezultatai surašyti 3.17 lentelėje.

**3.16 lentelė.** Stjudento krterijaus reikšmingumo vertinimas legiruotų konstrukcinių plienų nuovargio parametrai  $m_p$  nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)$ Z kambario temperatūroje

| Koeficientas | Koeficientų taškiniai įverčiai | Koeficientų standartiniai nuokrypiai | Koreliacijos koeficientas $r$ | Stjudento statistikos reikšmė $t$ | Stebėta vienvusė reikšmė $p$ |
|--------------|--------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| $\beta_0$    | 0,546                          | 0,063                                | 0,483                         | 8,638                             | 0,000                        |
| $\beta_1$    | 0,044                          | 0,009                                |                               | 4,959                             | 0,000                        |

**3.17 lentelė.** Regresijos lygties koeficientų reikšmingumas parametrms  $m_e$ ,  $C_e$ ,  $m_p$ ,  $C_p$  nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)$ Z kambario temperatūroje

|   | $m_p$     |            | $C_p$     |            | $m_e$     |            | $C_e$     |            |
|---|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
|   | $p = 0,1$ | $p = 0,05$ | $p = 0,1$ | $p = 0,05$ | $p = 0,1$ | $p = 0,05$ | $p = 0,1$ | $p = 0,05$ |
| a | +         | +          | -         | -          | +         | +          | -         | -          |
| b | +         | +          | +         | +          | +         | +          | +         | +          |

Iš atliktų skaičiavimų bei stebėjimų statistinės reikšmingumo vienpusio lygmens kritinės reikšmės  $p$ , gauta reikšmė yra mažesnė ( $m_p$  dalyje). Nulinė hipotezė – atmetama su 90% ir 95 % garantija. Matome, kad legiruotų plienų (kambario temperatūroje) nuovargio parametras  $m_p$  nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus, regresinės lygties koeficientai yra reikšmingi.

**Prognozavimo paklaidų įvertinimas.** 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 (nuokrypių kvadratų vidurkis) apie regresijos tiesę:

$$s_{y/x}^2 = s_y^2(1 - r^2) \frac{n-1}{n-2}. \quad (3.32)$$

Sklandos dydis apie regresijos tiesę nusakomas standartine regresijos paklaida:

$$\delta_y = \sqrt{s_{y/x}^2}. \quad (3.33)$$

Apskaičiuojama regresinės tiesės (3.28) lygties koeficientų dispersija:

$$s_{Y/x}^2 = s_{y/x}^2 \left[ \frac{1}{n} + \frac{(x_{pi} - \bar{x})^2}{(n-1)s_x^2} \right], \quad (3.34)$$

bei standartinis nuokrypis (standartinė paklaida):

$$s_{Y/x} = \sqrt{s_{y/x}^2}; \quad (3.35)$$

čia:  $x_{pi}$  – taškas, kuriame prognozuojame reikšmės pasikliautinąjį intervalą.

Tuomet, nustatomas regresijos lygties prognozuojamos reikšmės  $(1 - p)$  pasikliautinis intervalas:

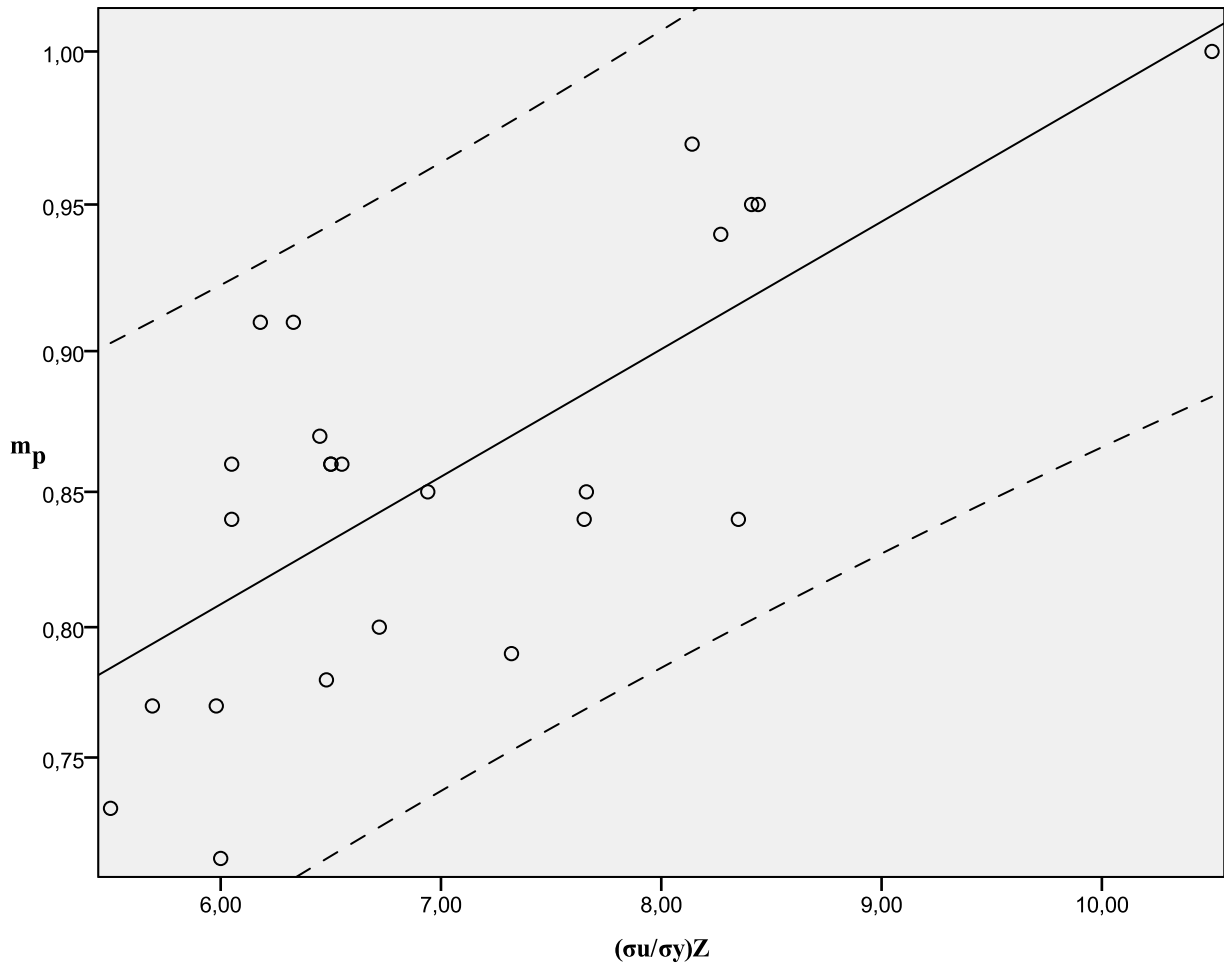
$$\hat{y} - S_{Y/x} \cdot t_{p,k} < \hat{y}_{pi} < \hat{y} + S_{Y/x} \cdot t_{p,k}; \quad (3.36)$$

čia:  $t_{p,k}$  – Stjudento kriterijaus reikšmė, nustatoma pagal pasirinktą reikšmingumo lygmenį  $p = 0,05$  ir laisvės laipsnių skaičių  $k = n - 2$  [19].

Legiruotų konstrukcinių plienų kambario temperatūroje tiesinės regresijos  $m_p = 0,546 + 0,044(\sigma_u/\sigma_y)Z$  prognozuojamų reikšmių tikėtinumo juosta su 95% tikėtinumo tikimybe nustatymo skaičiavimai pateikti 3.18 lentelėje.

**3.18 lentelė.** 95% prognozuojamų reikšmių tikėtinumo juostos ribų nustatymas tiesinei regresijai  $= 0,546 + 0,044x$ , kai  $t_{p,k} = 8,638$ ,  $p = 0,05$ .

| $x = \frac{\sigma_u}{\sigma_y} Z$ | $y = a + bx$ | $(x - \bar{x})^2$ | $\frac{(x - \bar{x})^2}{(n-1)s_x^2}$ | $S_{Y/x}$ | $s_{Y/x} \cdot t_{p,k}$ | $y - S_{Y/x} \cdot t_{p,k}$ | $y + s_{Y/x} \cdot t_{p,k}$ |
|-----------------------------------|--------------|-------------------|--------------------------------------|-----------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 8,00                              | 0,898        | 49,620            | 2,406                                | 0,059     | 0,506                   | 0,392                       | 1,404                       |
| 8,50                              | 0,920        | 56,914            | 2,759                                | 0,063     | 0,540                   | 0,380                       | 1,460                       |
| 9,00                              | 0,942        | 64,709            | 3,137                                | 0,067     | 0,575                   | 0,367                       | 1,517                       |
| 9,50                              | 0,964        | 73,003            | 3,540                                | 0,071     | 0,609                   | 0,355                       | 1,573                       |
| 10,00                             | 0,986        | 81,797            | 3,966                                | 0,075     | 0,644                   | 0,342                       | 1,630                       |
| 10,50                             | 1,008        | 91,091            | 4,417                                | 0,079     | 0,679                   | 0,329                       | 1,687                       |
| 11,00                             | 1,030        | 100,885           | 4,891                                | 0,083     | 0,714                   | 0,316                       | 1,744                       |



**3.5 pav.** Prognozuojamų reikšmių pasikliautinimo juosta, kai  $y = 0,546 + 0,044x$  nuovargio parametro  $m_p$  priklausomybei nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  legiruotiems konstrukciniams plienams būdingame intervale kambario temperatūroje

**Regresijos modelio adekvatumo tikrinimas.** Pirsono koreliacijos skaičiavimo metu, gautos koeficientų reikšmės  $|r|$  apibūdina kintamųjų X ir Y koreliacinio ryšio stiprumą ar silpumą, todėl norint sužinoti ar apskaičiuota koreliacija – statistiškai reikšminga, būtina atlikti adekvatumo tikrinimą:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}, t \sim St(n-2). \quad (3.37)$$

Stjudento statistikai  $t$  su  $(n - 2)$  laisvės laipsniu randamos dvi kritinės reikšmės  $t_{p/2, n-2}$  ir  $t_{1-p/2, n-2}$ . Jei apskaičiuota statistikos reikšmė  $t$  priklauso  $t_{H_0} = (t_{p, n-2}, t_{1-p/2, n-2})$  intervalui, tai nulinė hipotezė ( $r = 0$ ) atmetama ir priimama alternatyvi hipotezė – koreliacija reikšminga ( $r \neq 0$ ) su pasirinktu reikšmingumo lygmeniu  $p$  [14].

Nulinė hipotezė (tiesinis ryšys nėra reikšmingas) gali būti atmeta ir naudojant Fišerio kriterijų [8]:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \cdot 1/n-2}, \sim F(1, n - 2); \quad (3.38)$$

čia:  $\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$  – regresinė nuokrypių kvadratų suma;  
 $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$  – paklaidų nuokrypių kvadratų suma.

Kadangi skaičiavimai atliekami su kompiuterine statistine programa, tai  $H_0$  atmetimas sprendžiamas pagal stebimą reikšmingumo lygmenį  $p$  – reikšmę.

Legiruotų konstrukcinių plienų nuovargio parametro  $m_p$ ,  $C_p$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus regresijos tiesiškumo tikrinimas pagal 3.38 lygtį. Apskaičiuoti duomenys pateikti 3.19 lentelėje.

**3.19 lentelė.** Legiruotų konstrukcinių plienų nuovargio parametrų  $m_p$ ,  $C_p$  priklausomybės nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus regresijos tiesiškumo tikrinimas

|       |           | Nuokrypių kvadratų suma | Nuokrypių kvadratų vidurkis | Fišerio statistikos reikšmė $F$ | $p$ – reikšmė |
|-------|-----------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------|
| $m_p$ | Regresija | 0,069                   | 0,069                       | 24,587                          | 0,000         |
|       | Liekana   | 0,062                   | 0,003                       |                                 |               |
|       | Bendra    | 0,131                   |                             |                                 |               |
| $C_p$ | Regresija | 45385,567               | 45385,567                   | 21,058                          | 0,000         |
|       | Liekana   | 47414,952               | 2155,25                     |                                 |               |
|       | Bendra    | 92800,519               |                             |                                 |               |

Iš suskaičiuotų duomenų matome, kad parametams  $m_p$ ,  $C_p$  Fišerio kriterijus atitinkamai lygus  $F = 24,587$  ir  $F = 21,058$  bei reikšmingumo lygmuo abiemis parametrams  $p$  yra didesnis už 0,1. Šis parametras yra didesnis už pasirinktus reikšmingumo lygiu  $p = 0,1$  bei  $p = 0,05$ , tai galime teigti,

kad hipotezė  $H_0$  atmetama su 90% bei 95% garantija. Legiruotų konstrukcinių plienų nuovargio parametrų  $m_p$ ,  $C_p$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus koreliacijos koeficientas nelygus 0 ir yra reikšmingas tiesinis ryšys.

Visų regresijos tiesiškumo adekvatumo tikrinimo skaičiavimo rezultatai pateikti 3.20 lentelėje. Rezultatai įvertinti pasirinkus  $p = 0,1$  reikšmingumo lygmenį su 90% tikimybe. Tiesinė regresija žymima „+“ ženklu, o nereikšmingas ryšys tarp nuovargio charakteristikų nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus žymimas „-“ ženklu.

**3.20 lentelė.** Tiesinio ryšio adekvatumo tyrimas (Fišerio kriterijus) nuovargio parametrams

|                           | Legiruoti konstrukciniai plienai |                 | Legiruotų konstrukcinių plienų siūlės |                 |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------|---------------------------------------|-----------------|
|                           | $F$                              | Su tikimybe $p$ | $F$                                   | Su tikimybe $p$ |
| Kambario temperatūroje    |                                  |                 |                                       |                 |
| $m_p$                     | 24,587                           | +               | 32,826                                | +               |
| $C_p$                     | 21,058                           | +               | 35,032                                | +               |
| $m_e$                     | 20,795                           | +               | 15,676                                | +               |
| $C_e$                     | 1,399                            | -               | 18,126                                | +               |
| Aukštesnėje temperatūroje |                                  |                 |                                       |                 |
| $m_p$                     | 15,101                           | +               | 30,057                                | +               |
| $C_p$                     | 14,668                           | +               | 16,228                                | +               |
| $m_e$                     | 14,809                           | +               | 12,680                                | +               |
| $C_e$                     | 13,896                           | +               | 4,362                                 | +               |

Skaičiavimai parodė, kad daugumos medžiagų grupių nuovargio parametrai konstatuoja tiesiškumą su modifikuoto plastiškumo kriterijais. Atlikus koreliacinę – regresinę analizę galima teigti, kad daugumos atsitiktinių, pasiskirsčiusių pagal normalųjį dėsnį kintamųjų egzistuoja reikšmingas tiesinis koreliacinis ryšys.

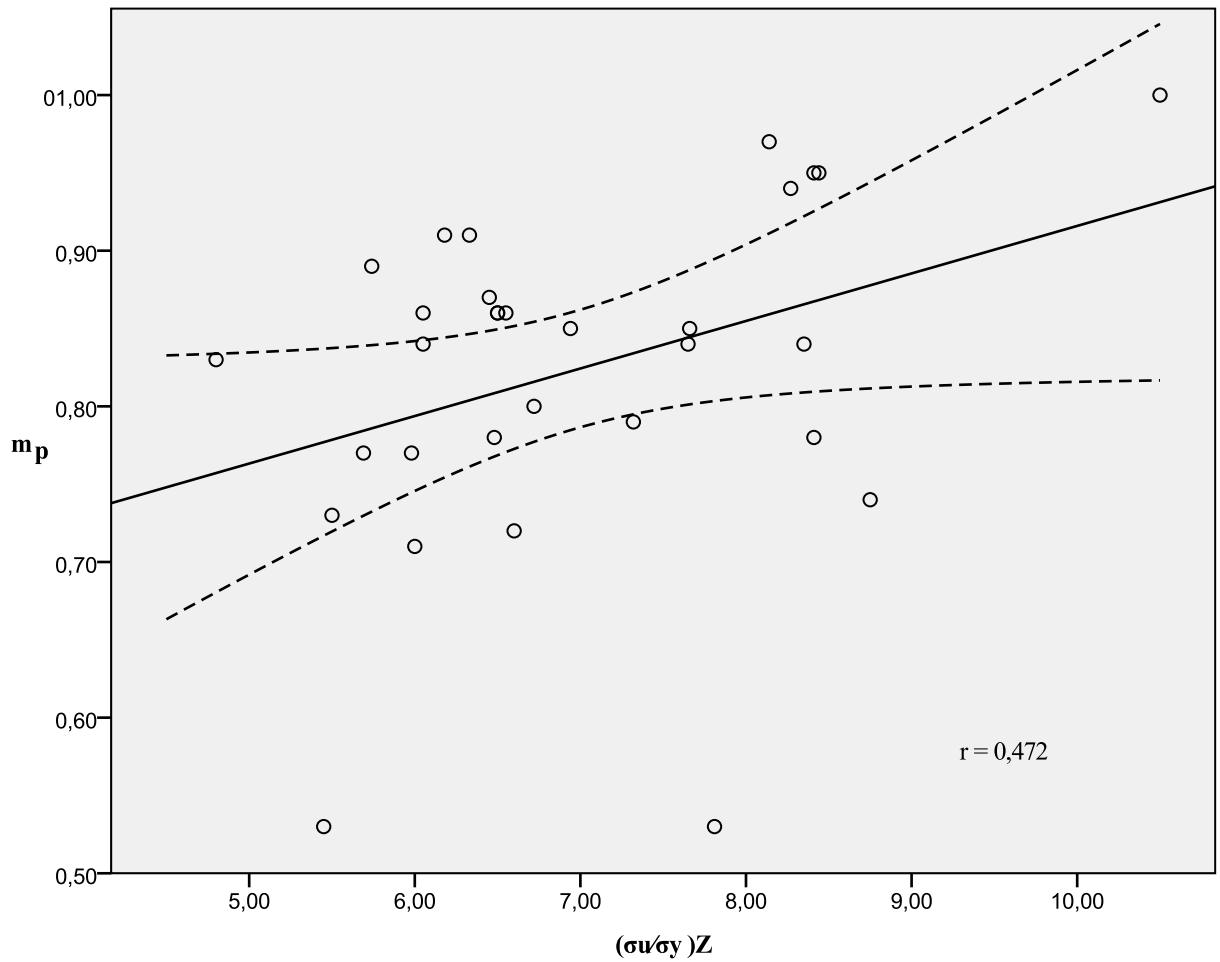


**3.21 lentelė.** Legiruotų konstrukcinių bei plienų siūlių suvirinimo medžiagų nuovargio parametrų  $m_p$ ,  $C_p$ ,  $m_e$ ,  $C_e$  tiesinės priklausomybės koeficientai nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus kambario bei aukštesnėje temperatūrose

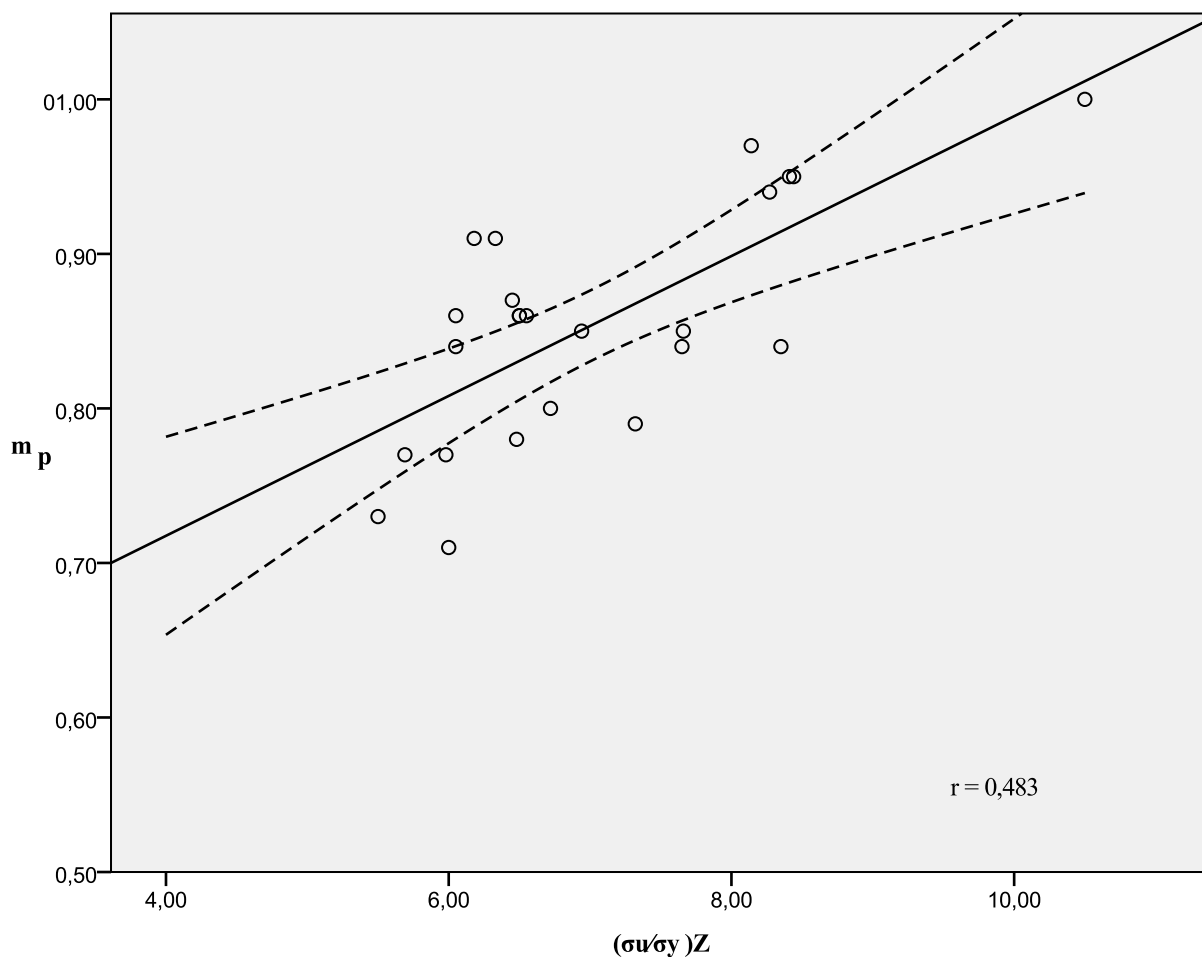
| Kambario temperatūra                           | Aukštesnė temperatūra                          |
|--|--|
| Legiruoti konstrukciniai plienai               |  |
| $m_p = 0,546 + 0,044 (\sigma_u/\sigma_y)Z$     | $m_p = 1,145 - 0,063 (\sigma_u/\sigma_y)Z$     |
| $c_p = 7,147 + 36,506 (\sigma_u/\sigma_y)Z$    | $c_p = 670,002 - 77,365 (\sigma_u/\sigma_y)Z$  |
| $m_e = 0,304 - 0,026 (\sigma_u/\sigma_y)Z$     | $m_e = 0,402 - 0,045 (\sigma_u/\sigma_y)Z$     |
| $c_e = 0,730 + 0,134 (\sigma_u/\sigma_y)Z$     | $c_e = 1,114 - 0,418 (\sigma_u/\sigma_y)Z$     |
| Legiruotų konstrukcinių plienų siūlės          |  |
| $m_p = 0,178 + 0,098 (\sigma_u/\sigma_y)Z$     | $m_p = 1,646 - 0,153 (\sigma_u/\sigma_y)Z$     |
| $c_p = 512,845 - 127,844 (\sigma_u/\sigma_y)Z$ | $c_p = 763,356 - 107,019 (\sigma_u/\sigma_y)Z$ |
| $m_e = 0,015 + 0,021 (\sigma_u/\sigma_y)Z$     | $m_e = 0,378 - 0,034 (\sigma_u/\sigma_y)Z$     |
| $c_e = 0,502 - 0,295 (\sigma_u/\sigma_y)Z$     | $c_e = 5,704 - 0,652 (\sigma_u/\sigma_y)Z$     |

### 3.7. Medžiagų grupavimo įtaka nuovargio charakteristikų nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus nustatymui

Nuovargio parametrų  $m_p$ ,  $m_p$  legiruotiems konstrukciniams plienams kambario temperatūroje priklausomybės nuo plastiškumo kriterijaus pavaizduotos 3.6, 3.7 paveiksluose. Iš pateiktų paveikslų matyti, kad tiriant medžiagas būdingame intervale, gautas koreliacijos koeficientas yra žymiai geresnis lyginant su bendros grupės medžiagomis.



**3.6 pav.** Nuovargio parametro  $m_p$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  legiruotų konstrukcinių plienų bendrai grupei kambario temperatūroje ir 95% prognozuojamų reikšmių pasikliautinoji juosta (brūkšininė linija)



**3.7 pav.** Nuovargio parametro  $m_p$  priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus  $(\sigma_u/\sigma_y)Z$  legiruotiems konstrukciniams plienams būdingame intervale kambario temperatūroje ir 95% prognozuojamų reikšmių pasikliautinoji juosta (brūkšninė linija)

Visų dydžių tiesinės priklausomybės stiprumą nusako Pirsono koreliacijos koeficientas. Duomenys pateikti 3.22 lentelėje, kurie byloja, jog legiruotų konstrukcinių plienų bei plienų siūlių nuovargio parametrų  $m_e$ ,  $C_e$ ,  $m_p$ ,  $C_p$  tiesinė priklausomybė nuo modifikuoto plastiškumo kriterijaus būdingame intervale yra geresnė, lyginant su bendromis grupėmis kambario ir aukštesnėje temperatūrose. Visų grupių medžiagų reikšmingumo parametrai pagal nuovargio parametrus  $m_e$ ,  $C_e$ ,  $m_p$ ,  $C_p$  buvo patikrinti Fišerio kriterijumi.

**3.22 lentelė.** Tiriamų medžiagų bendros grupės bei medžiagų būdingame intervale koreliacijos koeficientų palyginimai

|       |                     | Legiruoti konstrukciniai plienai |                           | Legiruotų konstrukcinių plienų suvirinimo siūlių medžiagos |                           |
|-------|---------------------|----------------------------------|---------------------------|--|---------------------------|
|       |                     | Kambario temperatūroje           | Aukštesnėje temperatūroje | Kambario temperatūroje                                     | Aukštesnėje temperatūroje |
| $m_p$ | Bendros grupės      | -0,472                           | -0,455                    | 0,535  | -0,686                    |
|       | Būdingame intervale | 0,483                            | -0,420                    | 0,580  | -0,790                    |
| $C_p$ | Bendros grupės      | -0,378                           | -0,398                    | 0,550  | -0,403                    |
|       | Būdingame intervale | 0,574                            | -0,414                    | 0,629  | -0,458                    |
| $m_e$ | Bendros grupės      | -0,336                           | 0,356                     | 0,420  | -0,552                    |
|       | Būdingame intervale | -0,436                           | -0,435                    | 0,495  | -0,463                    |
| $C_e$ | Bendros grupės      | -0,452                           | 0,373                     | 0,445  | -0,554                    |
|       | Būdingame intervale | 0,203                            | 0,416                     | 0,461  | 0,234                     |

## IŠVADOS IR PASIŪLYMAI

1. Nustatytas legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų suirimo charakteristikų  $m_p$ ,  $C_p$ ,  $m_e$ ,  $C_e$  būdingas intervalas, kambario ir aukštesnėje temperatūroje, kuris priklauso nuo mechaninių charakteristikų. Gautos intervalo ribos: legiruotiems plienams (20 °C) - 0,83 – 1,05; legiruotiems plienams (200 °C – 550 °C) - 0,70 – 1,25; plienų siūlių suvirinimo medžiagoms (20 °C) - 0,88 – 1,10; plienų siūlių suvirinimo medžiagoms (200 °C – 550 °C) - 0,70 – 1,25.
2. Legiruotųjų plienų ir jų suvirinimo siūlių medžiagų suirimo charakteristikų kambario ir aukštesnėje temperatūroje, nustatytame būdingame intervale, duomenys yra stochastiškai nepriklausomi, atsitiktiniai bei pasiskirstę pagal normalųjį skirstinį.
3. Atlikus nuovargio kreivių parametrų  $m_p$ ,  $C_p$ ,  $m_e$ ,  $C_e$  tarpusavio ryšio dėsningumus nustatyta, kad patikslinus tyrimų grupių medžiagų sklaidos intervalus gaunami tikslesni statistinių tyrimo metodų rezultatai. Analizė parodė, kad gaunami koreliacijos koeficientai yra vidutiniškai 7 % didesni nustatytame būdingame intervale, nei bendrų plienų grupėse.
4. Pasiūlytos būdingo intervalo analitinės priklausomybės rekomenduojamos preliminariam ilgalaikiškumui apskaičiuoti.

## LITERATŪRA

1. COFFIN, L. F. Study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile material. *Trans. Asme*, 1954, vol. A76, no. 53, p. 931-950.
2. ČEKANA VIČIUS, V.; MURAU SKAS, G. *Statistika ir jos taikymai*. Vilnius, 2000. 240 p.
3. DAUBENSPECK, B., R. Extrapolation techniques for very low cycle fatigue behavior of a Ni-base superalloy. Orlando, 2010.
4. DAUNYS, M; STULPINAITĖ, A. Statistical evaluation of low cycle durability for alloyed structural steels weld metals at room and elevated temperature. *Mechanika*. 2008. Nr. 1 (69). ISSN 1392 – 1207.
5. DAUNYS, M; STULPINAITĖ, A; ŠNIUOLIS, R. Statistical evaluation of low cycle stress – strain curves parameters for alloyed structural steels weld metals at room and elevated temperature. *Mechanika*. 2010. Nr. 5 (85). ISSN 1392 – 1207.
6. JANILIONIS, V. *Statistika ir duomenų analizės programinė įranga. Distancinio mokymo kursas*. Kaunas: KTU, 1999 – 2001. Prieiga per internetą: <http://fmf.ktu.lt/janil/stat1.htm>
7. JUNAK, G; CIELSA, M. Low – cycle fatigue of P91 and P92 steels used in the power engineering industry. *International Scientific Journal*. 2011. Vol. 48, Issue 1, p. 19 – 24.
8. JUNAK, G; OKRAJNI, J. Low cycle fatigue of steels at high temperature under gradual loading. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2008. Vol. 26, Issue 2, p. 147 – 150.
9. KAMINSKIENĖ, B. *Matematinės statistikos elementai. Mokymo priemonė II d.* Vilnius, 1976. 124 p.
10. MILLER, L.H. Table of percentage points of Kolmogorov statistics. *J. Amer. Statist. Assoc.* 51, 1956, p. 113 – 115, table 1.
11. OKRAJNI, J; JUNAK, G. Low cycle fatigue of steels at high temperature under gradual loading.
12. SABALIAUSKAS, Artūras; MINGAILIENĖ, Aušra; ČIKOTIENĖ, Dalia. Magistro baigiamojo darbo rengimo metodiniai nurodymai. *Mokomoji knyga*. Šiauliai, 2010. 33 p.
13. SHI, X. Q; PANG, H. L. J; ZHOU, W; WANG, Z.P. *A modified energy – based low cycle fatigue model for eutectic solder alloy*. *Scripta Materialia*. JAV. 1999. Vol. 41, No. 3, p. 289 – 296.
14. STULPINAITĖ, A. Statinių mechanizmų ir mažaciklio nuovargio charakteristikų tarpusavio ryšio tyrimas. *Daktaro disertacija*. Kaunas, 2009.

15. STULPINAITĖ, A; ŠNIUOLIS, R. Statistical evaluation of the parameters of low cycle fatigue curve alloyed steels. *Jaunųjų mokslininkų darbai*. Nr. 3 (28). Šiauliai, 2010. ISSN 1648-8776.
16. ŠNIUOLIS, R. Konstrukcinių medžiagų mažaciklio nuovargio charakteristikų priklausomybė nuo mechaninių savybių. *Daktaro disertacija*. Kaunas, 1999.
17. VIRVILAITĖ, R; JEFIMOV, V. *Konkurencinio pranašumo įgijimas vidaus ir globalioje rinkoje*. Elektroninė knyga. Prieiga per internetą: [http://distance.ktu.lt/kursai/verslumas/rinkos\\_aplinkos\\_tyrimai\\_I/121691.html](http://distance.ktu.lt/kursai/verslumas/rinkos_aplinkos_tyrimai_I/121691.html)
18. ЗАКС, Л. Статистическое оценивание. Пер. с нем. / Под. Ред. Ю. П. Адлера, В. Г. Горского. – Москва: Статистика, 1976. 598 с.
19. СТЕПНОВ, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: *Справочник*. – Москва: Машиностроение, 1985. 232 с.

## **PRIEDAI**



## 1 priedas

Legiruotų konstrukcinių plienų terminis apdirbimas, statinės mechninės ir nuovargio charakteristikos kambario temperatūroje

| Eil. Nr. | Legiruoti konstrukciniai plienai | Terminis apdirbimas | Mechaninės charakteristikos |                  |      | Nuovargio charakteristikos |           |       |           |
|----------|----------------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------|------|----------------------------|-----------|-------|-----------|
|          |                                  |                     | $\sigma_u$ , MPa            | $\sigma_y$ , MPa | Z    | $m_p$                      | $C_p$ , % | $m_e$ | $C_e$ , % |
| 1        | 48TS                             | G – Atl             | 841                         | 616              | 70,6 | 0,78                       | 181,4     | 0,07  | 1,07      |
| 2        | 20S                              | N                   | 375                         | 313              | 70,9 | 0,53                       | 43,5      | 0,22  | 1,91      |
| 3        | 19MN5 (K)                        | -                   | 463                         | 313              | 65,8 | 0,83                       | 207,3     | 0,27  | 7,98      |
| 4        | 15Cr2MF                          | G – Atl             | 410                         | 268              | 68,6 | 0,89                       | 215,6     | 0,33  | 15,1      |
| 5        | VK – 2M (E)                      | G – Atl             | 436                         | 293              | 68,5 | 0,74                       | 216,2     | 0,15  | 2,26      |
| 6        | VK – 2M (GO)                     | G – 2Atl            | 471                         | 310              | 69,2 | 0,72                       | 219       | 0,15  | 1,84      |
| 7        | 15Cr3NiMoFAA                     | G – 3Atl            | 469,2                       | 271,6            | 60,5 | 0,73                       | 189,9     | 0,15  | 1,66      |
| 8        | 09G2S                            | –                   | 505                         | 345              | 69,6 | 0                          | 0         | 0     | 0         |
| 9        | 16G2AF                           | –                   | 655                         | 437              | 65,2 | 0                          | 0         | 0     | 0         |
| 10       | 10CrSNiD                         | –                   | 586                         | 411              | 58,6 | 0                          | 0         | 0     | 0         |
| 11       | 15Cr2MoV                         | G – Atl             | 841                         | 617              | 70   | 0,95                       | 375,4     | 0,09  | 1,01      |
| 12       | 12Cr3Ni1MoFS                     | –                   | 844                         | 584              | 59,2 | 0,95                       | 367,6     | 0,09  | 0,99      |
| 13       | 12Cr3Ni1MoVE                     | N – G – Atl         | 814                         | 587              | 63   | 0,97                       | 316,2     | 0,07  | 0,89      |
| 14       | 12CrNi1MoVP                      | G – Atl             | 827                         | 542              | 60   | 0,94                       | 352,3     | 0,08  | 0,82      |
| 15       | 15CrMoFA                         | –                   | 598                         | 503              | 71,5 | 0,77                       | 170,15    | 0,1   | 0,99      |
| 16       | 15Cr2MoVAA (TSK)                 | G – 2Atl            | 650                         | 510              | 72   | 0,86                       | 188,9     | 0,12  | 0,79      |
| 17       | VK – 2M (G)                      | G – 2Atl            | 835                         | 570              | 60   | 0,84                       | 72,6      | 0,22  | 1,92      |
| 18       | 15Cr2NiMoVAA (PT)                | G – Atl             | 765                         | 570              | 65   | 0,84                       | 339,6     | 0,11  | 1,24      |
| 19       | 15Cr1Mo1FL                       | Atl                 | 605                         | 457              | 75,5 | 0,86                       | 380,5     | 0,06  | 0,86      |
| 20       | ČSN                              | –                   | 732                         | 610              | 73   | 0,79                       | 231,6     | 0,14  | 2,08      |
| 21       | 415320.9 (ČSN)                   | –                   | 766                         | 656              | 72,7 | 0,85                       | 232       | 0,17  | 3,1       |
| 22       | 15Cr1Mo                          | –                   | 618                         | 407              | 62   | 0,91                       | 195,1     | 0,14  | 1,24      |
| 23       | 15Cr2MoFAA                       | G – 3Atl            | 605                         | 535              | 75,5 | 0,84                       | 243,8     | 0,12  | 1,58      |
| 24       | 15Cr2MoFA                        | N – G - Atl         | 655                         | 540              | 70   | 0,86                       | 221,2     | 0,19  | 2,34      |
| 25       | 15Cr2MoFA                        | G – 2Atl            | 645                         | 496              | 75,5 | 0,87                       | 243,8     | 0,14  | 1,58      |

**1 priedo tęsinys**

|                                   |            |                       |      |     |      |       |        |      |      |
|-----------------------------------|------------|-----------------------|------|-----|------|-------|--------|------|------|
| 26                                | 15Cr2Mo    | –                     | 648  | 529 | 72   | 0,78  | 229,0  | 0,16 | 2,2  |
| 27                                | 12Cr2NiMo  | Atkh – N –<br>G – Atl | 1050 | 730 | 63   | 1,00  | 196,92 | 0,21 | 2,46 |
| 28                                | 15Cr2NiMo  | –                     | 633  | 529 | 78   | 0,91  | 254    | 0,17 | 2,30 |
| 29                                | 15Cr2NiMo  | –                     | 672  | 562 | 75   | 0,80  | 241,8  | 0,12 | 1,52 |
| 30                                | 15Cr2NiMo  | G – Atl               | 650  | 542 | 78   | 0,86  | 254,2  | 0,13 | 1,78 |
| 31                                | 10CrNi1Mi  | G – Atl               | 569  | 472 | 77   | 0,77  | 263,9  | 0,06 | 0,78 |
| 32                                | VK – 4     | N                     | 694  | 499 | 64   | 0,85  | 204,4  | 0,08 | 1,1  |
| 33                                | VK-2M      | –                     | 781  | 513 | 68,4 | 0,53  | 11,7   | 0,09 | 0,93 |
| 34                                | 10GNi2MoFE | –                     | 600  | 463 | 78,5 | 0,71  | 124    | 0,08 | 0,76 |
| Apskaičiuotos vidutinės reikšmės: |            |                       |      |     |      | 0,785 | 205,94 | 0,13 | 2,26 |

## 2 priedas

Legiruotų konstrukcinių plienų terminis apdirbimas, statinės mechninės ir nuovargio charakteristikos aukštesnėje temperatūroje

| Eil. Nr. | Legiruoti konstrukciniai plienai | Terminis apdirbimas | Mechaninės charakteristikos |                  |      | Nuovargio charakteristikos |           |       |           |
|----------|----------------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------|------|----------------------------|-----------|-------|-----------|
|          |                                  |                     | $\sigma_u$ , MPa            | $\sigma_y$ , MPa | Z    | $m_p$                      | $C_p$ , % | $m_e$ | $C_e$ , % |
| 1        | L (25L)                          | N                   | 545                         | 180              | 40,1 | 0,47                       | 8,1       | 0,05  | 0,59      |
| 2        | 19MoNi5 (K)                      | –                   | 480                         | 227              | 64,4 | 0,79                       | 107,8     | 0,17  | 1,36      |
| 3        | 4114166 (ČSN)                    | N – Atk             | 418                         | 190              | 44,7 | 0,75                       | 140,8     | 0,25  | 4,58      |
| 4        | 15Cr2MoF                         | G – Atl             | 574                         | 387              | 72,2 | 0,83                       | 187,5     | 0,15  | 1,41      |
| 5        | VK-2M                            | G – Atl             | 672                         | 447              | 66,7 | 0,63                       | 58,3      | 0,08  | 0,93      |
| 6        | VK-2M(E)                         | G – Atl             | 875                         | 501              | 63,2 | 0,85                       | 142,6     | 0,2   | 2,76      |
| 7        | VK-2M(O)                         | G – 3Atl            | 619                         | 367              | 59   | 0,7                        | 75,4      | 0,35  | 4,82      |
| 8        | VK-2M(GO)                        | G – 2Atl            | 660                         | 390              | 67   | 0,73                       | 160       | 0,3   | 4,52      |
| 9        | 15Cr2NiMoF2A                     | G – Atl             | 580                         | 440              | 69,2 | 0,82                       | 228,9     | 0,15  | 1,63      |
| 10       | 15Cr3NiMoFA                      | G – 3Atl            | 550                         | 275              | 58   | 0,77                       | 182,1     | 0,07  | 0,58      |
| 11       | 15Cr2MoFAAVU                     | G – 3Atl            | 530                         | 480              | 75,5 | 0,92                       | 456,9     | 0,18  | 1,49      |
| 12       | 415320 (ČSN) (1)                 | –                   | 670                         | 509              | 70,4 | 0,86                       | 223,4     | 0,11  | 1,64      |
| 13       | 415320 (ČSN) (1)                 | –                   | 684                         | 524              | 68,8 | 0,88                       | 217       | 0,14  | 2,32      |
| 14       | 25Cr1Mo1Fa                       | –                   | 530                         | 450              | 72   | 0,79                       | 230,2     | 0,15  | 0,8       |
| 15       | 25Cr1MoV (2)                     | –                   | 460                         | 410              | 85   | 0,82                       | 293       | 0,09  | 0,34      |
| 16       | 25Cr1MoV (3)                     | 2N – Atl            | 466                         | 360              | 68   | 0,89                       | 214       | 0,19  | 2,02      |
| 17       | 25 Cr1MoV                        | –                   | 420                         | 355              | 79   | 0,81                       | 259,6     | 0,22  | 1,66      |
| 18       | 12Cr2NiMoFA                      | –                   | 506                         | 457              | 71,5 | 0                          | 0         | 0     | 0         |
| 19       | 15Cr2NiMoV                       | –                   | 572                         | 487              | 73,5 | 0,81                       | 235,2     | 0,16  | 1,96      |
| 20       | 20Cr2Hi4MoV                      | G – Atl             | 825                         | 543              | 61,5 | 0,60                       | 40,3      | 0,18  | 1,84      |
| 21       | 15Cr2NiMoFA                      | –                   | 590                         | 520              | 69   | 0,54                       | 61,4      | 0,08  | 1,68      |
| 22       | 15Cr2NiMoFAA                     | Atl                 | 580                         | 530              | 69,2 | 0,8                        | 218,6     | 0,2   | 2,06      |
| 23       | 15Cr2NiMoFAA                     | –                   | 676                         | 578              | 70   | 0                          | 0         | 0     | 0         |
| 24       | 15Cr3NiMoFAA                     | G – 3Atl            | 550                         | 420              | 58   | 0,71                       | 181,4     | 0,4   | 2,18      |
| 25       | VK-2 (N)                         | 2Atkh – 2N<br>– Atl | 637                         | 459              | 68,9 | 0,83                       | 196,4     | 0,20  | 1,96      |

**2 priedo tęsinys**

|                                   |               |                       |     |     |      |      |        |      |      |
|-----------------------------------|---------------|-----------------------|-----|-----|------|------|--------|------|------|
| 26                                | VK-2 (D)      | Atkh – N –<br>G – Atl | 600 | 397 | 59,4 | 0,81 | 179,0  | 0,15 | 1,42 |
| 27                                | 10CrNi2MoV Ge | –                     | 550 | 403 | 74,5 | 0,95 | 315,3  | 0,05 | 0,64 |
| 28                                | VK-2Š         | Atkh – N –<br>G – Atl | 697 | 348 | 54,8 | 0,78 | 130,8  | 0,25 | 4,41 |
| 29                                | 10CrNi1Mo (A) | G – Atl               | 595 | 335 | 54,3 | 0,72 | 202,1  | 0,09 | 0,93 |
| Apskaičiuotos vidutinės reikšmės: |               |                       |     |     |      | 0,72 | 170,56 | 0,16 | 1,81 |

### 3 priedas

Legiruotų konstrukcinių plienų siūlių terminis apdirbimas, statinės mechninės ir nuovargio charakteristikos kambario temperatūroje

| Eil. Nr. | Legiruotų plienų siūlės | Terminis apdirbimas | Mechaninės charakteristikos |                  |       | Nuovargio charakteristikos |           |       |           |
|----------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------|-------|----------------------------|-----------|-------|-----------|
|          |                         |                     | $\sigma_u$ , MPa            | $\sigma_y$ , MPa | Z     | $m_p$                      | $C_p$ , % | $m_e$ | $C_e$ , % |
| 1        | 22Š                     | –                   | 537                         | 421              | 71,35 | 0                          | 0         | 0     | 0         |
| 2        | TSA                     | Atk                 | 574                         | 383              | 64,1  | 0,77                       | 122,74    | 0,07  | 0,77      |
| 3        | N10                     | G – Atl             | 635                         | 491              | 72    | 0,57                       | 50,07     | 0,13  | 1,11      |
| 4        | TŠŠ                     | G – Atl             | 673                         | 455              | 68    | 0,59                       | 33,41     | 0,08  | 1,2       |
| 5        | Š                       | –                   | 618                         | 423              | 67,5  | 0,77                       | 117,59    | 0,11  | 0,91      |
| 6        | A                       | –                   | 535                         | 338              | 69,3  | 0,72                       | 327,4     | 0,16  | 1,52      |
| 7        | AV                      | G – 2Atl            | 577                         | 420              | 69,1  | 0,76                       | 245,4     | 0,12  | 1,17      |
| 8        | 15Cr3NiMoV              | Atk                 | 725                         | 435              | 59,6  | 0,51                       | 5,76      | 0,16  | 1,51      |
| 9        | 1                       | Atk                 | 735                         | 500              | 65    | 0                          | 0         | 0     | 0         |
| 10       | 1G(33-50)               | G – 2Atl            | 650                         | 454              | 65,5  | 0,87                       | 356,8     | 0     | 0         |
| 11       | 1G (51-64)              | G – 2Atl            | 650                         | 447              | 65,5  | 0,45                       | 10,65     | 0     | 0         |
| 12       | ZP                      | Atk                 | 497                         | 363              | 66,7  | 0,74                       | 170,1     | 0,11  | 1,1       |
| 13       | TST                     | G - Atl             | 674                         | 491              | 66,8  | 0,67                       | 74,7      | 0,08  | 1,05      |
| 14       | ZP                      | –                   | 538                         | 385              | 74    | 0,66                       | 112,4     | 0,11  | 0,79      |
| 15       | N                       | Atk                 | 770                         | 391              | 53,6  | 0,85                       | 264,2     | 0,12  | 1,19      |
| 16       | 22PŠ                    | –                   | 519                         | 424              | 76,,2 | 0,64                       | 63,8      | 0,1   | 0,85      |
| 17       | 22ŠZ                    | G – Atl             | 445                         | 362              | 76    | 0,61                       | 86,6      | 0,1   | 0,86      |
| 18       | TT                      | G - Atl             | 652                         | 447              | 61    | 0,73                       | 145,8     | 0,13  | 1,31      |
| 19       | 1                       | Atk                 | 678                         | 439              | 68,8  | 0,93                       | 387,9     | 0,09  | 1,21      |
| 20       | 5ŠZT                    | G – 8Atl            | 439                         | 341              | 80    | 0,63                       | 86,76     | 0,12  | 0,98      |
| 21       | SŠ                      | G – 2Atl            | 680                         | 465              | 75    | 0,84                       | 381,6     | 0,05  | 0,74      |
| 22       | ŠR                      | 3G – 2Atl           | 765                         | 500              | 70,7  | 0,75                       | 190,9     | 0,05  | 0,83      |
| 23       | 4Š2T                    | 5Atk                | 417                         | 329              | 78    | 0,59                       | 59,48     | 0,1   | 0,73      |
| 24       | ŠA                      | –                   | 508                         | 340              | 64,5  | 0,53                       | 24,95     | 0,11  | 0,84      |
| 25       | ŠT                      | Atk                 | 459                         | 359              | 73    | 0,61                       | 70,73     | 0,11  | 0,9       |
| 26       | 1T, 2T, 3T              | N                   | 659                         | 425              | 70    | 0,85                       | 337,4     | 0,13  | 1,6       |
| 27       | AE                      | G – Atk             | 603                         | 437              | 72    | 0,71                       | 175,2     | 0,14  | 1,13      |
| 28       | AŠ                      | G – Atl             | 604                         | 423              | 68    | 0,91                       | 378,8     | 0,16  | 1,35      |

**3 priedo tęsinys**

|                                   |       |          |     |     |      |      |        |      |      |
|-----------------------------------|-------|----------|-----|-----|------|------|--------|------|------|
| 29                                | N     | G – 4Atl | 770 | 530 | 73,5 | 0    | 0      | 0    | 0    |
| 30                                | NZ    | G – Atl  | 590 | 460 | 71   | 1,02 | 1555,7 | 0,06 | 0,8  |
| 31                                | Cr1   | 2Atk     | 560 | 410 | 77   | 0,84 | 440    | 0,13 | 1,25 |
| 32                                | A     | –        | 681 | 421 | 63,1 | 0,84 | 400,9  | 0,24 | 2,04 |
| 33                                | Z1-Z1 | N        | 592 | 435 | 69,5 | 0,92 | 297,13 | 0,16 | 1,6  |
| 34                                | S     | –        | 560 | 393 | 67   | 0,75 | 154,3  | 0,08 | 0,8  |
| Apskaičiuotos vidutinės reikšmės: |       |          |     |     |      | 0,67 | 209,7  | 0,1  | 0,95 |

#### 4 priedas

Legiruotų konstrukcinių plienų siūlių terminis apdirbimas, statinės mechninės ir nuovargio charakteristikos aukštesnėje temperatūroje

| Eil. Nr.                          | Legiruoti plienų siūlės | Terminis apdirbimas | Mechaninės charakteristikos |                  |      | Nuovargio charakteristikos |           |       |           |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------------|------------------|------|----------------------------|-----------|-------|-----------|
|                                   |                         |                     | $\sigma_u$ , MPa            | $\sigma_y$ , MPa | Z    | $m_p$                      | $C_p$ , % | $m_e$ | $C_e$ , % |
| 1                                 | TŠŠ                     | G – Atl             | 643                         | 432              | 58   | 0,98                       | 140,7     | 0,17  | 1,74      |
| 2                                 | 1V-8V                   | G – Atl             | 661                         | 461              | 63,8 | 0,83                       | 335,1     | 0,13  | 1,28      |
| 3                                 | 1R-7R                   | G – 2Atl            | 593                         | 400              | 61,3 | 0,76                       | 100,1     | 0,22  | 2,13      |
| 4                                 | 1                       | Atk                 | 554                         | 289              | 56,2 | 0,86                       | 258,63    | 0,22  | 2,16      |
| 5                                 | 2                       | Atk                 | 552                         | 268              | 52,6 | 0,78                       | 180,77    | 0,11  | 1,07      |
| 6                                 | VM                      | G – 2Atl            | 511                         | 390              | 63,9 | 0,79                       | 133,4     | 0,18  | 1,24      |
| 7                                 | K                       | G – 2Atl            | 680                         | 332              | 56   | 0,63                       | 40,18     | 0,13  | 1,04      |
| 8                                 | 1KP                     | G - Atl             | 569                         | 320              | 67,1 | 0,55                       | 16,77     | 0,27  | 1,8       |
| 9                                 | 8MP                     | Atk                 | 530                         | 320              | 62,6 | 0,84                       | 227,21    | 0,12  | 1,03      |
| 10                                | 18                      | Atk                 | 585                         | 340              | 68,5 | 0,65                       | 100,2     | 0,11  | 0,94      |
| 11                                | 30                      | Atk                 | 600                         | 397              | 66,5 | 0,71                       | 55,53     | 0,21  | 2,47      |
| 12                                | A54, A52, A53           | Atk                 | 785                         | 570              | 61   | 0,92                       | 494,5     | 0,32  | 6,04      |
| 13                                | 22S                     | G – Atl             | 427                         | 261              | 73,2 | 1,1                        | 417,1     | 0,19  | 1,71      |
| 14                                | 22K                     | –                   | 417                         | 188              | 54,5 | 1,0                        | 287       | 0,22  | 2,02      |
| 15                                | MG                      | –                   | 685                         | 360              | 53,1 | 0,59                       | 38,74     | 0,08  | 1,05      |
| 16                                | 1G                      | G – 2Atl            | 585                         | 335              | 64,5 | 0,66                       | 50,63     | 0,11  | 1,13      |
| 17                                | R                       | –                   | 825                         | 350              | 42,1 | 0,71                       | 131,22    | 0,11  | 1,36      |
| 18                                | T11                     | G – 2Atl            | 534                         | 379              | 70,5 | 0,74                       | 139,44    | 0,13  | 1,04      |
| 19                                | IV1                     | –                   | 594                         | 343              | 60,4 | 0,81                       | 225,76    | 0,09  | 1,05      |
| 20                                | MN                      | Atk                 | 590                         | 374              | 64   | 0,83                       | 300,06    | 0,2   | 2,38      |
| 21                                | A1                      | –                   | 1000                        | 363              | 34   | 0,91                       | 51,58     | 0,16  | 2,14      |
| 22                                | N1                      | G – Atl             | 665                         | 375              | 60   | 0,69                       | 62,79     | 0,16  | 1,75      |
| 23                                | N3                      | G – Atl             | 590                         | 376              | 71   | 0,7                        | 59,75     | 0,13  | 1,2       |
| Apskaičiuotos vidutinės reikšmės: |                         |                     |                             |                  |      | 0,78                       | 167,25    | 0,16  | 1,73      |